

LAS GEOTECNOLOGÍAS EN EL DESARROLLO SOSTENIBLE

GEOTECNOLOGIAS NO DESENVOLVIMIENTO SUSTENTÁVEL

ISBN: 978-9915-9495-2-9



unesp



Asociación de Universidades
GRUPO MONTEVIDEO

UNR

Universidad
Nacional
de Rosario

EDITORES:

**Néstor C. Di Leo
David L. Rosalen**

EDITORES

NÉSTOR CRISTIAN DI LEO

DAVID LUCIANO ROSALEN

***LAS GEOTECNOLOGÍAS EN EL DESARROLLO
SOSTENIBLE***

***GEOTECNOLOGIAS NO DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL***

MONTEVIDEO - URUGUAY

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO (UNR)

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)

ASOCIACIÓN DE UNIVERSIDADES GRUPO MONTEVIDEO (AUGM)

2023

Información catalográfica:

D536g

Di Leo, Néstor Cristian.

Geotecnologías en el Desarrollo Sostenible = Geotecnologias no Desenvolvimento Sustentável / Néstor Cristian Di Leo, David Luciano Rosalen.
– Montevideo: AUGM, 2023.

299 p.; 21 x 29,7 cm

ISBN 978-9915-9495-2-9

1. Geotecnología 2. Ciencia Atmosférica 3. Desarrollo Sostenible
4. Teledetección 5. Argentina 6. Bolivia 7. Brasil 8. Chile 9. Paraguay
10. Uruguay I. Néstor Cristian Di Leo II. David Luciano Rosalen III.
AUGM IV. Título

CDU 528.8

Versión electrónica disponible gratuitamente en la siguiente dirección:

Asociación de Universidades Grupo Montevideo (ND GEOTECNOLOGÍAS Y CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA): - <http://grupomontevideo.org/ndca/ndgca/> -

Diseño editorial y maquetación:

Néstor C. Di Leo & David L. Rosalen

Diseño de tapas:

Néstor C. Di Leo

Imagen satelital:

Satélite Landsat 8, sensor *Operational Land Imager* (OLI)

Área geográfica:

Parque Nacional Iguazú/Iguaçu

Misiones (Argentina) / Paraná (Brasil)

Fecha de captura:

2015-08-09

Composición de color:

RGB: 543 (arriba)

RGB: 743 (abajo)

PREFACIO

En la actualidad, el mundo enfrenta grandes desafíos vinculados a una cantidad de población en aumento y con estándares de consumo cada vez más exigentes, mientras que la dotación de recursos es finita e incluso se encuentra amenazada por un uso no sustentable. Los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU han sido establecidos para abordar estos desafíos y guiar los esfuerzos hacia un futuro más justo y equitativo para todos.

En este contexto, las Geotecnologías implican un ecosistema tecnológico que integra a la Teledetección, a los Sistemas Globales de Navegación por Satélites y a los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Este conjunto de herramientas tecnológicas juega un papel fundamental en la toma de decisiones y la gestión del territorio, contribuyendo a la consecución de los ODS.

Este libro técnico tiene como objetivo principal presentar las líneas de trabajo que se desarrollan en el marco del Núcleo Disciplinar Geotecnologías y Ciencias de la Atmósfera de la Asociación de Universidades Grupo Montevideo (AUGM), focalizando en aquellas que presentan o proponen una clara integración entre las Geotecnologías y su vinculación con los ODS de la ONU. En él se abordan conceptos teóricos y prácticos sobre estas herramientas, con el fin de brindar un enfoque integral y actualizado de estas disciplinas. A lo largo de sus páginas, se abordarán diferentes temas, como la gestión de recursos naturales, la mitigación del cambio climático, la planificación urbana y rural, la gestión de riesgos, entre otros, todos ellos relacionados con los ODS.

Estas tecnologías permiten la recopilación, análisis y visualización de información geográfica, lo que se ha convertido en una herramienta clave para entender y abordar los desafíos que enfrenta nuestro planeta, desde la gestión de emergencias hasta la planificación de infraestructuras y servicios públicos.

Este libro está dirigido a profesionales, investigadores y estudiantes interesados en las Geotecnologías y en sus múltiples instancias y/o escalas de implementación, así como en su vinculación con los Objetivos del Desarrollo Sostenible. Se espera que este libro contribuya a la difusión de estas herramientas y a la promoción de su uso para el logro de un futuro más sostenible, justo y equitativo para todos.

Los editores

PREFÁCIO

Hoje, o mundo enfrenta grandes desafios ligados a uma população crescente e a padrões de consumo cada vez mais exigentes, enquanto a dotação de recursos é finita e até mesmo ameaçada pelo uso insustentável. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU foram estabelecidos para enfrentar esses desafios e orientar os esforços para um futuro mais justo e equitativo para todos.

Neste contexto, as Geotecnologias implicam um ecossistema tecnológico que integra Sensoriamento Remoto, Sistemas Globais de Navegação por Satélite e Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Este conjunto de ferramentas tecnológicas desempenha papel fundamental na tomada de decisões e na gestão do território, contribuindo para o alcance dos ODS.

O principal objetivo deste livro técnico é apresentar as linhas de trabalho que se desenvolvem no âmbito do Núcleo Disciplinar de Geotecnologias e de Ciências Atmosféricas da Associação de Universidades do Grupo de Montevideu (AUGM), enfocando aquelas que apresentam ou propõem clara integração entre as Geotecnologias e sua ligação com os ODS da ONU. Aborda conceitos teóricos e práticos sobre essas ferramentas, a fim de proporcionar uma abordagem abrangente e atualizada dessas disciplinas. Ao longo de suas páginas, serão abordados diversos temas, como gestão de recursos naturais, mitigação das mudanças climáticas, planejamento urbano e rural, gestão de riscos, entre outros, todos relacionados aos ODS.

Essas tecnologias permitem a coleta, a análise e a visualização de informações geográficas, que se tornaram ferramenta fundamental para entender e enfrentar os desafios de nosso planeta, desde o gerenciamento de emergências até ao planejamento de infraestrutura e de serviços públicos.

Este livro é destinado a profissionais, pesquisadores e estudantes interessados em Geotecnologias e suas múltiplas instâncias e/ou em escalas de implementação, bem como sua vinculação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Espera-se que este livro contribua para a divulgação destas ferramentas e a promoção de sua utilização para o alcance de um futuro mais sustentável, justo e equitativo para todos.

Os editores

ÍNDICE

ENSEÑANZA SOBRE LOS INDICADORES GEOGRÁFICOS DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS) EN URUGUAY 9

Rosario Casanova

ANÁLISIS DE LAS REDISTRIBUCIONES DE MASA HÍDRICA EN EL TERRITORIO SUDAMERICANO MEDIANTE DATOS SATELITALES GRAVIMÉTRICOS 31

Ayelen Pereira; Cecilia Cornero; Ma. Cristina Pacino

APLICACIÓN DE POLARIMETRÍA SAR PARA LA DETERMINACIÓN DE ÁREAS INUNDADAS..... 41

Silvio Graciani; Marco Brogioni; Marcelo Corti

CONTRIBUIÇÕES DAS CIÊNCIAS GEODÉSICAS PARA MONITORAMENTO AMBIENTAL E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL..... 65

Christian Pilapanta Amagua; Cláudia Pereira Krueger; Hideo Araki; Jorge Silva Centeno; Paulo de Oliveira Junior; Rodrigo de Campos Macedo; Tiago Lima Rodrigues

APRENDIZAJE AUTOMÁTICO PARA LA CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES DEL RÍO PARANÁ CON SENTINEL 2..... 83

Gianfranco Fagioli; Virginia Venturini; Zuleica Marchetti; Elisabet Walker

DINÂMICA ESPACIAL LOCAL DOS CRIMES E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE PIRACICABA/SP 99

Eder Silvestre; Andréia Medinilha Pancher

FENOTIPADO DE ALTAS PRESTACIONES BASADO EN SENSORES A BORDO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANTS) 121

Néstor Di Leo

GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À OCEANOGRAFIA: EXPERIÊNCIAS NO INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE..... 145

Fernanda Giannini; Fabrício Sanguinetti Cruz de Oliveira; Salette Amaral de Figueiredo; Ana Piazza Forgiarini; Jorge Arigony Neto

HUELLA URBANA DE LA CIUDAD DE ROSARIO, SANTA FE, ARGENTINA. AÑOS 2013 Y 2015	165
Laura Balparda; Diego López; Florencia Tazzioli; Ma. Cecilia Torralba; Brunela Ciattaglia; Héctor Peña; Tania Solis; Verónica Aquili; Dardo Delorenzi; Benito Vicioso	
IMPLEMENTACIÓN DE ÍNDICES DE DÉFICIT HÍDRICO PARA EL MONITOREO DE SEQUÍAS EN EL SALVADOR CON DIFERENTES FUENTES DE DATOS	183
Osmin Cordova; Virginia Venturini ; Leandro Sgroi; Elisabet Walker	
INDICADORES DE IMPACTO URBANO-AMBIENTAL EN LOS ANEGAMIENTOS DEL 2010 Y 2015 EN SANTA FE, ARGENTINA: DIAGNÓSTICO MULTINIVEL BASADO EN SIG	195
Andrea Bosisio; Antonio Moreno Jiménez	
MODELO PREDICTIVO DE LA DISPONIBILIDAD DE BIOMASA DE <i>Spartina argentinensis</i> EMPLEANDO IMÁGENES ESPECTRALES DESDE UN DRONE.....	213
Emiliano Jozami; Néstor Di Leo; Ivana Barbona; Bárbara Civit; Susana Feldman	
PAISAJE E IN-CON-FORMIDAD: FRICCIONES ENTRE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y LA HUMANA	225
Pedro Ferrazini; Ana Valderrama	
EL FUNCIONAMIENTO ECOSISTÉMICO DE LOS HÁBITATS DE VILLARINO Y PATAGONES A PARTIR DE PRODUCTOS MODIS	237
Leandro Palmeyro; Alejandra Geraldi; Federico Barragán	
INVESTIGACIONES Y DESARROLLOS EN TEMAS DE FÍSICA DE COMPONENTES ATMOSFÉRICOS, RADIACIÓN SOLAR, CAMBIO CLIMÁTICO Y CLIMA ESPACIAL	253
Rubén Piacentini; María Micheletti; Adriana Ipiña; Ivan Novara; Daniel Berdichevsky	
CARACTERIZAÇÃO ALTIMÉTRICA DE GLEBA RURAL POR MEIO DE DADOS OBTIDOS POR AEROFOTOGRAMETRIA DE BAIXA ALTITUDE.....	2799
Matheus Travaini Capeloto; David Luciano Rosalen	
A IMPORTÂNCIA DAS SÉRIES HISTÓRICAS DE USO E COBERTURA DA TERRA NA ANÁLISE DO PROCESSO DE URBANIZAÇÃO: EXEMPLO DO MUNICÍPIO DE DIADEMA – SP, BRASIL	291
Ana Vietti Bitencourt; Elisa Hardt	

ENSEÑANZA SOBRE LOS INDICADORES GEOGRÁFICOS DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS) EN URUGUAY

Rosario Casanova

Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

casanova@fing.edu.uy

Resumen

En el marco de las carreras de Ingeniería en Agrimensura y del Tecnólogo en Cartografía de la Universidad de la República, se ha implementado el dictado de dos módulos de investigación sobre la medición de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Uruguay; la finalidad de estos módulos consiste en acercar al estudiante a la metodología de investigación y al aprendizaje sobre la medición de los indicadores de los ODS, así como realizar un estudio sobre el uso de los indicadores geográficos de los ODS en Uruguay.

En este sentido, se conformó un equipo de trabajo integrado por estudiantes de ambas carreras, que se familiarizaron con los ODS. Los integrantes de este equipo elaboraron el estado del arte sobre la medición de sus indicadores con énfasis en los geográficos, analizaron las diferentes guías metodológicas disponibles para medirlos, sistematizaron los datos obtenidos, identificaron brechas actuales entre los procedimientos internacionales sugeridos y la forma de medición en el país y, finalmente, realizaron algunas propuestas metodológicas. Como entrega final, han elaborado informe y varias presentaciones en otros cursos de la formación, así como en un evento internacional en otra Universidad.

La entrega final del primer módulo incluyó un primer diagnóstico sobre la medición de los indicadores geográficos de los ODS en nuestro país, los puntos débiles detectados en la aplicación de las guías disponibles, así como también futuras líneas de investigación para seguir profundizando en la temática.

Como segunda etapa de esa propuesta pedagógica se realizó un segundo curso sobre la materia, en el que se analizaron detalladamente, para algunos indicadores en particular, la metodología de medición usada en nuestro país y la aplicabilidad de las guías metodológicas existentes a nivel global; asimismo, se identificaron algunas debilidades en dichos procedimientos y se elaboraron propuestas y recomendaciones para fortalecer y sistematizar la construcción de dichos indicadores geográficos. Con estos objetivos se ha logrado introducir a los estudiantes no sólo en la investigación sino en la comprensión y reflexión de la aplicación de diferentes herramientas y técnicas de análisis espacial que permiten medir los ODS, adicionalmente se concretó con la aplicación a un territorio específico del país.

Es una experiencia pedagógica que permite ingresar al mundo de los ODS desde una mirada práctica que lleva, a cada estudiante, a incursionar específicamente sobre los indicadores geográficos, comprender su importancia y proponer alternativas para su correcta medición, seguimiento y monitoreo.

Introducción

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un conjunto de objetivos, metas e indicadores universales que los Estados miembros de la ONU se han comprometido a utilizar para enmarcar las políticas nacionales e internacionales de desarrollo durante los próximos 15 años. Los mismos se basan en los avances logrados con los Objetivos de desarrollo del Milenio (ODM), los cuales fueron acordados por los gobiernos en 2001 y expiraron en 2015. Mientras que los ODM se centraron en la reducción de la pobreza extrema en todas sus formas, los ODS abarcan una agenda más amplia que incluye los aspectos sociales, ambientales y económicos del desarrollo sostenible, pertinentes para todos los países del mundo.

Los ODS constituyen el eje central de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que fue ratificada por todos los Estados miembros de la ONU en la Asamblea General de las Naciones Unidas de 2015. Sus 17 objetivos y 169 metas abordan asuntos cruciales que el mundo actual está enfrentando, como la erradicación de la pobreza extrema, la lucha contra la desigualdad global y el cambio climático, el fomento de la urbanización y del desarrollo industrial sostenibles, la protección de los ecosistemas naturales y la promoción del crecimiento de sociedades e instituciones gubernamentales pacíficas e inclusivas. Se elaboró un conjunto de 231 indicadores (Naciones Unidas, 2021)¹ para medir los progresos conseguidos en el cumplimiento de los ODS y las metas conexas, en los países y entre ellos. Varios de estos indicadores tienen un fuerte componente geográfico ya que tienen un vínculo directo con el territorio.

Tanto a nivel internacional como a nivel nacional, se ha detectado que existe una gran ausencia de formación en temáticas vinculadas a los OD; en particular se puede afirmar para el caso de las carreras de Ingeniero Agrimensor y del Tecnólogo en Cartografía que se dictan en Uruguay. Si bien pueden ser los ODS objeto de alguna mención no son objeto de estudio de ninguno de los cursos obligatorios que integran la *currícula* de ambas disciplinas. Adicionalmente, la formación académica en investigación de los estudiantes es muy débil.

En aras de cubrir estas deficiencias, se diseñó una propuesta pedagógica que consiste en una unidad de enseñanza llamada *módulos de investigación*. Particularmente, los módulos presentados en este artículo tienen por objetivo realizar una investigación sobre el uso de los indicadores, con énfasis en los vinculados con la información geográfica, de los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por Naciones Unidas poniendo foco en su medición en Uruguay.

Propuesta metodológica

Los planes de estudios de las carreras de Ingeniería en Agrimensura (Universidad de la República, 2021)² y del Tecnólogo en Cartografía (Facultad de Ingeniería, 2021)³ de la Universidad de la República, brindan la posibilidad de realizar módulos de investigación como actividad opcional

Dentro de los estatutos del plan de Estudios, según la página⁴ de la Comisión de Carrera de Agrimensura, se describen los módulos de investigación de la siguiente manera:

Los módulos de investigación es *[sic]* una actividad opcional para los estudiantes de Agrimensura.

¹https://unstats.un.org/sdgs/indicators/Global%20Indicator%20Framework_A.RES.71.313%20Annex.Spanish.pdf

² <https://udelar.edu.uy/portal/2020/02/agrimensura/>

³ <https://www.fing.edu.uy/carrera/grado/tecnologo-en-cartografia>

⁴ Extraído de página de Comisión de carrera del Instituto de Agrimensura: <https://eva.fing.edu.uy/course/view.php?id=1511§ion=7#tabs-tree-start>

La actividad se desarrollará bajo la supervisión de un docente o un grupo de ellos de acuerdo a los parámetros de la investigación planteada. El o los responsables de la supervisión deberán presentar a la Comisión de Carrera un plan de la investigación y la forma en que los estudiantes participarán. Este plan deberá contener, al menos, el alcance de las tareas, los plazos, los medios para llevarla a cabo, objetivos de la propuesta y los créditos a asignar. También se debe informar si la actividad tiene cupo y la forma de selección de lo [sic] estudiantes.

La aprobación de la propuesta como adecuada para la realización por parte de los estudiantes es competencia de la Comisión de Carrera.

Los estudiantes podrán acumular hasta 10 créditos en este tipo de actividades los que se podrán conseguir con hasta dos módulos a lo largo de la carrera. Los créditos serán asignados al área de conocimiento que corresponda en función de la temática del módulo.

Cabe aclarar el concepto de crédito definido en el artículo 8 de la Ordenanza⁵ (Universidad de la República, 2014) de estudios de grado y otros programas de formación terciaria de la Universidad de la República:

Se define el crédito como la unidad de medida del tiempo de trabajo académico que dedica el estudiante para alcanzar los objetivos de formación de cada una de las unidades curriculares que componen el plan de estudios. Se empleará un valor del crédito de 15 horas de trabajo estudiantil, que comprenda las horas de clase o actividad equivalente, y las de estudio personal.

Dando cumplimiento a esta normativa se presentó, ante las Comisiones de Carrera de Ingeniero Agrimensor y de Tecnólogo en Cartografía, el programa para los módulos de investigación “Uso de la información geográfica para monitoreo de ODS en Uruguay” 1 y 2. Los que fueron analizados, considerados, evaluados y aprobados.

Módulos que tienen como objetivos pedagógicos:

- Acercar a los estudiantes al conocimiento de los ODS;
- Introducir a los estudiantes las metodologías de investigación;
- Promover el espíritu crítico en el abordaje del análisis;
- Incentivar la elaboración de procesos propositivos para medir los indicadores geográficos;
- Fomentar el trabajo interdisciplinario;
- Introducir a los estudiantes a la redacción de artículos científicos y a la difusión de proyectos;
- Promover la realización de actividades de comunicación, mediante la elaboración y realización de reportes, informes y presentaciones orales como escritas a nivel nacional e internacional.

El objetivo general de la propuesta consiste en realizar una investigación sobre el uso de los indicadores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, establecidos por Naciones Unidas, con énfasis en los vinculados con la información geográfica, en Uruguay.

Los objetivos específicos del módulo 1 fueron los siguientes:

- Realizar un diagnóstico del estado de relevamiento de indicadores geográficos de ODS en nuestro país.
- Identificar fortalezas y debilidades de las mediciones realizadas.
- Analizar la aplicabilidad de las guías metodológicas existentes a nivel global, para realizar dichos relevamientos, a nuestro país.
- Análisis de los informes oficiales nacionales sobre la medición de los indicadores.
- Introducir a los estudiantes participantes en las diferentes técnicas aplicadas para medir los ODS y su evaluación a través de un proyecto concreto en el que se verán los distintos conceptos involucrados.

⁵ https://www.cse.udelar.edu.uy/wp-content/uploads/2013/12/documento_ordenanza_de_grado_corregida_paginas_simples.pdf

Bajo este contexto, se propone dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el estado de medición de los indicadores geográficos para el monitoreo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Uruguay?

Mientras que los objetivos específicos del módulo 2 fueron:

- Identificar fortalezas y debilidades de la medición de los indicadores geográficos de ODS en nuestro país.
- Analizar, para algunos indicadores en particular, la aplicabilidad, a nuestro país, de las guías metodológicas existentes a nivel global.
- Introducir a los estudiantes participantes en las diferentes técnicas aplicadas para medir los ODS y su evaluación a través de un caso concreto en el que verán los distintos conceptos y actores involucrados.

Propuesta de trabajo

Se conformó, en cada módulo, un equipo de estudiantes para realizar las siguientes actividades: estudio del estado del arte de la medición de los indicadores geográficos de ODS en Uruguay, análisis de las diferentes guías metodológicas existentes para cada indicador, comprensión de los informes nacionales, sistematización de los datos obtenidos, identificación de las brechas actuales y propuesta de procedimientos alternativos.

Para conformar dicho equipo se ofrecieron cupos para estudiantes de las carreras de Agrimensura y del Tecnólogo en Cartografía, requiriendo una dedicación mínima de 10 horas semanales durante dos meses. Esta tarea implicó la asignación de 5 créditos académicos que fueron validados para los estudiantes de Agrimensura en el área temática de Sistemas de Información Geográfico. Mientras que para los estudiantes del Tecnólogo en Cartografía los créditos han sido asignados al área temática Geomática.

Otro aspecto importante, que se informó a los postulantes es que deberían tener disponibilidad para asistir a las reuniones informativas generales, así como en todas las puntuales requeridas por la docente responsable. Para lo cual se previó la realización de reuniones grupales semanales. Además, dado que el primer módulo se inició en el segundo semestre del año 2020 y el segundo módulo en el segundo semestre del año 2021, estando en plena pandemia COVID-19, el intercambio se realizó de manera virtual por lo que la participación activa en las reuniones cobró un rol protagónico para alcanzar los objetivos propuestos.

En lo que refiere a las unidades didácticas incluidas en cada módulo, se diseñó un proceso de enseñanza para cada uno de ellos, que incluye actividades específicas para alcanzar sus objetivos particulares.

El proceso de enseñanza en el módulo 1 incluyó las siguientes actividades:

1. Aprendizaje sobre los ODS, sus indicadores e identificación de los indicadores geográficos.

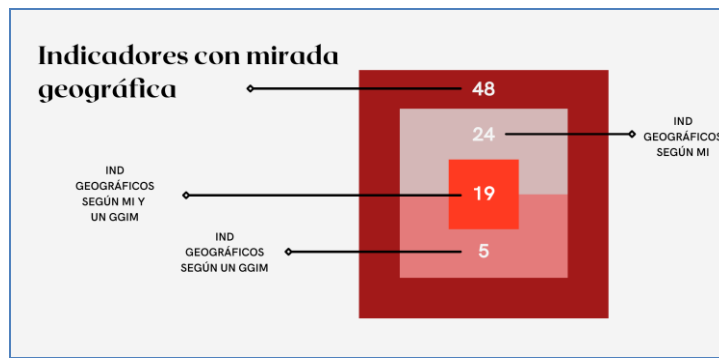


Figura 1: Descripción del número de indicadores geográficos y el criterio utilizado para seleccionarlos. Fuente: Presentación realizada por estudiantes del módulo 2.

2. Estudio sobre el abordaje nacional sobre ODS, identificando las instituciones responsables y vinculadas.
3. Estudio del estado del arte sobre la medición de dichos indicadores en Uruguay, utilizando los informes nacionales voluntarios⁶ (Estado Uruguayo, 2021).



Figura 2: Carátula Informe⁷ Nacional Voluntario de Uruguay 2021. Fuente: Presidencia de la República, Uruguay (2021)

4. Estudio del estado del arte sobre la aplicación de las diferentes guías metodológicas existentes a nivel internacional.

Tabla 1: Extracción de la tabla comparativa generada para cada indicador geográfico.

Nº de indicador	¿Es aplicable a Uruguay?	¿Existe una guía internacional?	¿Se está midiendo de acuerdo a la guía internacional?	Si NO se mide igual, ¿Existe un indicador suplementario?
1.1.1	Si	Si	No	Si
1.4.1	Si	Si	No	Si
1.4.2	Si	Si	No	No
1.5.1	Si	Si	No	Si
2.3.1	Si	Si	No	Si
2.4.1	Si	Si	No	Si
3.9.1	Si	Si	No	No
3.9.2	Si	Si	No	No

⁶ <https://www.gub.uy/agencia-uruguay-cooperacion-internacional/comunicacion/publicaciones/informe-nacional-voluntario-2021>

⁷ https://ods.gub.uy/images/2021/Informe_Nacional_Voluntario_Uruguay_2021.pdf

5. Identificación primaria de fortalezas y debilidades en la medición de dichos indicadores en nuestro país.

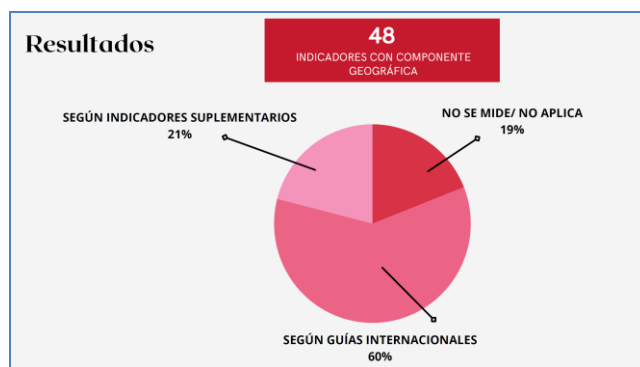


Figura 3: Gráfica de los resultados obtenidos del análisis del estado de medición de los indicadores geográficos en Uruguay. Fuente: Informe de Avance realizado por estudiantes del módulo 1.

Y en el módulo 2 se incluyeron las siguientes tareas:

1. Revisión del informe final del módulo 1.
2. Elaboración de un artículo publicable y presentación del módulo 1, incluyendo introducción, metodología, resultados y conclusiones.
3. Revisión de los indicadores geográficos estudiados y selección de algunos para ser analizados en detalle.

Tabla 2: Indicadores geográficos seleccionados.

2.4.1 Proporción de la superficie agrícola en que se practica una agricultura productiva y sostenible
6.3.2 Proporción de masas de agua de buena calidad
6.6.1 Cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua con el paso del tiempo
15.1.1 Superficie forestal en proporción a la superficie total
15.1.2 Proporción de lugares importantes para la biodiversidad terrestre y del agua dulce incluidos en zonas protegidas, desglosada por tipo de ecosistema

4. Estudio de la medición de dichos indicadores a nivel nacional, analizando los informes nacionales voluntarios.

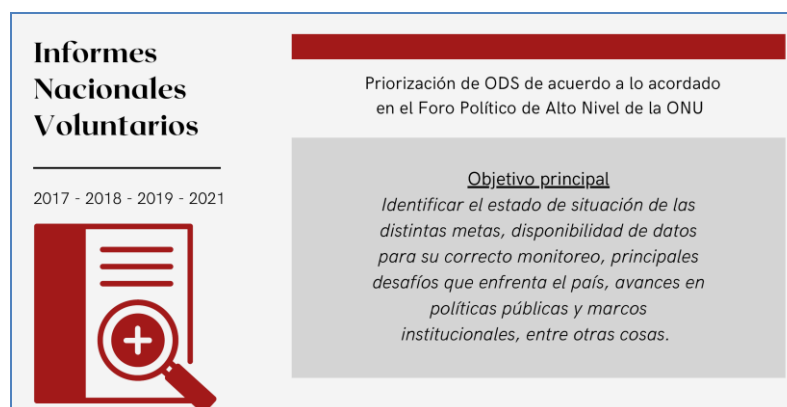


Figura 4: Cuadro descriptivo de los informes voluntarios nacionales. Fuente: Presentación realizada por estudiantes del módulo 2.

5. Identificación de las diferentes guías metodológicas existentes a nivel internacional para medir los indicadores seleccionados.

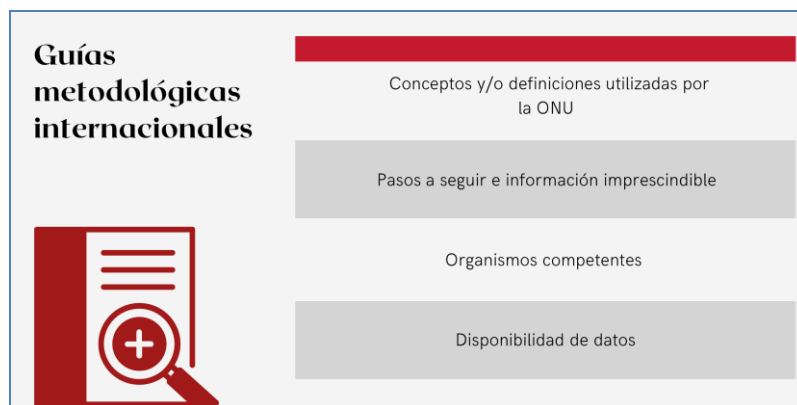


Figura 5: Descripción del contenido de las guías metodológicas internacionales. Fuente: Presentación realizada por estudiantes del módulo 2.

6. Aplicación de la propuesta metodológica a un caso de estudio en Uruguay.

7. Identificación de fortalezas y debilidades para la aplicación de dichas guías a nuestro país.

8. Propuesta inicial de una metodología para medir cada uno de los indicadores seleccionados en nuestro país.

Finalmente, a continuación, se presentan los productos más relevantes:

En el módulo 1:

- Base de datos de indicadores identificados como geográficos con datos asociados a cada uno referente a la guía internacional, su aplicación en Uruguay, así como detalle sobre la forma de medición usada en Uruguay.
- Informe final incluyendo introducción, metodología, resultados, conclusiones y futuras líneas de investigación.

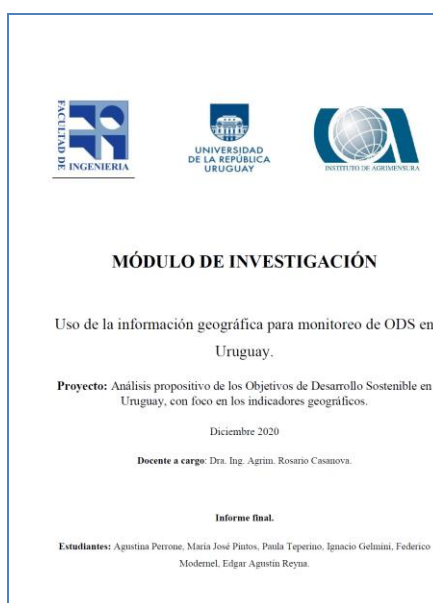


Figura 6: Carátula del informe final del Módulo 1.

- Presentación describiendo el módulo 1 y video grabado para la actividad anual de difusión Ingeniería de Muestra⁸ de la Facultad de Ingeniería (Facultad de Ingeniería, 2021).



Figura 7: Carátula de la presentación realizada por los estudiantes del Módulo 1.

- Propuesta de artículo para ser publicado en revista y/o congreso nacional e internacional.

En el módulo 2:

- Base de datos de indicadores geográficos elaborados en el módulo 1 ajustada. (Ver en Anexo).
- Base de datos depurada de los indicadores seleccionados.
- Informe final incluyendo metodología, análisis específico de cada indicador seleccionado, resultados y conclusiones.

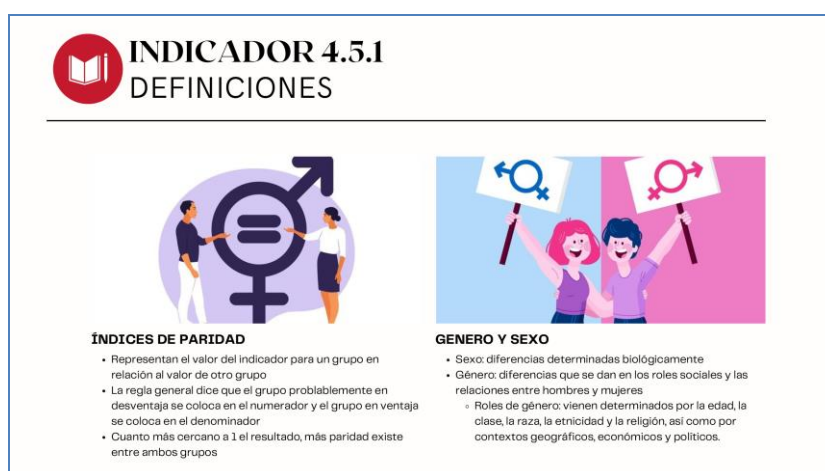


Figura 8: Descripción de variables utilizadas en un indicador específico, 4.5.1. Fuente: Presentación realizada por estudiantes del módulo 2.

- Presentación descriptiva del módulo 2.

⁸ <https://www.fing.edu.uy/es/node/43735>



Figura 9: Carátula de presentación realizada en la actividad organizada por la Universidad de Panamá. Fuente: Presentación realizada por estudiantes del módulo 2.

- Fichas descriptivas de los indicadores seleccionados, incluyendo análisis de guía internacional aplicable, detalle de la medición en nuestro país.

4.5.1		Observaciones
NIVEL	TIER II	el indicador es claro conceptualmente, tiene una metodología establecida internacionalmente y hay estándares disponibles, pero los países no producen datos con regularidad.
¿HAY GUÍA INTERNACIONAL?	SÍ	
¿SE MIDE EN URUGUAY?	SÍ	
LA MEDICIÓN EN URUGUAY ES SEGUN LA GUÍA O SE USAN INDICADORES SUPLEMENTARIOS	Indicadores Suplementarios	<ul style="list-style-type: none"> • Asistencia a algún establecimiento educativo e índice de paridades por edades simples según sexo, quintiles y grandes áreas • Matriculación en educación especial según forma de administración por año, todo el país (2002-2017) • Asistencia a algún establecimiento educativo e índice de paridades por edades simples según sexo, quintiles y grandes áreas

Figura 10: Ejemplo de ficha elaborada para un indicador específico, 4.5.1. Fuente: Presentación realizada por estudiantes del módulo 2.

- Informe con los resultados de la aplicación de la propuesta metodológica de algunos de los indicadores seleccionados a un caso de estudio en Uruguay.

Datos geográficos disponibles

Variable	Capa	Existe y está accesible	Link a la capa
Centros educativos ANEP	Centros ANEP SHP	SÍ	SHP
Límite departamental	Departamentos del Uruguay SHP	SÍ	SHP
Parcelario	Total País Urbano SHP	SÍ	SHP
Reportes ANEP	Reportes en CSV	SÍ	CSV

Figura 11: Información geográfica utilizada para el cálculo de un indicador al caso de estudio. Fuente: Presentación realizada por estudiantes del módulo 2.

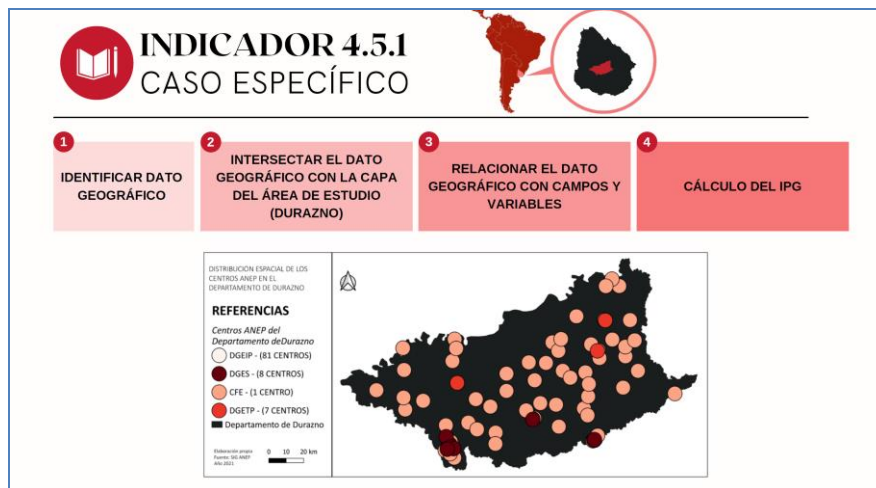


Figura 12: Diagrama explicativo del proceso de análisis geográfico utilizado para el cálculo de un indicador en particular. Fuente: Presentación realizada por estudiantes del módulo 2.

- Propuesta de artículo para ser publicado en revista y/o congreso nacional e internacional.

Reflexiones finales

En lo referente a la propia investigación se llegaron a interesantes conclusiones:

- De la totalidad de los indicadores de los ODS se ha identificado que un 21% tiene una componente geográfica y por tanto la mirada espacial cobra un rol protagónico a la hora de realizar el monitoreo, evaluación y seguimiento del grado de avance alcanzado en cada objetivo de desarrollo sostenible. Por lo que, deja en evidencia que la formación específica sobre el uso de la información geográfica al servicio de la medición de estos objetivos es imprescindible.
- De dichos indicadores geográficos 40% son considerados de categoría de claridad conceptual alta nivel 1, el 60% nivel 2 y ninguno de dichos indicadores es nivel 3. Asumiendo para cada categoría las siguientes definiciones:
 - Nivel 1: El indicador es claro conceptualmente, tiene una metodología establecida internacionalmente y hay estándares disponibles. Los datos son generados regularmente por al menos el 50% de los países y de la población en todas las regiones donde el indicador es relevante.
 - Nivel 2: El indicador es claro conceptualmente, tiene una metodología establecida internacionalmente y hay estándares disponibles, pero los países no producen datos con regularidad.
 - Nivel 3: Aún no se dispone de una metodología o estándares establecidos internacionalmente para el indicador, pero se están (o será) desarrollado o probado.

Lo que indica que si bien la totalidad de los indicadores cuentan con conceptos y metodología internacional de medición clara esto no garantiza que sea posible medirlos, ya sea por ausencia de datos y/o de profesionales capaces de generarlos. Ya que si bien disponen de una guía metodológica internacional para orientar su medición se requiere de personal técnico que sea capaz de aplicarla.

- A nivel país, los números sorprenden, ya que de la totalidad de los 48 indicadores geográficos se están midiendo un 81%. Si bien para todos ellos existen guías metodológicas orientadoras solo un 60% se mide utilizando la propuesta incluida en ellas. Mientras que para medir el restante 21% se utilizan indicadores suplementarios que difieren, de alguna manera, con los conceptos presentados en la definición del indicador correspondiente.

En lo que refiere a la propuesta pedagógica:

- Es una propuesta que tiende lazos entre la mirada ambiental, la geográfica y la académica. Estrecha los vínculos entre la formación académica y las necesidades gubernamentales. Abriendo puertas tanto a los futuros universitarios como a las nuevas generaciones a una inserción real y necesaria para la sociedad.
- Es una propuesta innovadora que permite formar profesionales expertos en el uso de la información geográfica y acercarlos a la comprensión de la medición de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- Pone en evidencia la necesidad de incluir en la agenda universitaria esta formación tanto en temáticas geográficas, ambientales como en investigación.
- Visibiliza la importancia de contar con profesionales formados en estas disciplinas para contribuir a la medición de los ODS y por tanto cobran un rol protagónico como apoyo a la toma de decisiones. Ya que el monitoreo de los diferentes indicadores de los ODS deberían ser el timón que dirijan las políticas y planes gubernamentales.

Particularmente, en lo que refiere al aporte de estos módulos en Uruguay:

- Ha formado a estudiantes de las carreras de Ingeniería en Agrimensura y del Tecnólogo en Cartografía de la Universidad de la República. Brindándole nuevas herramientas tanto para iniciarse en la investigación como para contribuir en la medición de los ODS.
- Ha abierto puertas a la academia para vincularse con instituciones gubernamentales y realizar propuestas de trabajo conjunto para contribuir en la medición de los ODS en nuestro país.
- Posiciona, de alguna manera, a nuestro país y a nuestra Universidad como un referente en la enseñanza de estas temáticas vinculadas.

Finalmente, nos parece altamente relevante compartir algunas reflexiones textuales aportadas por los propios estudiantes sobre los aprendizajes alcanzados en los módulos:

Sobre los conocimientos adquiridos:

- Este módulo fue como una puesta en práctica de los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera y a su vez, reforcé habilidades de investigación. Lo mejor de todo es la integración del módulo con la sociedad toda, ya que tuvimos la oportunidad de participar de eventos internacionales para exponer nuestro trabajo y, también, escribir un artículo.
- Reforcé conocimientos sobre ODS, sobre teledetección, sobre información geográfica y medio ambiente.
- La importancia de manejar una estructura clara y consistente a la hora de abordar una investigación, respetar etapas y desarrollar tareas que afectan a otros miembros de la investigación.
- Aprendí a ser más ordenado, y tener un pensamiento crítico, enfocado con lo que se desea obtener y posteriormente comunicar.
- Este módulo permitió expandir mi horizonte en cuanto a ser más concreta con los datos y saberlos clasificar y discernir entre lo utilizable o no, y lo que sirve como aplicarlo de forma más adecuada.
- Aprender a investigar y la búsqueda de información con los recursos que se tienen que a veces son muchos y otras muy pocos. Y por último las miles de oportunidades que se fueron presentando a lo largo de ambos módulos; ya sea eventos, la realización de un artículo, webinars, entre otras; todas instancias super enriquecedoras.

- No sé si aprendí “cosas nuevas” pero sí tuve una mirada nueva hacia conceptos y formas de hacer las cosas; por ejemplo, cuestionarme si realmente estoy entendiendo lo que estoy investigando o trabajando. Hay muchas veces que damos por hecho cosas que en el fondo no tenemos tan claras.
- Si bien tenía una vaga idea de lo que eran los ODS, no tenía conocimiento con exactitud, aprendí a interiorizarse con el tema, entender su relevancia y significado, de qué manera está siendo abordado en el mundo y a escala nacional, quienes son los organismos que se encargan de ello. Finalmente aprendí citar en formato APA, presentar un documento mejor, a nivel académico.

Sobre la capacidad de investigar:

- Creo que ha mejorado mi capacidad de investigar. Creo que el módulo te da independencia. Muchos estudiantes buscan la aprobación de un docente, sin ponerse a pensar en lo que le están presentando. El módulo es una instancia para reflexionar sobre lo que estamos haciendo, ser conscientes de donde estamos y a dónde queremos llegar sin que nos tengan que dar una receta digerida.
- Considero que mejoré la capacidad a través de adquirir un orden o proceso para abordar una investigación, y al mismo tiempo saber valorar el trabajo que se realiza, en ocasiones uno subestima los resultados obtenidos en el transcurso de la investigación, y es bueno ver otros enfoques.
- He mejorado mi capacidad de investigar, y más que nada algo que destaco que me parece super importante es la importancia de no ir “más allá”. Me di cuenta de que ir a lo puntual y a lo que se está pidiendo sin abrumar o utilizar información que no es relevante a veces cuesta mucho y es algo que se puede trabajar de a poco e ir mejorándolo; y siento que super aproveche esas instancias de correcciones y sugerencias de parte de la docente para mejorar en ese aspecto.
- Siento que aprendí muchísimo, no solo mejorar la capacidad de investigar, si no en el hecho de investigar en sí.

Aspectos para mejorar o desarrollar:


- Creo que lo único que le agregaría al módulo, es la integración con algún ente público para generar instancias de intercambio con profesionales del área. Esto enriquecería de primera mano la investigación de un estudiante más allá de lo que encuentre en internet.
- Tal vez el tener una experiencia más "palpable" o cercana con el proceso de elaboración de INV, si bien estamos transitando una época de virtualidad especial. Entiendo que un encuentro de primera mano con los actores que realizan el análisis primario de un ODS en nuestro país, sería muy enriquecedor, para esta temática.
- Quizás un poco más el trabajo en equipo. En mi caso, que realicé ambos módulos, en el año 2020 y en el 2021, en el primero, el trabajo en equipo permitía un intercambio de conocimientos y puntos de vista distintos que ahora, en lo que a mi respecta, no se realizó tanto. Siento que suma un montón ya que hay veces que estamos tan enganchados en el trabajo que no podemos tener una mirada más amplia hacia la investigación, y el estar acompañado de otra persona te permite muchas veces no abrumarte, discutir y llegar a un punto en común mediante un intercambio de ideas que me parece super rico.



Anexo

	METAS	INDICADORES GEOGRÁFICOS	¿SE MIDE EN URUGUAY?
 <p>1. Poner fin a la pobreza en todas sus formas y en todo el mundo</p>	<p>1.1 De aquí a 2030, erradicar para todas las personas y en todo el mundo la pobreza extrema (actualmente se considera que sufren pobreza extrema las personas que viven con menos de 1,25 dólares de los Estados Unidos al día)</p>	<p>1.1.1 Proporción de la población que vive por debajo del umbral internacional de pobreza, desglosada por sexo, edad, situación laboral y ubicación geográfica (urbana o rural)</p>	SI
	<p>1.4 De aquí a 2030, garantizar que todos los hombres y mujeres, en particular los pobres y los vulnerables, tengan los mismos derechos a los recursos económicos y acceso a los servicios básicos, la propiedad y el control de la tierra y otros bienes, la herencia, los recursos naturales, las nuevas tecnologías apropiadas y los servicios financieros, incluida la microfinanciación.</p>	<p>1.4.1 Proporción de la población que vive en hogares con acceso a los servicios básicos</p>	SI
		<p>1.4.2 Proporción del total de la población adulta con derechos seguros de tenencia de la tierra que posee documentación reconocida legalmente al respecto y considera seguros sus derechos, desglosada por sexo y tipo de tenencia</p>	NO
	<p>1.5 De aquí a 2030, fomentar la resiliencia de los pobres y las personas que se encuentran en situaciones de vulnerabilidad y reducir su exposición y vulnerabilidad a los fenómenos extremos relacionados con el clima y otras perturbaciones y desastres económicos, sociales y ambientales</p>	<p>1.5.1 Número de personas muertas, desaparecidas y afectadas directamente atribuido a desastres por cada 100.000 habitantes</p>	SI
 <p>2. Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover agricultura sostenible</p>	<p>2.3 De aquí a 2030, duplicar la productividad agrícola y los ingresos de los productores de alimentos en pequeña escala, en particular las mujeres, los pueblos indígenas, los agricultores familiares, los ganaderos y los pescadores, entre otras cosas mediante un acceso seguro y equitativo a las tierras, a otros recursos e insumos de producción y a los conocimientos, los servicios financieros, los mercados y las oportunidades para añadir valor y obtener empleos no agrícolas</p>	<p>2.3.1 Volumen de producción por unidad de trabajo desglosado por tamaño y tipo de explotación (agropecuaria/ganadera/forestal)</p>	SI



	2.4 De aquí a 2030, asegurar la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos y aplicar prácticas agrícolas resilientes que aumenten la productividad y la producción, contribuyan al mantenimiento de los ecosistemas, fortalezcan la capacidad de adaptación al cambio climático, los fenómenos meteorológicos extremos, las sequías, las inundaciones y otros desastres, y mejoren progresivamente la calidad de la tierra y el suelo	2.4.1 Proporción de la superficie agrícola en que se practica una agricultura productiva y sostenible	SI
 <p>3. Garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades</p>	3.9 De aquí a 2030, reducir considerablemente el número de muertes y enfermedades causadas por productos químicos peligrosos y por la polución y contaminación del aire, el agua y el suelo.	3.9.1 Tasa de mortalidad atribuida a la contaminación de los hogares y del aire ambiente	NO
		3.9.2 Tasa de mortalidad atribuida al agua insalubre, el saneamiento deficiente y la falta de higiene (exposición a servicios insalubres de agua, saneamiento e higiene para todos (WASH))	NO
	3.c Aumentar considerablemente la financiación de la salud y la contratación, el perfeccionamiento, la capacitación y la retención del personal sanitario en los países en desarrollo, especialmente en los países menos adelantados y los pequeños Estados insulares en desarrollo	3.c.1 Densidad y distribución del personal sanitario.	SI
 <p>4. Garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad y promover oportunidades de aprendizaje</p>	4.5 De aquí a 2030, eliminar las disparidades de género en la educación y asegurar el acceso igualitario a todos los niveles de la enseñanza y la formación profesional para las personas vulnerables, incluidas las personas con discapacidad, los pueblos indígenas y los niños en situaciones de vulnerabilidad	4.5.1 Índices de paridad (entre mujeres y hombres, zonas rurales y urbanas, quintiles de riqueza superior e inferior y grupos como los discapacitados, los pueblos indígenas y los afectados por los conflictos, a medida que se disponga de datos) para todos los indicadores educativos de esta lista que puedan desglosarse	SI


<p>permanente para todos</p>	<p>4.a Construir y adecuar instalaciones educativas que tengan en cuenta las necesidades de los niños y las personas con discapacidad y las diferencias de género, y que ofrezcan entornos de aprendizaje seguros, no violentos, inclusivos y eficaces para todos</p>	<p>4.a.1 Proporción de escuelas con acceso a a) electricidad, b) Internet con fines pedagógicos, c) computadoras con fines pedagógicos, d) infraestructura y materiales adaptados a los estudiantes con discapacidad, e) suministro básico de agua potable, f) instalaciones de saneamiento básicas separadas por sexo y g) instalaciones básicas para el lavado de manos (según las definiciones de los indicadores WASH)</p>	<p>SI</p>
 <p>5. Lograr la igualdad de género y empoderar a todas las mujeres y las niñas</p>	<p>5.2 Eliminar todas las formas de violencia contra todas las mujeres y las niñas en los ámbitos público y privado, incluidas la trata y la explotación sexual y otros tipos de explotación</p>	<p>5.2.2 Proporción de mujeres y niñas a partir de 15 años de edad que han sufrido violencia sexual a manos de personas que no eran su pareja en los últimos 12 meses, desglosada por edad y lugar del hecho</p>	<p>SI</p>
	<p>5.4 Reconocer y valorar los cuidados y el trabajo doméstico no remunerados mediante servicios públicos, infraestructuras y políticas de protección social, y promoviendo la responsabilidad compartida en el hogar y la familia, según proceda en cada país.</p>	<p>5.4.1 Proporción de tiempo dedicado al trabajo doméstico y asistencial no remunerado, desglosada por sexo, edad y ubicación</p>	<p>SI</p>
	<p>5.a emprender reformas que otorguen a las mujeres igualdad de derechos a los recursos económicos, así como acceso a la propiedad y al control de la tierra y otros tipos de bienes, los servicios financieros, la herencia y los recursos naturales, de conformidad con las leyes nacionales.</p>	<p>5.a.1 a) Proporción del total de la población agrícola con derechos de propiedad o derechos seguros sobre tierras agrícolas, desglosada por sexo; y b) proporción de mujeres entre los propietarios o los titulares de derechos sobre tierras agrícolas, desglosada por tipo de tenencia.</p>	<p>NO</p>
	<p>5.a.2 Proporción de países cuyo ordenamiento jurídico (incluido el derecho consuetudinario) garantiza la igualdad de derechos de la mujer a la propiedad o el control de las tierras</p>	<p>SI</p>	

 <p>6. Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos</p>	6.1 De aquí a 2030, lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos	6.1.1 Proporción de la población que utiliza servicios de suministro de agua potable gestionados sin riesgos	SI
	6.2 De aquí a 2030, lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos y poner fin a la defecación al aire libre, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y las niñas y las personas en situaciones de vulnerabilidad	6.2.1 Proporción de la población que utiliza servicios de saneamiento gestionados sin riesgos, incluidas instalaciones para el lavado de manos con agua y jabón	SI
	6.3 De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial	6.3.1 Proporción de aguas residuales tratadas de manera adecuada	SI
		6.3.2 Proporción de masas de agua de buena calidad	SI
	6.4 De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua	6.4.1 Cambio en el uso eficiente de los recursos hídricos con el paso del tiempo	SI
		6.4.2 Nivel de estrés hídrico: extracción de agua dulce en proporción a los recursos de agua dulce disponibles	SI
	6.5 De aquí a 2030, implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda	6.5.1 Grado de implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos (0-100)	SI
		6.5.2 Proporción de la superficie de cuencas transfronterizas sujetas a arreglos operacionales para la cooperación en materia de aguas	SI
	6.6 De aquí a 2020, proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos	6.6.1 Cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua con el paso del tiempo	SI

	6.a De aquí a 2030, ampliar la cooperación internacional y el apoyo prestado a los países en desarrollo para la creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento, como los de captación de agua, desalinización, uso eficiente de los recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización	6.a.1 Volumen de la asistencia oficial para el desarrollo destinada al agua y el saneamiento que forma parte de un plan de gastos coordinados por el gobierno	NO
	6.b Apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento	6.b.1 Proporción de dependencias administrativas locales que han establecido políticas y procedimientos operacionales para la participación de las comunidades locales en la gestión del agua y el saneamiento	SI
 <p>7. Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos</p>	7.1 De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos	7.1.1 Proporción de la población que tiene acceso a la electricidad	SI
 <p>9. Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación</p>	9.1 Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo especial hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos	9.1.1 Proporción de la población rural que vive a menos de 2 km de una carretera transitada todo el año	SI
	9.4 De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas	9.4.1 Emisiones de CO2 por unidad de valor añadido	SI

	9.c Aumentar significativamente el acceso a la tecnología de la información y las comunicaciones y esforzarse por proporcionar acceso universal y asequible a Internet en los países menos adelantados de aquí a 2020	9.c.1 Proporción de la población con cobertura de red móvil, desglosada por tecnología	SI
 <p>11. Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles</p>	11.1 De aquí a 2030, asegurar el acceso de todas las personas a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros y asequibles y mejorar los barrios marginales	11.1.1 Proporción de la población urbana que vive en barrios marginales, asentamientos informales o viviendas inadecuadas	SI
	11.2 De aquí a 2030, proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y las personas de edad	11.2.1 Proporción de la población que tiene fácil acceso al transporte público, desglosada por sexo, edad y personas con discapacidad	SI
	11.3 De aquí a 2030, aumentar la urbanización inclusiva y sostenible y la capacidad para la planificación y la gestión participativas, integradas y sostenibles de los asentamientos humanos en todos los países	11.3.1 Relación entre la tasa de consumo de tierras y la tasa de crecimiento de la población	SI
	11.5 De aquí a 2030, reducir significativamente el número de muertes causadas por los desastres, incluidos los relacionados con el agua, y de personas afectadas por ellos, y reducir considerablemente las pérdidas económicas directas provocadas por los desastres en comparación con el producto interno bruto mundial, haciendo especial hincapié en la protección de los pobres y las personas en situaciones de vulnerabilidad	11.5.1 Número de personas muertas, desaparecidas y afectadas directamente atribuido a desastres por cada 100.000 personas	SI
		11.5.2 Pérdidas económicas directas en relación con el PIB mundial, daños en la infraestructura esencial y número de interrupciones de los servicios básicos atribuidos a desastres	SI
	11.6 De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo	11.6.2 Niveles medios anuales de partículas finas en suspensión (por ejemplo, PM2.5 y PM10) en las ciudades (ponderados según la población)	SI
	11.7 De aquí a 2030, proporcionar acceso universal a zonas verdes y espacios públicos seguros, inclusivos y accesibles, en particular para las mujeres y los niños, las personas de edad y las personas con discapacidad	11.7.1 Proporción media de la superficie edificada de las ciudades que se dedica a espacios abiertos para uso público de todos, desglosada por sexo, edad y personas con discapacidad	SI

		11.7.2 Proporción de personas que han sido víctimas de acoso físico o sexual en los últimos 12 meses, desglosada por sexo, edad, grado de discapacidad y lugar del hecho	SI
	11.a Apoyar los vínculos económicos, sociales y ambientales positivos entre las zonas urbanas, periurbanas y rurales fortaleciendo la planificación del desarrollo nacional y regional	11.a.1 Proporción de la población residente en ciudades que aplican planes de desarrollo urbano y regional que tienen en cuenta las previsiones demográficas y las necesidades de recursos, desglosada por tamaño de ciudad	SI
 <p>13. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos</p>	13.1 Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países	13.1.1 Número de personas muertas, desaparecidas y afectadas directamente atribuido a desastres por cada 100.000 personas	SI
 <p>14. Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible</p>	14.1 De aquí a 2025, prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, en particular la producida por actividades realizadas en tierra, incluidos los detritos marinos y la polución por nutrientes	14.1.1 Índice de eutrofización costera y densidad de detritos plásticos flotantes	NO
	14.2 De aquí a 2020, gestionar y proteger sosteniblemente los ecosistemas marinos y costeros para evitar efectos adversos importantes, incluso fortaleciendo su resiliencia, y adoptar medidas para restaurarlos a fin de restablecer la salud y la productividad de los océanos	14.2.1 Proporción de zonas económicas exclusivas nacionales gestionadas mediante enfoques basados en los ecosistemas	NO
	14.5 De aquí a 2020, conservar al menos el 10% de las zonas costeras y marinas, de conformidad con las leyes nacionales y el derecho internacional y sobre la base de la mejor información científica disponible	14.5.1 Cobertura de las zonas protegidas en relación con las zonas marinas	SI

 <p>15. Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad</p>	15.1 De aquí a 2020, asegurar la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce y sus servicios, en particular los bosques, los humedales, las montañas y las zonas áridas, en consonancia con las obligaciones contraídas en virtud de acuerdos internacionales	15.1.1 Superficie forestal en proporción a la superficie total	SI
		15.1.2 Proporción de lugares importantes para la biodiversidad terrestre y del agua dulce incluidos en zonas protegidas, desglosada por tipo de ecosistema	SI
	15.3 De aquí a 2030, luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con efecto neutro en la degradación de las tierras	15.3.1 Proporción de tierras degradadas en comparación con la superficie total	SI
	15.4 De aquí a 2030, asegurar la conservación de los ecosistemas montañosos, incluida su diversidad biológica, a fin de mejorar su capacidad de proporcionar beneficios esenciales para el desarrollo sostenible	15.4.1 Lugares importantes para la biodiversidad de las montañas incluidos en zonas protegidas	NO
		15.4.2 Índice de cobertura verde de las montañas	NO

Referencias bibliográficas

- Centro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible Para América Latina (2020). *Primer webinar del Codspace, sobre metodologías SIG para estudios de sostenibilidad urbana*. Recuperado de: <https://cods.uniandes.edu.co/codspace-webinar-metologias/>.
- Educo (2021,12,7) *blog: Qué son los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Agenda 2030*. Recuperado de: <https://www.educo.org/Blog/Agenda-2030-y-Objetivos-Desarrollo-Sostenible>.
- Estado Uruguayo (7 de diciembre de 2021) *ODS Uruguay*. Recuperado de: <https://ods.gub.uy>
- Estado Uruguayo (7 de diciembre de 2021) *Informe Nacional Voluntario 2021*. Recuperado de: https://ods.gub.uy/images/2021/Informe_Nacional_Voluntario_Uruguay_2021.pdf
- Facultad de Ingeniería (7 de diciembre de 2021). *Tecnólogo en Cartografía*. Recuperado de: <https://www.fing.edu.uy/carrera/grado/tecnologo-en-cartografia>
- Facultad de Ingeniería (2021). *Ingeniería demuestra*. Recuperado de: <https://www.fing.edu.uy/es/node/43735>
- Gobierno de España (2018) *Informe: Información geográfica, teledetección y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado de: https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Copernicus_User_Uptake/1_IG-teledeteccion_ODS.pdf
- Instituto de Agrimensura (7 de diciembre de 2021). *Módulo de investigación*. Recuperado de: <https://eva.fing.edu.uy/course/view.php?id=1511§ion=7#tabs-tree-start>

- Lorenzo, C. (2020). Medición de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en la Unión Europea a través de indicadores compuestos. *Documentos de trabajo (Fundación Carolina): Segunda época*, (2), 1. Recuperado de: DT_FC_Especial2.pdf (fundacioncarolina.es)
- McCullum, A.; Alejandro, S.; Zvoleff, A.; Mediodía, M.; González-Roglich, M.; Ovalles, P.; Mwaniki, D. (2019). *Teledetección para el Monitoreo de los ODS sobre la Degradación de Tierras y Ciudades Sostenibles*. Programa de Entrenamiento de Teledetección Aplicada de la NASA (ARSET). Recuperado de: <https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/spanish/arset-teledeteccion-para-el-monitoreo-de-los-ods-sobre-la-degradacion>
- Naciones Unidas, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, División de Estadística (2021/12/7) *Indicadores Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado de: <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/database/>
- https://unstats.un.org/sdgs/indicators/Global%20Indicator%20Framework_A.RES.71.313%20Annex.Spanish.pdf
- Organización Pacto Mundial, Red Española (2021/12/7) *Empresas y organizaciones ante el ODS 2*. Recuperado de: <https://www.pactomundial.org/2019/09/el-sector-privado-ante-el-ods-2/>
- SDG Compass / Brújula de los ODS. (2015) *La guía para la acción empresarial en los ODS*. Recuperado de: https://sdgcompass.org/wp-content/uploads/2016/06/SDG_Compass_Spanish-one-pager-view.pdf
- Universidad de la República (2021) *Agrimensura*. Recuperado de: <https://udelar.edu.uy/portal/2020/02/agrimensura/>
- Universidad de la República. Comisión Sectorial de Enseñanza. Unidad Académica (2014). *Ordenanza de estudios de grado y otros programas de formación terciaria: normativa y pautas institucionales relacionadas*. Recuperada de: https://www.cse.udelar.edu.uy/wp-content/uploads/2013/12/documento_ordenanza_de_grado_corregida_paginas_simples.pdf

ANALISIS DE LAS REDISTRIBUCIONES DE MASA HIDRICA EN EL TERRITORIO SUDAMERICANO MEDIANTE DATOS SATELITALES GRAVIMETRICOS

Ayelen Pereira^{1,2}; Cecilia Cornero¹; Ma. Cristina Pacino^{1,2}

¹ Área de Geodinámica y Geofísica - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina

² CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina)

apereira@fceia.unr.edu.ar

Resumen

Las regiones fluviales desarrollan funciones indispensables para el medio ambiente, y resulta necesario realizar un estudio de éstas para contribuir a su mejor uso y manejo.

En Sudamérica se ubican la Cuenca del Plata y la Cuenca del Amazonas -de las más importantes del mundo en cuanto a su extensión geográfica y el caudal de sus ríos-, y la segunda reserva de agua subterránea mundial –el Acuífero Guaraní-. Asimismo, la región de Hielos continentales de Argentina y Chile, localizada en la Patagonia, es el tercer campo de hielo más grande en el mundo.

Las misiones gravimétricas satelitales GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*, 2002 a 2017) y GRACE-FO (*Follow On*, desde 2018) proveen las variaciones temporales del campo gravitatorio terrestre, las que son debidas principalmente a procesos de transporte de masas, como los cambios en el almacenamiento de agua continental. A partir de ellas, es posible analizar desde el 2002 los procesos hidrológicos en grandes cuencas hidrográficas y su influencia en la variabilidad climática, geodinámica y socio-económica, complementando las observaciones *in situ* y el modelado hidrológico. De esta manera, se dispone además de una gran base de datos, la que debe ser procesada para alcanzar resultados que reflejen las variaciones del almacenamiento de agua continental.

El objetivo de este trabajo es mostrar las potencialidades que brindan las geotecnologías aplicadas al estudio del almacenamiento total de agua obtenido a partir de los datos de la misión satelital GRACE en diversas áreas de Sudamérica, con el fin de identificar patrones de variación temporal del agua continental a escalas regionales.

Estos resultados son analizados y complementados con información de datos terrestres, modelos globales y otras misiones satelitales; para luego ser vinculados con episodios de La Niña y El Niño ocurridos en la región.

Palabras clave: Sudamérica, GRACE, agua continental, gravimetría satelital, cuencas hídricas

Introducción

El conocimiento de las variaciones temporales de masa de un glaciar, así como el estudio de las variaciones de las diferentes componentes de masa hídrica en una cuenca, representa un recurso fundamental tanto para el desarrollo socioeconómico como para el funcionamiento y manutención de los ecosistemas asociados, lo cual exige un gran desafío en cuanto a la investigación científica sobre la complejidad intrínseca de los sistemas, la integración de la información, y los impactos del cambio climático y la interrelación con los otros componentes del ciclo hidrológico.

En los últimos años, los datos provenientes de sensores remotos (tales como el nivel de agua superficial a partir de altimetría satelital y el almacenamiento de agua total a partir de misiones gravimétricas espaciales), han demostrado ser muy útiles para el estudio del balance de agua a escalas de cuencas y subcuencas (Xavier et al., 2010).

Las variaciones temporales del campo gravitatorio proveen información acerca de la redistribución de diversas formas del agua superficial (Wahr et al., 1998).

Las variaciones temporales de masa se deben principalmente a cambios en el contenido de agua debido a la circulación en la atmósfera, los océanos, los continentes, los glaciares y las capas de hielos polares.

Estas fluctuaciones de masa a corto plazo contribuyen a lo que se conoce como el campo de gravedad variable en el tiempo. El estudio de las variaciones de la gravedad en el tiempo tiene su aplicación en el campo de la glaciología, vulcanología, hidrología, estudios de sequías y otros.

La evolución de las misiones gravimétricas satelitales en los últimos años produjo un nuevo concepto en el modelado del campo gravitacional permitiendo la obtención de modelos globales precisos y con una gran resolución de la componente estática y la dependiente del tiempo del campo de gravedad terrestre.

Las misiones gravimétricas satelitales GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*), -y su sucesora, GRACE-FO (*Follow On*)-, son capaces de monitorear cambios en el espesor equivalente de agua continental con una elevada precisión; es así que, a partir de ellas, es posible mapear cambios en el almacenamiento de agua con una resolución espacial de cuadrículas de 300-400 km ($\sim 150.000 \text{ km}^2$) (Landerer and Swenson, 2012).

Esta columna vertical de agua se denomina TWS (*Total Water Storage*), y es también conocida como almacenamiento total de agua. GRACE observa el cambio de gravedad temporal de todas las fuentes de transporte de masas, siendo el TWS una sumatoria entre el agua superficial, la humedad del suelo y el agua subterránea. El TWS representa un valioso indicador de los cambios que ocurren en las condiciones hidrológicas a escala global y a mayores escalas, como cuencas y subcuencas (Frappart et al., 2013).

Metodología

Las variaciones mensuales de gravedad observadas son causadas por cambios mensuales de masas; y a su vez, las variaciones de masas pueden pensarse como concentradas en una capa muy delgada de agua en la superficie, cuyo espesor cambia. En efecto, la mayoría de los cambios mensuales de la gravedad son causados por cambios en el almacenamiento de agua en reservorios hidrológicos, por el movimiento de masa en los océanos, la atmósfera y la criósfera; y por intercambios entre éstos.

Las variaciones de almacenamiento de agua continental (TWS) utilizadas en este trabajo se estimaron a partir de las soluciones de alta resolución de la misión GRACE (*Mascons*). El enfoque de obtención de estas soluciones se basa en la estimación de anomalías de masas de agua en grillas o en concentraciones de masas específicas. En este estudio, se utilizaron los datos GRACE CSR RL05 (Save et al., 2016), los que proveen variaciones mensuales del TWS con una resolución espacial de 1° .

Los datos de precipitación utilizados para validar los resultados de TWS de GRACE se obtuvieron a partir de la misión satelital TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*). En particular, se trabajó con el producto TRMM-3B43-v7, el cual consiste en una combinación de observaciones satelitales mensuales de lluvia con una resolución espacial de 0,25° (TRMM, 2011).

Los mapas fueron elaborados con el software GMT (*Generic Mapping Tools*) de código abierto, que permite elaborar cartografía temática mediante “*scripts*” de manera de realizar los procesos cartográficos en una sola aplicación (Wessel et al., 2013).

Resultados y discusión

1. Tendencia y Amplitud de la gravedad en Sudamérica

Este trabajo se inicia con un análisis a nivel regional para el territorio de América del Sur a los fines de detectar las regiones que han experimentado las mayores tendencias de anomalía de gravedad derivadas de GRACE, las cuales se pueden asociar a variaciones en el almacenamiento de agua y cambios de masas en general.

En la Figura 1 se muestran los mapas de la tendencia y amplitud de la gravedad para la región de Sudamérica realizada con datos GRACE (coeficientes armónicos esféricos del centro CSR). En el mapa de tendencia puede observarse, a nivel general, dos regiones que han experimentado los mayores cambios (negativos) en el período 2002-2017, la zona Centro-Oeste de Argentina, y la Región patagónica.

En cuanto a la amplitud de la gravedad, se puede percibir que la variación más significativa ocurre en la región correspondiente a la cuenca del Amazonas, y en menor medida, en la del Orinoco hacia el norte.

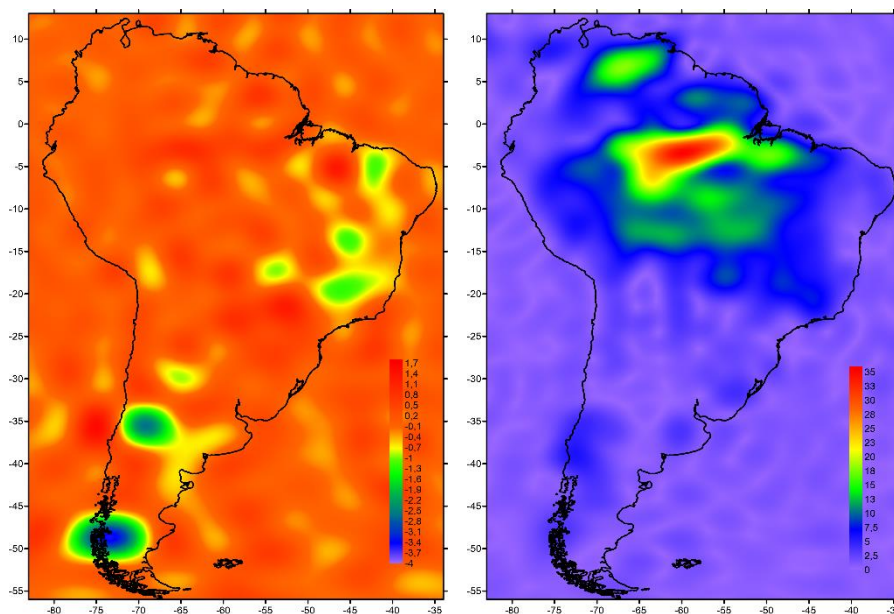


Figura 1. Tendencia (izquierda) y Amplitud (derecha) de la gravedad en $\mu\text{Gal}/\text{año}$ para Sudamérica, período 2002-2017.

El ciclo anual del balance de agua en la cuenca del Amazonas es muy significativo. El caudal sobre el río Amazonas presenta un máximo en mayo-junio, aproximadamente tres meses después del pico de precipitación promedio en la cuenca (en febrero). La cuenca presenta una variabilidad interanual de gran magnitud y el régimen hidrológico exhibe diferencias en el norte y sur de la cuenca, fundamentalmente por la precipitación. El análisis de la precipitación en las últimas décadas muestra claramente fluctuaciones asociadas con los eventos de El Niño y la Niña (Xavier et al., 2010).

En el centro-oeste de Argentina, la tendencia negativa de la gravedad puede relacionarse con la actividad sísmica: principalmente el sismo de Maule ocurrido el 27 de febrero de 2010. De acuerdo con Han et al. (2010), dicho sismo perturbó el movimiento orbital del satélite GRACE a un nivel tal que pudo detectarse. El modelado de estas anomalías muestra que la dimensión y magnitud de las anomalías negativas fueron similares o menores a las variaciones estacionales de masa hídrica dentro de las grandes cuencas de Sudamérica (Han et al., 2010).

La redistribución de masa de referencia también podría estar asociada con la actividad volcánica de la región de Laguna del Maule, que se extiende en territorio chileno y argentino (sur de Mendoza, norte de Neuquén), la que está produciendo desde 2007 un levantamiento de la región a una velocidad de al menos 25 cm/año (Singer et al., 2014).

Con respecto a la región de los Hielos Patagónicos, hay una tendencia negativa de las anomalías de la gravedad debida principalmente la redistribución de agua, hielo y nieve causadas por el rebote postglacial y el cambio climático que está generando la pérdida de masa de hielo de los glaciares.

Debido a la gran diversidad de características morfológicas y la variabilidad climática de todo el territorio sudamericano, se presentan regiones de muy variado comportamiento, y además, los ciclos hidrológicos de las grandes cuencas y subcuencas son muy complejos como para abordarlo en su conjunto. En este sentido, se aborda a continuación, un estudio específico de los cambios en el almacenamiento de agua en la Cuenca del Plata y la Cuenca del Amazonas, por un lado, y en la región de Hielos Continentales, por el otro.

2. Análisis en cuencas hídricas de Sudamérica

La Cuenca del Amazonas es la cuenca fluvial con mayor diversidad biológica del mundo, cubriendo más de 6.118.000 km² (Figura 2). Contiene el mayor sistema de agua dulce del planeta, descargando entre un 15 a un 20% del agua dulce líquida del mundo en el Océano Atlántico, por lo cual, cumple un rol esencial en los ciclos globales del agua y el carbono, que la convierte en un importante regulador natural del clima mundial. Esta cuenca está conformada por su río principal, el Amazonas (el más caudaloso del mundo), y más de mil afluentes, atravesando a lo largo de 6.750 km los territorios de los países de Perú, Bolivia, Ecuador, Colombia, Venezuela y Brasil (Organización del Tratado de Cooperación Amazónica, OTCA).

La Cuenca del Plata es una de las más importantes del mundo por su extensión geográfica y por el caudal de sus ríos. Se trata de un territorio compartido por cinco países: sus 3.100.000 km² ocupan la quinta parte de Sudamérica, abarcando territorios de Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay (Figura 2).

La hidrografía de esta cuenca está formada por tres grandes sistemas hídricos: el Paraná, el Paraguay y el Uruguay, además del Río de la Plata propiamente dicho al que vierten sus aguas algunos ríos menores. El Paraguay es afluente del Paraná, mientras que éste se une con el Uruguay para formar el Río de la Plata. Las áreas de drenaje de cada uno de ellos conforman las principales subcuencas del sistema (Comisión Mixta del Río Paraná, COMIP).

A partir del análisis estadístico de los datos de TWS y de los mapas mensuales de variación del almacenamiento de agua continental, se obtuvieron los períodos con los valores extremos de la variación del TWS para el período enero 2002 a junio 2017, en las dos cuencas más importantes de Sudamérica (Amazonas y del Plata). El aumento y disminución progresiva para cada cuenca se presenta en las figuras 3 a 5.



Figura 2. Localización de las Cuencas del Plata y Amazonas.

El conocimiento de las variaciones temporales y la dinámica de las mismas en regiones como una cuenca hidrológica, constituye una herramienta esencial para los modelos de evaluación ambiental y de cambio global. Los eventos climáticos extremos en general presentan mayor ocurrencia en los años de El Niño y La Niña. Mientras que la mayoría de las variaciones en la humedad del suelo pueden relacionarse con un único episodio natural de desastre, los cambios en el almacenamiento total de agua se corresponden principalmente con sequías e inundaciones espacialmente extensas y de larga duración.

Con el fin de analizar la influencia de los fenómenos de El Niño/La Niña en la región, se compararon luego las variaciones significativas del almacenamiento de agua detectadas en la zona de estudio con la serie de anomalías de la temperatura de la superficie del mar (SST 3.4), obtenidas del Centro de Predicción Climático de NOAA (Figura 6).

El período 2/2009- 05/2009 fue el que presentó las máximas variaciones positivas del TWS en la Cuenca del Amazonas (Figura 3), mientras que las mínimas ocurrieron en 2010 (Figura 4). Episodios intensos de El Niño y La Niña estuvieron vinculados con los extremos hallados, considerando la Figura 6.

De acuerdo a los resultados, GRACE detectó en la Cuenca del Plata las inundaciones ocurridas en el 2016 (Figura 5) y también la intensa sequía (Figura 3), que tuvo su pico máximo en otoño de 2009 (en base a datos del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina). Estos acontecimientos extremos, están conectados con eventos ENSO, como El Niño y La Niña (Figura 6).

En los mapas de TWS de la Figura 3, se pueden apreciar además los dos regímenes bien diferenciados en un mismo período, entre la región norte y sur en Sudamérica.

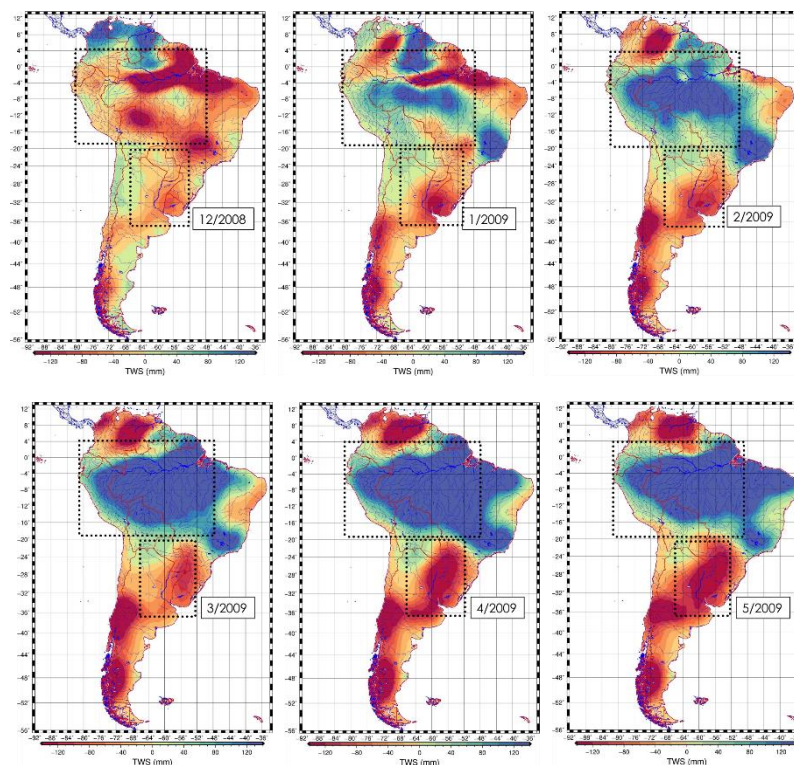


Figura 3. Aumento y disminución progresiva del almacenamiento de agua TWS en la Cuenca del Amazonas (recuadro superior, 2/2009 a 5/2009) y en la Cuenca del Plata (recuadro inferior, 12/2008 a 5/2009) respectivamente, vinculado con un episodio de La Niña.

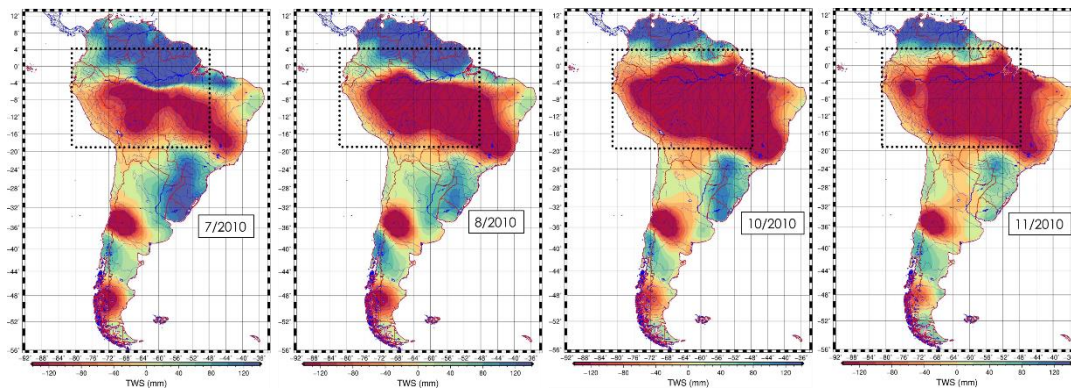


Figura 4. Disminución progresiva del almacenamiento de agua TWS en la Cuenca del Amazonas (7/2010 a 11/2010), vinculada con un episodio de El Niño.

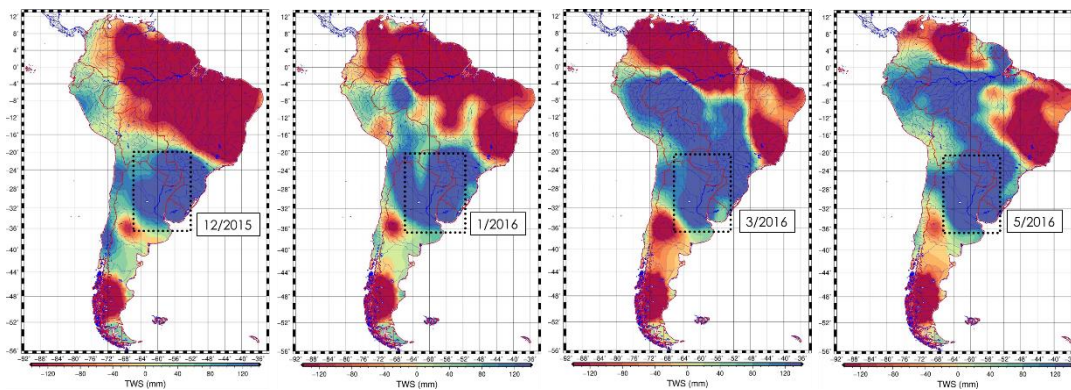


Figura 5. Aumento progresivo del almacenamiento de agua TWS en la Cuenca del Plata (12/2015 a 5/2016), vinculado con un episodio de El Niño.

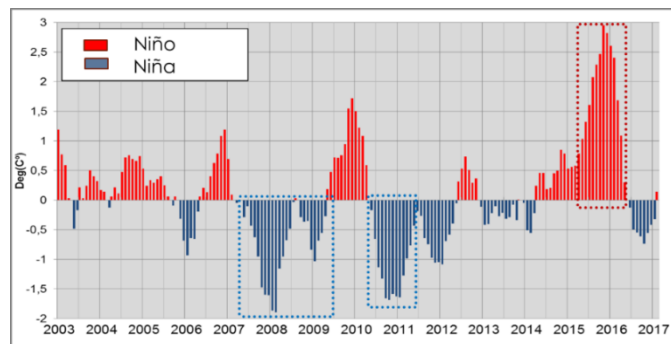


Figura 6. Eventos ENSO en el período 2002-2017. Se destacan los episodios más intensos en cuanto a duración y/o magnitud.

Finalmente, se compararon las series temporales de almacenamiento de agua de GRACE y precipitación de TRMM para ambos sistemas hídricos, que evidencian por un lado los eventos ENSO antes mencionados, y por el otro, que las estimaciones del TWS resultaron consistentes con los datos satelitales de precipitación (Figura 7). Asimismo, se percibe un desfase entre ambas señales de 1 a 3 meses para las dos cuencas. También puede notarse la diferencia entre los regímenes hidrológicos de las cuencas, siendo en la del Amazonas periódico, mientras que en la del Plata éste es mas irregular.

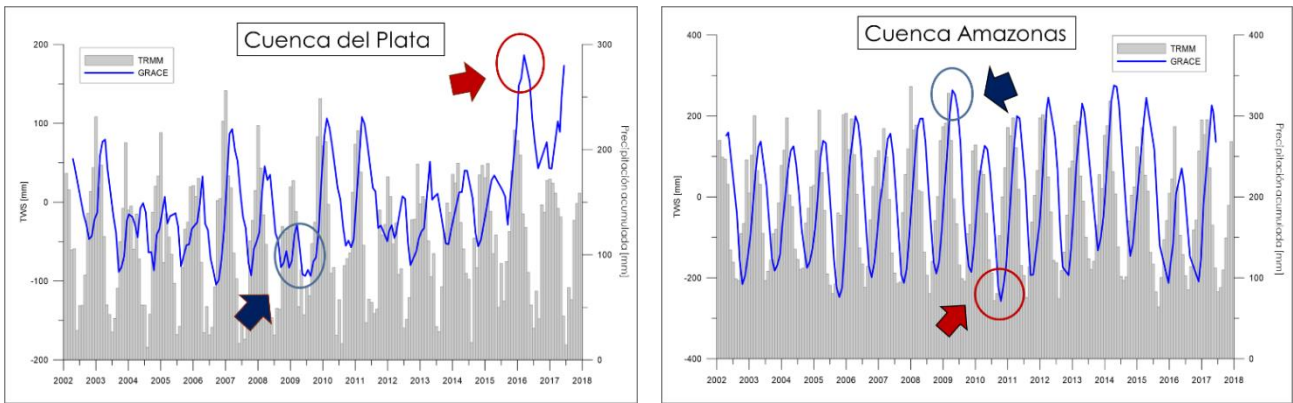


Figura 7. Almacenamiento total de agua vs. precipitación acumulada en la Cuenca del Plata (izquierda) y en la Cuenca del Amazonas (derecha). Las flechas indican los períodos de mayor/menor TWS y Niño (rojo)/Niña (azul) para cada cuenca respectivamente.

3. Análisis en la región de Hielos Continentales

La región de Hielos continentales de Argentina y Chile es el tercer campo de hielo más grande del mundo, y está conformado El campo de Hielo Patagónico Norte y el Sur (Figura 2).

El campo de Hielo Patagónico Norte (HPN) constituye una masa de hielo ubicada enteramente en Chile, y cubre un área de 4.200 km². El campo de Hielo Patagónico Sur (HPS), conforma una gran extensión de hielos continentales situada en la frontera entre Argentina y Chile. De este campo de hielo se desprenden numerosos glaciares de grandes dimensiones, entre los cuales se destacan los glaciares Jorge Montt, Pío XI (el de mayor extensión de Sudamérica), Grey, Upsala, Viedma y Perito Moreno. Se estima que el HPS está compuesto por 48 glaciares principales y más de 100 glaciares menores, cubriendo un área de 13.000 km².

Las variaciones de masa detectadas en esta zona se relacionan principalmente con el impacto del cambio climático que está generando una gran pérdida de masa en la mayoría de los glaciares patagónicos.

Con el objetivo de realizar un estudio multitemporal de la masa de agua en áreas glaciarias de la Patagonia, se analizaron las grillas de masa de GRACE, las que luego se compararon con registros de altura hidrométrica en lagos de la región mediante información terrestre provista por el SNIH (Servicio Nacional de Información Hídrica de Argentina).

De acuerdo a los resultados de TWS obtenidos para la región de Hielos Continentales de la Figura 9, se puede percibir una pronunciada tendencia negativa en el almacenamiento total de agua en dicha área para el período 2002-2017.

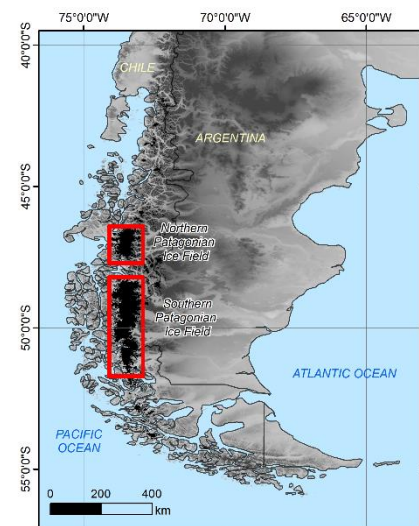


Figura 8. Localización de los Campos de Hielo Patagónicos Norte y Sur

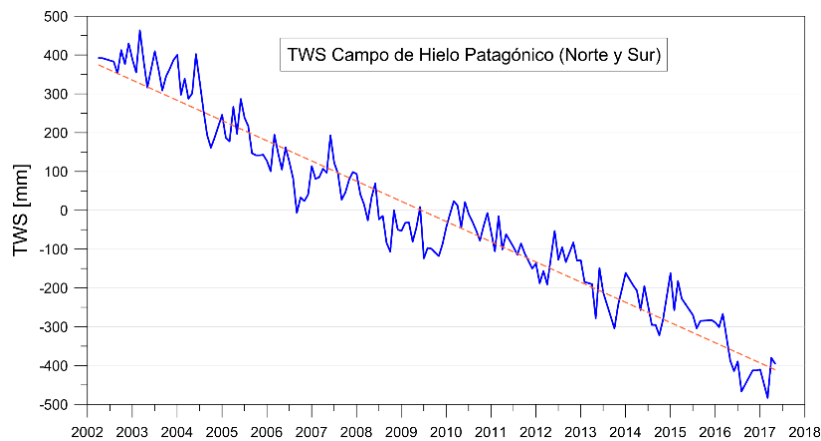


Figura 9. Almacenamiento total de agua continental (TWS de GRACE) en la región del Campo de Hielo Patagónico Norte y Sur, 2002 a 2017. La tendencia es de -52 mm por año.

Respecto de la comparación entre el TWS y la altura hidrométrica en diversos lagos de la región, la señal de GRACE indicó una tendencia negativa del TWS en el tiempo para todas las estaciones analizadas, mientras que la altura hidrométrica registró un comportamiento periódico. En la Figura 10 se muestra un ejemplo para el lago Argentino (localizado en el HPS). Es por ello que se obtuvieron valores pequeños de correlación entre las señales (menores al 50%), los que resultaron aún inferiores para las estaciones ubicadas hacia el sur. La mayor influencia de las grandes masas de hielo cercanas a los lagos en la región del HPS, es la causa probable de este resultado.

Por lo tanto, es posible estimar que la disminución del almacenamiento de agua hallado en la región no esté relacionada directamente con una variación de los espacios lacustres, y que además es necesario otro tipo de información para validar los resultados ofrecidos por GRACE.

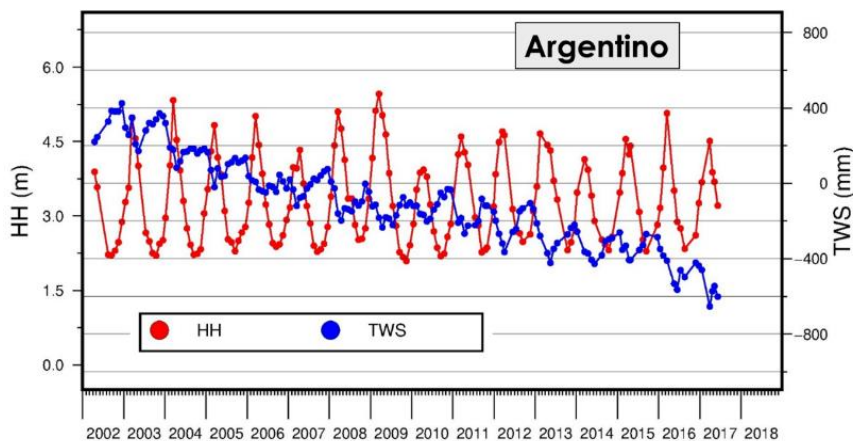


Figura 10. Series temporales de TWS y altura hidrométrica (HH), periodo 2002- 2017, para una estación ubicada en el lago Argentino.

Conclusiones

La implementación de nuevas tecnologías (gravimetría satelital, modelos satelitales globales de precipitación, aplicaciones informáticas) permitió obtener información de gran relevancia para el estudio del agua continental en cuencas extensas de Sudamérica.

Los mapas de variación del agua almacenada constituyen un producto único para la evaluación de reservorios superficiales de almacenamiento de agua subsuperficial y subterránea, y especialmente en regiones extensas y donde la escasez de datos es importante. Esta información

resulta esencial para analizar los cambios que afectan el ciclo hidrológico de importantes ríos con grandes áreas de inundación, y ayudan a su vez a una mejor comprensión de la compleja dinámica del agua superficial en grandes cuencas hidrológicas.

En los mapas de tendencia y amplitud de la gravedad para la región de Sudamérica, GRACE detectó importantes variaciones de masas en el periodo 2002-2017 en tres zonas: Centro-Oeste de Argentina, Cuenca del Amazonas y Región Patagónica, más específicamente en una región caracterizada por la existencia de una gran extensión de hielo continental. Las variaciones en las dos últimas áreas estuvieron vinculadas principalmente con cambios significativos en el almacenamiento de agua.

En el análisis de la Cuenca del Plata y del Amazonas, las estimaciones de TWS provenientes de la misión GRACE resultaron consistentes con los datos satelitales de precipitación TRMM. Además, en el periodo analizado, dicha misión satelital gravimétrica detectó significativos aumentos y disminuciones de la masa de agua continental en las mencionadas cuencas hídricas, cuyos ciclos hidrológicos parecen estar influenciados por variaciones estacionales que están a su vez fuertemente asociadas a los eventos climatológicos de El Niño y La Niña. Comparando cualitativamente los eventos extremos detectados por GRACE con dichos fenómenos, se puede concluir que las observaciones de GRACE son consistentes con los eventos ENSO.

Finalmente, en cuanto al análisis en la región de Hielos Continentales, la señal de GRACE indicó una importante tendencia negativa del espesor equivalente de agua en el tiempo, coincidente con una retrocesión de los glaciares en dicho sector. Por otro lado, la altura hidrométrica no registró decrecimiento de la señal en el estudio en lagos en el área, por lo que las mediciones de GRACE pueden estar afectadas por las proximidades de otras zonas con características hidrológicas diferentes.

Referencias bibliográficas

- Frappart F., Seoane L. and Ramillien G. (2013). Validation of GRACE-derived terrestrial water storage from a regional approach over South America. *Remote Sensing of Environment*, 137, 69–83. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2013.06.008>.
- Han, S. C., Sauber, J., & Luthcke, S. (2010). Regional gravity decrease after the 2010 Maule (Chile) earthquake indicates large-scale mass redistribution. *Geophysical Research Letters*, 37(23), 1–5. <http://doi.org/10.1029/2010GL045449>
- Landerer, F. W. y Swenson, S. C. (2012). Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates, *Water Resources Research*, VOL. 48, W04531, doi:10.1029/2011WR011453
- Save H., Bettadpur S., and Tapley B. D., (2016). High resolution CSR GRACE RL05 mascons, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 7547–7569, doi: 10.1002/2016JB013007.
- Singer, B. S., Andersen, N. L., Le Mevel, H., Feigl, K. L., DeMets, C., Tikoff, B., Thurber C. H., Jicha B. R., Cardona C., Córdova L., Gil F., Unsworth M. J., Williams-Jones G., Miller C., Fierstein J., Hildreth W., Vazquez, J. (2014). Dynamics of a large, restless, rhyolitic magma system at Laguna del Maule, southern Andes, Chile. *GSA Today*, 24(12), 4–10. <http://doi.org/10.1130/GSATG216A.1>.
- Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (2011), TRMM (TMPA/3B43) Rainfall Estimate L3 1 month 0.25 degree x 0.25 degree V7, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), [10.5067/TRMM/TMPA/MONTH/7](http://doi.org/10.5067/TRMM/TMPA/MONTH/7).
- Wahr J., Molenaar M. & Bryan F. (1998). Time-Variability of the Earth's Gravity Field: Hydrological and Oceanic Effects and their possible detection using GRACE. *Journal of Geophysical Research*, 103, 30205-30230.
- Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. F. Luis, and F. Wobbe (2013), [Generic Mapping Tools: Improved version released](http://doi.org/10.1029/2013GL057941), *EOS Trans. AGU*, 94, 409-410, 2013.

Xavier L., Becker M., Cazenave, Longuevergne L., Llovel W. and Rotunno Filho O.C. (2010). "Interannual Variability in Water Storage over 2003–2008 in the Amazon Basin from GRACE Space Gravimetry, in Situ River Level and Precipitation Data." *Remote Sensing of Environment* 114 (8) (August 16): 1629-1637. doi:10.1016/j.rse.2010.02.005. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425710000647>.

APLICACIÓN DE POLARIMETRÍA SAR PARA LA DETERMINACIÓN DE ÁREAS INUNDADAS

Silvio Graciani¹; Marco Brogioni²; Marcelo Corti¹

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

² CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), Istituto di Fisica Applicata, Sesto Fiorentino, Italia.

sgraciani@fich.unl.edu.ar

Resumen

El principal objetivo de esta investigación es determinar la superficie inundada en áreas de llanura durante un evento climático extremo, a través de la aplicación de la técnica de polarimetría (PoSAR) sobre imágenes satelitales Radar de Abertura Sintética (SAR). El caso de estudio es un sector de la cuenca superior del Arroyo Cululú, localizada en el Departamento Castellanos en la Provincia de Santa Fe - Argentina (31° 10' de latitud Sur y 61° 50' de longitud Oeste). Para tal fin se aplicó la técnica PoSAR sobre imágenes del satélite Sentinel 1B, banda C y polarización dual (VV-VH). Para su validación, se utilizaron los indicadores derivados de la aplicación de la matriz de error, obteniéndose un índice de fiabilidad global del 73,2% para el algoritmo de clasificación polarimétrica no supervisada denominado H-Alpha Wishart (SNAP 8.0, 2020). El mismo presenta como principales ventajas: simplicidad y rapidez, la explotación de los conjuntos de datos de observación de la tierra (Big Data EO), la fácil selección de umbrales y la capacidad para delimitar tanto las áreas rurales inundadas con agua "libre", es decir, sin obstrucciones que presentan retrodispersión especular; como las cubiertas por ciertos cultivos (tal el caso del maíz), que poseen retrodispersión de doble rebote.

Palabras claves: *PoSAR, entropía y ángulo Alfa (H/Alfa), retrodispersión doble rebote.*

Introducción

El incremento de los eventos climáticos extremos ha demostrado una demanda de mapas de inundaciones casi en tiempo real derivados de datos de Teledetección. La cartografía de tales eventos es vital para respaldar las decisiones de rescate y para facilitar la evaluación rápida de pérdidas y daños a la propiedad privada. Si bien los modelos numéricos hidrológicos, tal como el HEC-HMS (David Ford *et al.*, 2002) [1], están diseñados para proporcionar tal información, generalmente carecen de una adecuada resolución espacial y temporal. Sin embargo, la capacidad de los sensores SAR para penetrar la capa de nubes, con las mejoras en la resolución espacial y temporal de los conjuntos de datos de observación de la tierra (Big Data EO) disponibles gratuitamente, demuestran el papel clave que el SAR tiene en el control y la gestión de inundaciones.

Las proyecciones de cambio climático prevén un número creciente de dichos eventos climáticos extremos con ocurrencia de precipitaciones intensas que consecuentemente producirán inundaciones. Por lo tanto, y en coincidencia con el objetivo número 13 “Acción por el clima” de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) planteados por la Organización de las Naciones Unidas, un mapeo preciso y rápido de estos fenómenos es un componente clave de los planes de gestión de emergencias y reducción del riesgo de desastres. Los Big Data EO, como los adquiridos por el programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), brindan oportunidades sin precedentes para detectar cambios y evaluar impactos en caso de desastres.

Tanto los sensores ópticos como los de microondas pasivos y activos se pueden utilizar para el mapeo de inundaciones, ofreciendo diferentes niveles de capacidad, precisión y detalle en la definición de la información. A partir de los índices de agua (NDWI, MNDWI, etc.) los datos ópticos se pueden emplear para extraer la superficie del agua de manera directa y confiable. A medida que se acumulan datos satelitales a largo plazo y con adecuadas resoluciones temporal, espectral y espacial, los métodos ópticos de teledetección están contribuyendo de manera significativa a la delimitación de las superficies de agua a nivel global, regional y local. Sin embargo, la validez de las observaciones ópticas está limitada por la presencia de nubes y las condiciones meteorológicas adversas (lluvia, viento, etc.), que son comunes durante las inundaciones.

Las técnicas de Teledetección por microondas, por otro lado, tienen una excelente penetración a través de la atmósfera y, por lo tanto, pueden proporcionar una medición más eficiente. Los sensores activos de microondas, Radar de Abertura Sintética (SAR), pueden utilizarse para cartografiar la inundación en casi cualquier condición meteorológica con una resolución espacial alta (> 30 m). Además, por ser un sensor activo, el SAR también puede tomar imágenes durante la noche.

Para derivar información de las imágenes de estos sensores activos, se utilizan métodos más complejos que los empleados en las imágenes de los sensores ópticos, y por lo tanto, la existencia de algoritmos totalmente automatizados para procesar las imágenes SAR es hasta hoy en día prácticamente inexistente (X. Shen *et al.*, 2019) [2]. En este trabajo se evalúa la aplicación de la técnica de polarimetría (PolSAR), con objeto de mapear inundaciones a partir del uso de imágenes SAR. Además, se priorizó el empleo de datos SAR de descarga libre, tal el caso del SENTINEL 1 de la Agencia Espacial Europea (ESA).

En la actualidad, la automatización y robustez para el mapeo de inundaciones en superficies abiertas, no obstruidas o cubiertas por vegetación, se ha logrado con una precisión aceptable a partir del uso de los datos de observación de la Tierra. Sin embargo, aún no son satisfactorios para la detección de superficies inundadas debajo de la vegetación empleando datos SAR en diferentes bandas (X, L, etc.) y/o polarizaciones (simple, dual o cuádruple).

Objetivos

1. Objetivo General

El objetivo general de esta investigación es determinar la superficie inundada en áreas de llanura durante un evento climático extremo, a través de la aplicación de la técnica de polarimetría (PolSAR) sobre imágenes satelitales Radar de Abertura Sintética (SAR), banda C polarización dual. El área de estudio es un sector de la cuenca superior del Arroyo Cululú en la Provincia de Santa Fe - Argentina.

2. Objetivos Específicos

- Determinar lotes rurales inundados con cobertura vegetal agrícola, en los cuales el agua no sobrepasa el dosel vegetal.

- Evaluar la técnica polarimétrica (PoSAR) para cartografiar inundaciones en áreas de llanura.
- Ejecutar mapas temáticos de inundación que permitan interpretar su estado de situación.

Área de estudio

1. Ubicación

El área de estudio está ubicada en el centro-oeste de la provincia de Santa Fe - Rep. Argentina, en el departamento Castellanos (Figura 1), se localiza en la parte alta de la cuenca del Arroyo Cululú presentando un relieve plano con numerosos bajos en forma de cubetas. La misma integra la región agrícola-ganadera e industrial de la Provincia, concentrando gran parte de la actividad del sector.

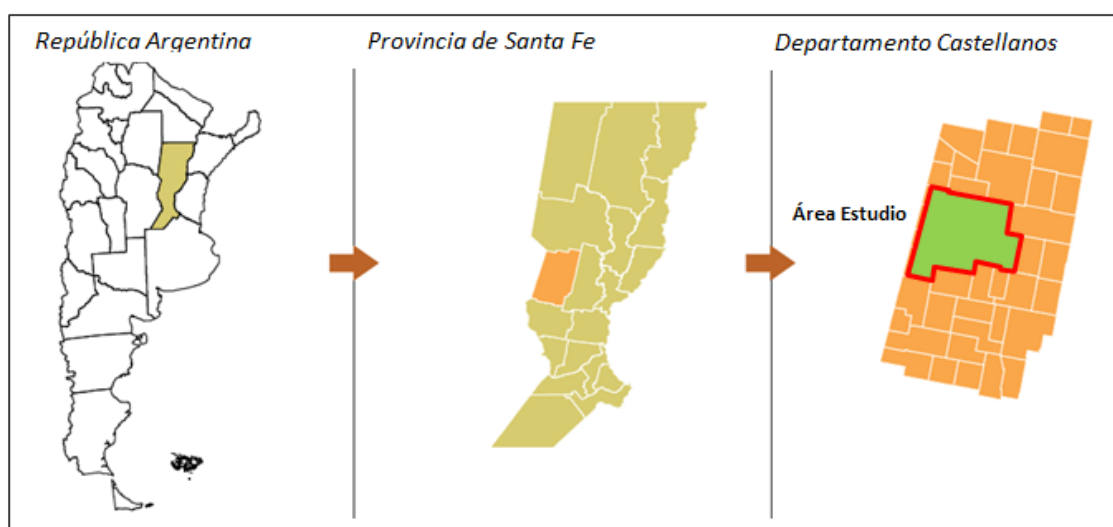


Figura 1: Localización del área de estudio en la República Argentina - Provincia de Santa Fe - Departamento Castellanos.

2. Características Climáticas

Considerando los regímenes térmico y pluviométrico, la cuenca presenta un clima Templado cálido sin estación seca.

Temperatura: En el área de estudio la media anual de temperatura varía entre 17,5 y 19,5 °C, siendo atravesada por la isoterma de 18 °C. La temperatura máxima media es de 32 °C y sucede en el mes de enero y la mínima media es de 6,6 °C y ocurre en julio.

Precipitación: La misma se encuentra entre las isoyetas de 800 y 1200 mm, con una marcada variabilidad en el régimen pluvial anual que va desde los 500 mm, en los años secos, hasta superar los 2000 mm en los húmedos, con precipitaciones muy intensas. Además, la frecuencia de precipitaciones intensas se ha incrementado desde fines de 1970, pero esta tendencia ha sido más marcada a partir de 1990. Esto ha sido verificado en varios estudios (MAH, UNL, INA, INTA, 2007) [3].

El período normal de inundaciones ocurre a finales del verano en los meses de febrero o marzo, donde las precipitaciones suelen superar los 300 mm. Esto sucedió durante el anegamiento del año 2007 cuando se registró un fenómeno climático extremo, con excesos de lluvias, registrándose en la localidad de Rafaela una precipitación acumulada de 735 mm durante los meses de febrero y marzo (Servicio Meteorológico Nacional - SMN, 2008) [4]. También, se

produjeron fenómenos climáticos similares durante los meses de enero y marzo del año 2014 con una precipitación acumulada de 550 mm, entre diciembre de 2015 y abril de 2016 con una precipitación acumulada de 814 mm y en diciembre de 2016 y enero 2017 donde la precipitación acumulada fue superior a los 500 mm.

3. Características Geomorfológicas

El área de estudio se encuentra localizada en el sector Suroeste de la Cuenca del Arroyo Cululú (Figura 2). La misma constituye la mayor sub-cuenca del río Salado ubicándose en su tramo inferior próxima a su desembocadura. La cuenca del Cululú presenta una longitud aproximada Oeste-Este de 120 km y una Norte-Sur promedio de 80 km con una superficie total de 9.636 km². Su morfología está controlada por lineamientos tectónicos de orientación general N-S y NE-SW. Sus cabeceras se encuentran en el NE de la provincia de Córdoba y el NW de la de Santa Fe. Se trata de un área plana de pendiente muy suave hacia el Este. Es una sub-cuenca asimétrica con mayor desarrollo en la red de afluentes en el sector Oeste, se trata de cañadas subparalelas que se integran hacia el Este con la red fluvial.

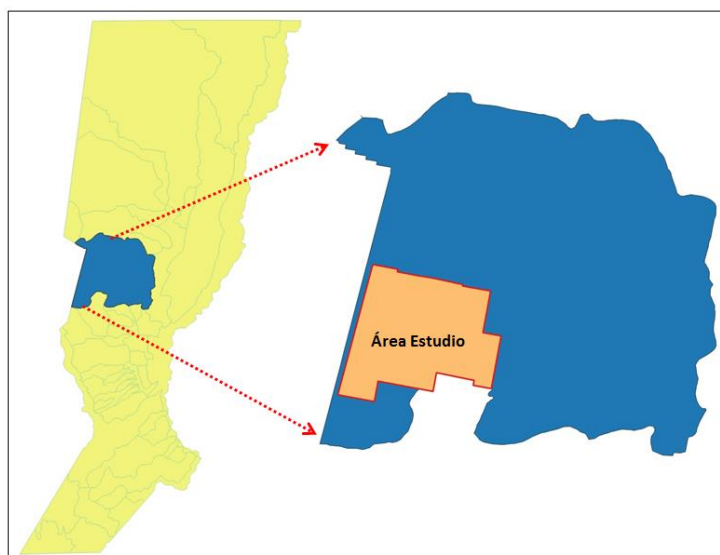


Figura 2: Ubicación de la Cuenca del arroyo Cululú en el centro-oeste de la Prov. de Santa Fe (izquierda) y localización del área de estudio en dicha cuenca (derecha).

La dinámica hídrica actual está definida por factores geológicos y climáticos. Entre los geológicos domina el estilo tectónico caracterizado por lineamientos de rumbo NE-SW y NW-SE, que delimitan bloques elevados, hundidos y basculados con elevaciones de pocos metros, pero que en llanura producen efectos morfológicos importantes. Dado que en esta región la cobertura de sedimentos no consolidados que cubre el basamento de rocas tiene centenares de metros, las deformaciones generadas por desplazamiento sobre fallas se distribuyen en las capas superficiales en forma de suaves pliegues. Estas fallas no generan rupturas en la superficie (Krohling y Brunetto, 2013) [5]. Entre los principales elementos geomorfológicos se debe destacar:

Cañadas: constituyen depresiones lineales rectas de llanura, poco profundas (1 m), relativamente anchas (200 a 400 m) y de mayor longitud (5 a 35 km), que colectan agua y sirven como vías de escurrimiento permanente o temporario (Iriando, 1983) [6].

Bañados de origen hídrico: son áreas deprimidas que ocupan grandes extensiones, hasta cientos de Km², en las cabeceras de las cuencas fluviales de llanura y se encuentran cubiertas de agua durante largos períodos (semanas o meses). Son alimentadas por el agua de lluvia la cual cubre la depresión con apenas algunos centímetros de profundidad y no presentan sedimentos palustres. La masa de agua se mueve muy lentamente sin transportar sedimentos a favor de las

suaves pendientes hacia áreas de cota más bajas. El agua residual de estos bañados termina escurriendo a través de las cañadas o cauce fluvial (Iriondo y Drago, 2004) [7].

4. Evento Climático Extremo

Extensas zonas de la Pampa Húmeda vienen experimentando una alternancia de períodos de sequía y episodios lluviosos muy concentrados en el tiempo y en el espacio. En particular, durante el período del 22/12/2016 al 13/01/2017 el área de estudio recibió un fenómeno climático extremo constituido por precipitaciones que superaron los 500 mm, es decir, en 22 días llovió el 50% de lo que lo hace en un año. En la Figura 3 se pueden apreciar los valores acumulados de precipitación (mm) durante enero de 2017 en todo el país. Se observa claramente como los mayores valores de lluvias (entre 350 y 400 mm) tienen como epicentro el centro-oeste de la provincia de Santa Fe donde se localiza el área de interés. También, esta figura muestra las anomalías positivas de precipitación en el mes de enero de 2017 (Servicio Meteorológico Nacional, 2017) [8], es decir, cuanto más de lo normal llovió.

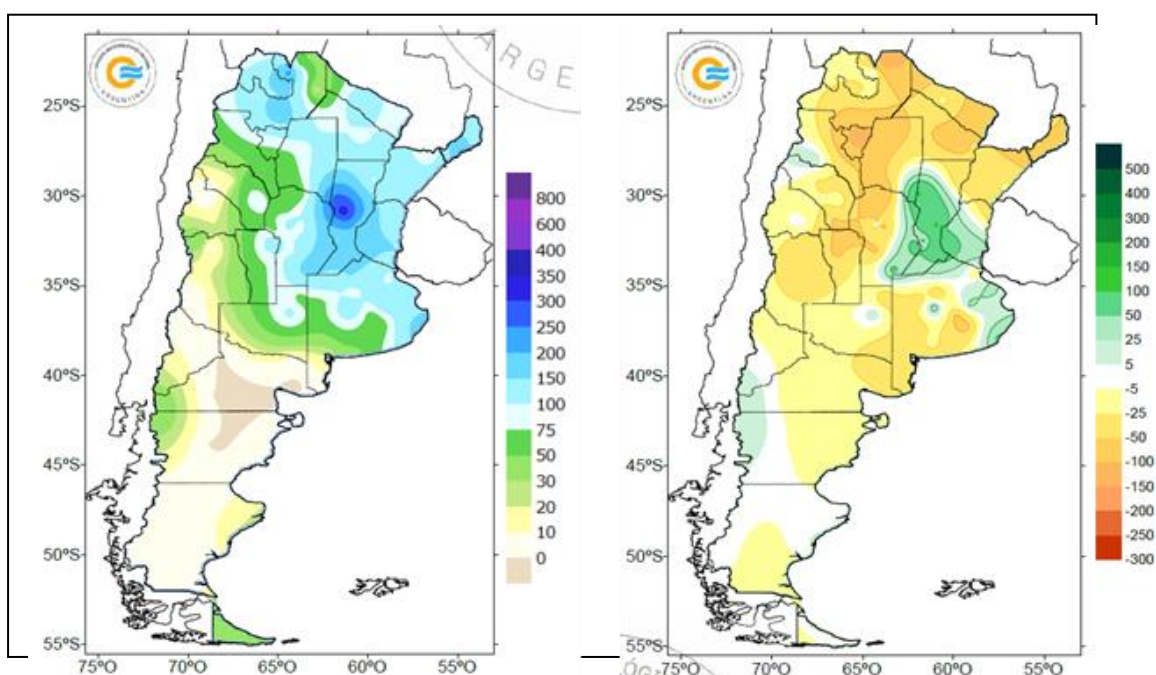


Figura 3: Precipitación acumulada en mm (izq.) y anomalía de precipitación en mm (der.) en enero 2017. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (2017) [8].

A continuación, la Tabla 1 muestra que los excesos de precipitación fueron de tal magnitud que se produjeron nuevos records de precipitación acumulada en 24 horas en dos estaciones del Servicio Meteorológico Nacional localizadas muy próximas al área de estudio, se trata de las ubicadas en las ciudades de Rafaela y Sunchales.

Tabla 1: Estaciones meteorológicas con récord diario de precipitación el 03/01/2017.

Estación	Precipitación acumulada en 24hs (mm)/día de ocurrencia	Valor récord anterior (mm)/año de ocurrencia	Período de referencia
SUNCHALES	157.0 / 3	120.0 / 2011	2010 - 2017
RAFAELA	99.0 / 3	70.0 / 2015	2013 - 2017

Estado del arte

1. Mapas de Inundaciones desde imágenes SAR

Stian Solbø y Inger Solheim (2005) [9], señalan como método tradicional para realizar el mapeo operativo de inundaciones empleando imágenes SAR, en áreas no forestadas, la definición de umbrales, los cuales son relativos a la escena considerada. Para esto, es conveniente que la misma sea adquirida con ángulos de incidencia mayores a 40°, dado que los ángulos menores disminuyen el contraste entre agua y suelo. En áreas forestadas la inundación produce un incremento en la retrodispersión (backscattering), por lo tanto, para detectarla se utilizan datos multitemporales, es decir, se compara la imagen del período de inundación con otra de referencia. La mejor opción es utilizar bandas C-HH o C-VH.

Para Nazzareno Pierdicca *et al.* (2014) [10], la última generación de satélites SAR permite proporcionar a los administradores de emergencias mapas de inundación casi en tiempo real caracterizados por una resolución espacial muy alta. Los algoritmos de detección de inundaciones generalmente buscan regiones de baja retrodispersión, asumiendo así que el agua de inundación aparece oscura en una imagen SAR, lo cual es una suposición que no siempre es válida. Por ejemplo, en las zonas rurales, la retrodispersión de doble rebote que involucra el tallo vertical de los cultivos con el suelo produce un alto retorno de la señal radar que puede incrementarse aún más por la presencia del agua de inundación altamente reflectante.

Kefeng Ji y Yonghui Wu (2015) [11], indican las siguientes ventajas de las imágenes satelitales para mapear inundaciones:

- Los datos de EO pueden ayudar a comprender, describir, monitorear y modelar estos eventos;
- Son pertinentes tanto los sensores pasivos (ópticos) como los activos (SAR / INSAR);
- Es muy importante aprovechar el sinergismo entre ambos sensores (revisión, resolución espacial, información espectral, etc.);
- La tarea no es tan "simple" dado que dichos sensores poseen diferentes: parámetros de adquisición, características de la escena, longitud de onda y además se aplican a distintos regiones geográficas con diferentes huellas o marcas dejadas por el evento climático extremo;
- Finalmente, concluyen indicando que el recurso, es decir, las imágenes ópticas y SAR de los satélites Sentinel 1/2/3 de la ESA, está garantizado durante los próximos 15 a 20 años.

Xinyi Shen *et al.* (2019) [2], realizaron una revisión de los métodos empleados actualmente para mapear la extensión de una inundación con imágenes SAR. Indicaron que la automatización y la robustez del mapeo de inundaciones en aguas abiertas, es decir, no obstruidas por la vegetación, se ha logrado con una precisión aceptable en esta era de los datos de observación de la tierra (Big Data - EO). Sin embargo, sostienen que aún no son satisfactorios para la detección de mapas de inundaciones debajo de la vegetación utilizando datos SAR de banda L o multipolarizados (dual o cuádruple).

2. Polarimetría SAR - PolSAR

Según S. R. Cloude (2004) [12], es bien sabido que los datos obtenidos a través de un Radar de Abertura Sintética (Synthetic Aperture Radar) polarimétrico, proporcionan una valiosa información para el estudio y caracterización de la zona observada. Sostiene que la polarimetría es la técnica que utiliza las mediciones de la matriz de reflexión para revelar las propiedades físicas de las superficies analizadas y así poder estudiarlas. Esta técnica envía ondas electromagnéticas polarizadas y mide las reflexiones que produce la interacción de dichas ondas con la superficie de

los campos analizados, obteniendo una matriz de dispersión que representa una caracterización específica de dichos campos. Juntando las dos ideas, SAR y polarimetría, se definió un sistema de adquisición basado en la polarización de onda de los SAR, lo que se conoce como polarimetría SAR o PolSAR.

S. Cloude y E. Pottier (1997) [13] propusieron un algoritmo para identificar de manera no supervisada los mecanismos de dispersión polarimétrica en el plano Entropía-Alpha (H- α). La idea clave es que la H surge como una medida natural del desorden inherente a los datos de dispersión SAR y α puede usarse para identificar el mecanismo de dispersión dominante.

Según Héctor Del Valle (2017) [14], la entropía (H) representa el grado de aleatoriedad o desorden en la dispersión. Varía desde 0, indica un mecanismo de dispersión dominante, y 1, representa la mezcla al azar de varios mecanismos de interacción. Por su parte el ángulo Alfa (α), señala el mecanismo de dispersión dominante en la imagen, este va desde 0° (dispersión de superficie) a 90° (doble rebote), siendo que un α de 45° indica una dispersión de volumen. En cuanto a la Anisotropía (A), la misma señala la homogeneidad de una dada cubierta de la superficie, una A de 0 indica cobertura homogénea y de 1 representa una cobertura heterogénea.

En la opinión de S. R. Cloude (2004) [12], a partir de la descomposición de la matriz de covarianza [C₂] se pueden obtener los autovalores (λ_1, λ_2 y λ_3) siendo: $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > 0$; y los autovectores (U₁, U₂ y U₃). Entonces a partir de estos se definen los tres parámetros polarimétricos como:

Entropía (H):

$$H = -\sum_{i=1}^3 p_i \log_3(p_i), \quad p_i = \lambda_i / \sum_{k=1}^3 \lambda_k$$

Anisotropía (A):

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3}$$

Alfa (α):

$$\alpha = \sum_{i=1}^3 p_i \alpha_i$$

El plano de clasificación H- α propuesto por estos autores (Cloude y Pottier, 1997) [13] se subdivide en 8 zonas básicas características de diferentes comportamientos de dispersión, ver Figura 4. El mecanismo básico de dispersión de cada píxel de una imagen SAR polarimétrica se puede identificar comparando sus parámetros de H y α con umbrales fijos. Los diferentes límites de clase, en el plano H- α , se han determinado para discriminar los distintos tipos o mecanismos de dispersión: de superficie (SR), de volumen (VD) y doble rebote (DB) a lo largo del eje α y el grado de aleatoriedad bajo (0), medio y alto (1) a lo largo del eje de H, lo cual indica la pureza (H=0) o el desorden (H=1) de los mecanismos de dispersión presentes en el área.

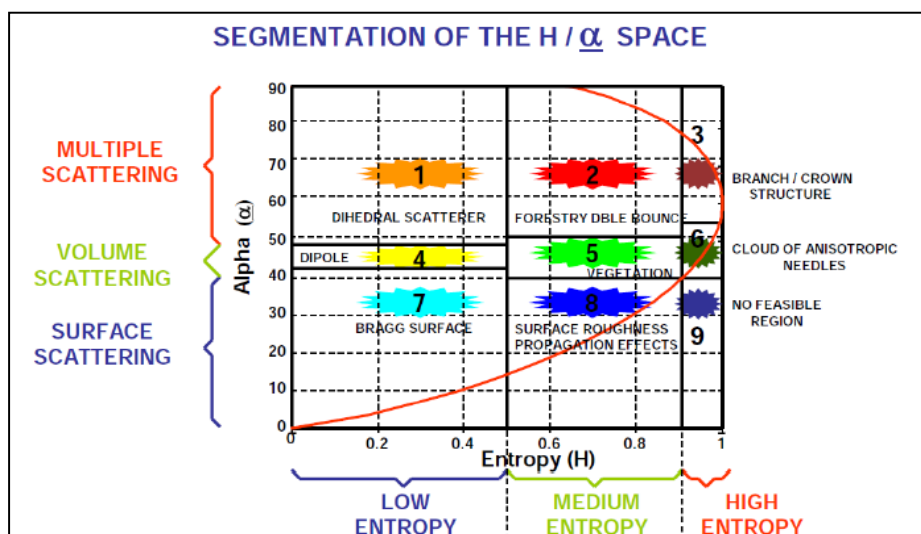


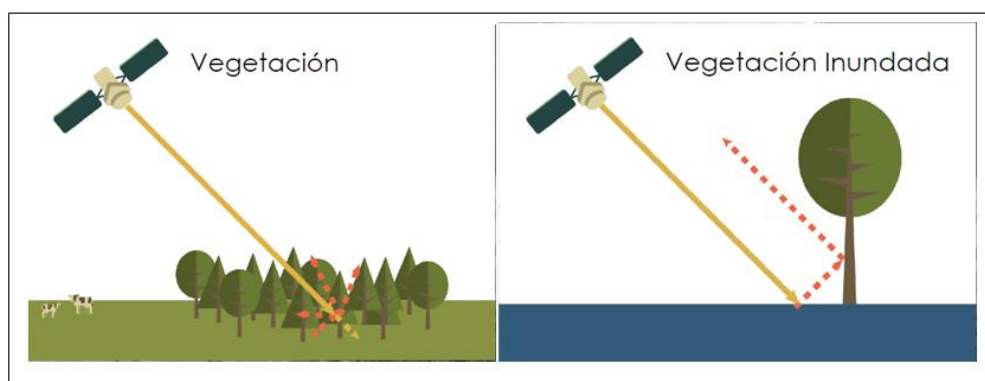
Figura 4: Plano de clasificación entropía - alfa (H- α). FUENTE: Cloude y Pottier, 1997 [13].

3. Interacción entre la señal SAR y los cuerpos de agua

Debido a la alta constante dieléctrica del agua (80), no hay penetración de las microondas en la misma, por lo cual la retrodispersión depende de la rugosidad superficial del agua. En un caso ideal, un cuerpo de agua abierto puede ser modelado como una superficie perfectamente lisa con una alta constante dieléctrica, que actúa como un reflector especular que dirige la radiación de microondas incidente lejos del sensor SAR en la dirección contraria al mismo, por lo cual la retrodispersión es nula y se aprecia en color negro en la imagen (Figura 28). Estas áreas con agua contrastan fuertemente con la mayor retrodispersión de las áreas circundantes más rugosas, que se caracterizan por un aumento en la reflexión difusa (Mason *et al.*, 2007) [15].

4. Interacción entre la señal SAR y la vegetación inundada

El retorno de la señal de la vegetación inundada es muy variable según la condición de inundación particular y fuertemente dependiente de la longitud de onda del sistema y de la estructura y densidad del dosel (Richards *et al.*, 1987) [16]. En la opinión de Mercedes Salvia *et al.* (2010) [17], las microondas emitidas por el sensor del SAR, dado su capacidad para atravesar el dosel, ofrecen la posibilidad de mapear las inundaciones por debajo de la vegetación. Esto ocurre por el aumento de la retrodispersión debido al mecanismo de interacción (señal - blanco) de doble rebote entre la vegetación y el agua de la inundación que la cubre parcialmente, ver Figura 5.



**Figura 5: Dispersión difusa en la floresta no inundada (izq.) y de doble rebote en la inundada (der.).
Fuente: Erika Podest (2017) [18]**

La Figura 6 abajo, muestra el caso particular del cultivo de maíz en el área de interés. Se puede observar, a la izquierda de la misma, un lote de maíz no inundado previo al evento climático, en donde prevalece el mecanismo de dispersión de volumen. En el centro de dicha figura, se observa un lote inundado parcialmente (entre 50 y 80 cm de agua), que provoca la dispersión doble rebote agua tallo. Por último, a la derecha se puede ver un lote de maíz inundado casi completamente (altura del agua mayor a 150 cm) que da lugar a la dispersión especular.



Figura 6: Cultivo de maíz en diversas situaciones: no inundado (izq.), parcialmente anegado (centro) y completamente cubierto por el agua (der.).

Materiales

1. Datos de campo

Se obtuvo información de relevamientos de campo realizados por personal del INTA Rafaela, sobre el área de estudio, los días 3, 11 y 12 de enero de 2017. En los mismos se tomaron registros fotográficos, descripción de la ubicación de lotes rurales anegados y tipo de cobertura vegetal presente o ausencia de la misma (rastrojo). La Figura 7 muestra la ubicación de los lotes en donde se adquirieron las muestras en el área de estudio.

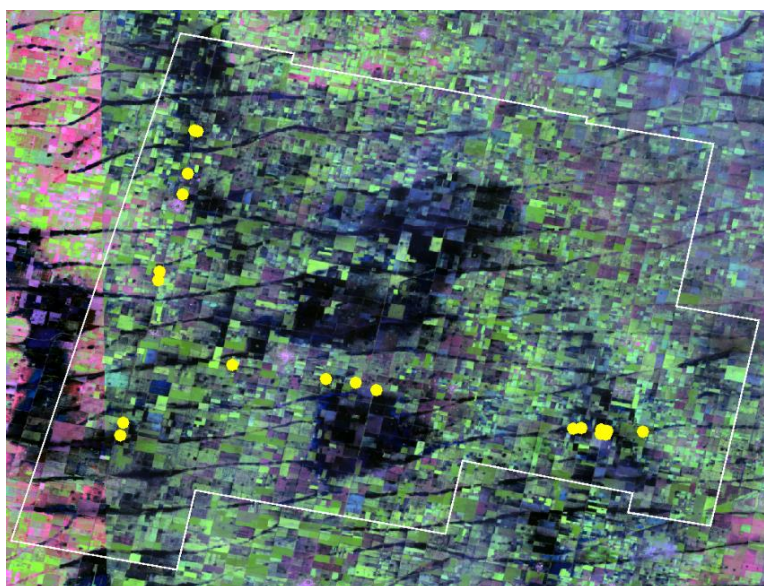


Figura 7: Localización de los puntos de muestreo en el área de estudio (amarillo).

2. Imágenes Ópticas

Corresponden al satélite Sentinel 2A (S2A), sensor Multi Spectral Instrument (MSI), con nivel 1 de pre-procesamiento (L1C), en el cual las imágenes vienen con valores de reflectancias en el tope de la atmósfera (TOA) y georreferenciadas. El sensor MSI toma imágenes con bandas multiesprectrales que presentan diferente resolución espacial (10, 20 y 60 metros). Para equiparar la resolución espacial de estas imágenes con las del SAR, se decidió utilizar las bandas de 20 m, la cuales son: las 5, 6 y 7 (corresponden a distintas porciones del rojo en el espectro visible), la 8A (infrarrojo cercano - NIR) y las bandas 11 y 12 (infrarrojo de onda corta - SWIR), mostrado en la

Tabla 2. En cuanto a la fecha de adquisición, se estableció utilizar las más cercanas al período en donde ocurrieron las máximas precipitaciones (22/12/2016 al 13/01/2017), por lo tanto, la imagen pre-evento seleccionada fue la del 11/12/2016 y la del evento la del 10/01/2017.

Tabla 2: Día de adquisición y características de las imágenes ópticas - Sentinel 2A.

Id.	Fecha	Sensor	Nivel Procesamiento	Bandas (20 m)	Pasada
1	18/11/2016	MSI	L1C	5, 6, 7, 8a, 11 y 12	Descendente
2	11/12/2016	MSI	L1C	5, 6, 7, 8a, 11 y 12	Descendente
3	10/01/2017	MSI	L1C	5, 6, 7, 8a, 11 y 12	Descendente
4	27/01/2017	MSI	L1C	5, 6, 7, 8a, 11 y 12	Descendente

3. Imágenes SAR

En este proyecto las imágenes SAR provienen del satélite Sentinel 1B que presenta las siguientes características: Banda C (5,6 cm), doble polarización (VV/VH) y el modo de adquisición denominado banda ancha interferométrica (IW) en el cual se adquieren las imágenes con un ancho de escena de 250 km y una resolución espacial de 5x20 metros, mostrada en la Figura 38. Las mismas fueron descargadas gratuitamente de la página (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) de la Agencia Espacial Europea (ESA) denominada Copernicus. Se tienen dos tipos de productos, el de nivel más básico llamado formato complejo de un solo look (Single Look Complex - SLC). De las SLC se obtuvieron dos imágenes, una previa al fenómeno climático (21/12/2016) y la otra durante el mismo (14/01/2017), ver Tabla 3.

Tabla 3: Día de adquisición y características de las imágenes SAR - Sentinel 1B.

Id.	Fecha	Modo	Tipo de Producto	Rango Ángulo Incidencia	Polarización	Pasada
15	21/12/2016	IW	SLC	38°- 46°	VV/VH	Descendente
16	14/01/2017	IW	SLC	38°- 46°	VV/VH	Descendente

Método

A continuación, se explica en detalle el método seguido y las principales características de las técnicas aplicadas a las imágenes SAR para la obtención de la fracción inundada. Se puede observar el mismo en la Figura 8, en forma de diagrama de bloques. A través de este se pretende determinar la superficie inundada en el área de estudio, aplicando la técnica PolSAR, validando los resultados a partir de las imágenes ópticas y el muestreo *in situ*.

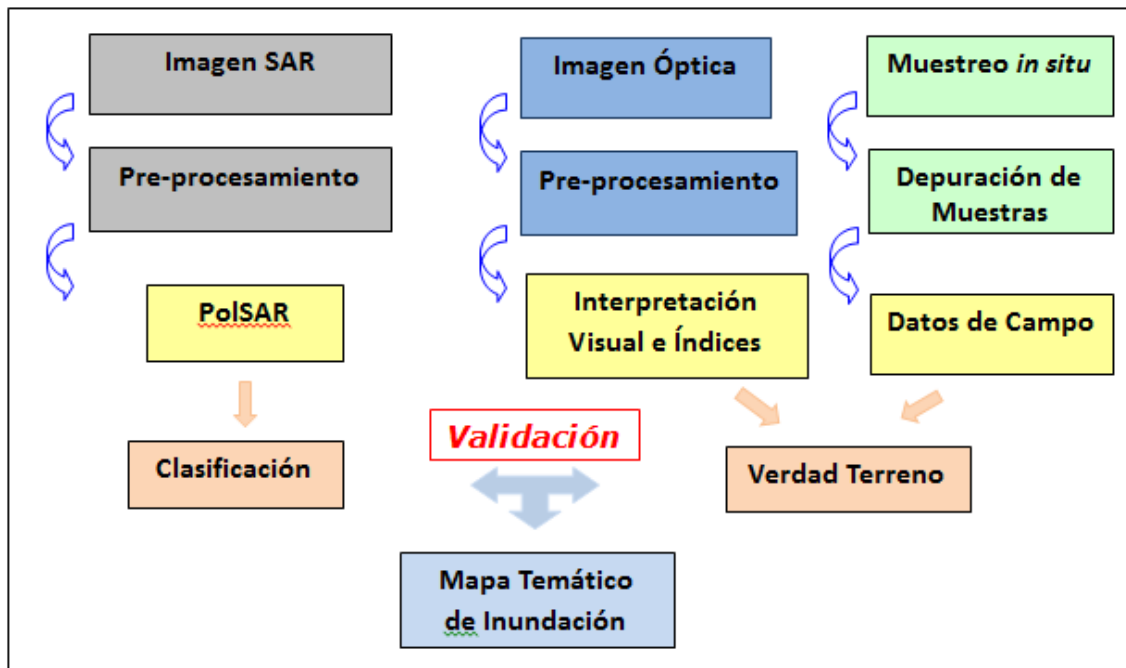


Figura 8: Método para la determinación del área inundada.

1. Pre-Procesamiento

Imagen Óptica: Las imágenes Sentinel 2A fueron pre-procesadas a través del recorte del área de estudio (subset) y la realización de realces y composiciones en color, para luego aplicar el índice de diferencias normalizadas de agua (NDWI).

Imagen SAR: Las imágenes Sentinel 1B fueron pre-procesadas en el programa SNAP 8.0 según el procedimiento establecido para las imágenes SLC y GRD (H. Del Valle (2017) [14]. Este consiste en una secuencia de pasos que se comentan a continuación:

- Restablecer la órbita precisa a la imagen (precise orbit file);
- Remover el borde de la imagen (remove border noise);
- Eliminar el ruido térmico que pudiese estar presente en la imagen (thermal noise removal);
- Efectuar la calibración radiométrica de la imagen transformándola de ND (número digital) al valor físico de sigma cero (σ_0) (calibrate);
- Aplicar un multi-looking en orden a reducir el ruido de la escena y obtener un valor medio correcto de σ_0 (multilook);
- Ejecutar el filtrado del moteado (speckle) de la imagen, aplicando un filtro adaptativo Gamma Map (Speckle Filtering);
- Realizar la corrección geométrica al terreno (Range-Doppler Terrain Correction), en la cual se define el Modelo Digital del Terreno a utilizar (SRTM 1Sec), el método de remuestreo (interpolación bilinear), el tamaño del pixel (20,0 m x 20,0 m) y la proyección cartográfica (WGS 84 en coordenadas geográficas latitud y longitud).

2. Procesamiento

Imagen Óptica: Se aplicó una composición color RGB-118a5 sobre la imagen del 10/01/2017 y el índice de agua (NDWI) para determinar el área inundada libre de vegetación, es decir, aquellos sectores que fueron cubiertos por el agua y cuya cobertura correspondía a suelo desnudo (con rastrojo), cultivos (alfalfa, soja, etc.), pastizales y cañadas.

A continuación, se aplicó la técnica de interpretación visual de imágenes, sobre la composición color generada con la imagen óptica del 10/01/2017, empleándose los principales criterios de interpretación visual (color, textura y forma), para digitalizar el contorno de dos bajos o cubetas presentes en el área de estudio, los cuales se encontraban completamente inundados durante el período considerado. Los dos polígonos generados fueron considerados como la verdad del terreno y, por lo tanto, áreas de comparación de las superficies anegadas determinadas por la técnica PolSAR.

Imagen SAR: A las imágenes Sentinel 1B pre-procesadas se les aplicó el siguiente procedimiento con objeto de extraer las áreas inundadas:

- 1) Ejecución de la técnica polarimétrica (PolSAR);
- 2) Determinación de umbrales sobre la imagen procesada en el paso anterior;
- 3) Aplicación del umbral a partir del uso de operadores lógicos y aritmética de imágenes, con objeto de obtener una imagen binaria con las clases agua y no agua;
- 4) Empleo de filtros sobre la imagen binaria. En primer término se aplica un filtro de mediana (3x3) para quitar píxeles aislados presentes en cada imagen; y en segundo lugar, se utiliza un filtro morfológico de cierre (closing 3x3) con el objeto de rellenar los espacios vacíos que quedan en las áreas determinadas.

3. PolSAR

Para aplicar la técnica de polarimetría se requiere de una imagen SAR en el nivel más básico denominado SLC (complejo de un solo look). Se contaba con dos imágenes en dicho formato, una previa (21/12/2016) y una durante el evento crítico (14/01/2017), eligiéndose esta última para la aplicación de dicha técnica.

En primer término se procede a la generación de la matriz polarimétrica de Covarianza (C2), siendo esta la única opción dado que se cuenta con una imagen SLC de dos polarizaciones (VV y VH). En caso de tener una imagen SAR completamente polarizada (HH, VV, HV y VH), es posible aplicar la matriz polarimétrica de Coherencia (T3).

El paso siguiente es aplicar un filtro para reducir el efecto del moteado (speckle), para tal, se eligió el denominado filtro refinado de Lee (Sentinel-1 Toolbox, 2020). A continuación, se aplicaron dos técnicas polarimétricas diferentes, en el primer caso se obtuvieron los parámetros polarimétricos (entropía, alfa y anisotropía) y en el segundo se ejecutó una clasificación polarimétrica no supervisada, ambos son comentados a continuación.

Parámetros Polarimétricos (H, α y A): Se realizó la descomposición polarimétrica y, por tratarse de una imagen SAR con doble polarización, el programa utilizado para procesarla solo dispone de una opción denominada descomposición H-Alfa Dual Pol (SNAP 8.0, 2020). Esta descomposición polarimétrica genera los tres parámetros: Entropía (H), Alfa (α) y Anisotropía (A).

Luego de la obtención de tales parámetros polarimétricos (H, α y A) se procede a completar las tres etapas faltantes del procedimiento indicado previamente para derivar las imágenes binarias de inundación (determinación de umbrales, aplicación de estos y empleo de filtros).

Clasificación Polarimétrica No Supervisada: Se aplicaron dos clasificaciones polarimétricas no supervisadas denominadas: Cloude-Pottier y H Alpha Wishart, respectivamente. La primera de ellas se basa en el uso del plano Entropía (H) / Alfa (α). La entropía, por definición, es una medida de la aleatoriedad o desorden de los datos retrodispersados, mientras que el ángulo alfa se puede utilizar para identificar los mecanismos de dispersión dominantes en la escena. Por lo tanto, el plano H / Alfa se divide en nueve zonas correspondientes a nueve clases correspondientes a los

mecanismos de dispersión y su grado de desorden. Para cada píxel de la imagen se calculan su entropía y ángulo alfa, y en función de ellos se clasifica el píxel en una de las nueve zonas (Figura 4).

En el caso de la Clasificación H Alpha Wishart, está al igual que la clasificación de Cloude-Pottier separa los datos en nueve grupos utilizando las zonas definidas en el plano H / Alfa. Sin embargo, a diferencia de la anterior la clasificación H Alfa Wishart continua recalculando los centros de los nueve grupos en un número de iteraciones indicado por el usuario, luego de lo cual clasificará los píxeles en función de sus distancias a cada uno de dichos centros de grupo (SNAP 8.0, 2020).

Resultados

1. Imagen Óptica

Sobre la imagen adquirida durante el período de inundación, del 10/01/2017, se aplicó una composición color RGB-118a5. Posteriormente, se calculó el índice de agua (NDWI). De esta manera a partir del NDWI se determinó la superficie inundada de agua “libre”, es decir, aquellas áreas en las cuales el agua cubre por completo los lotes, independientemente del tipo de cobertura que estos tengan (suelo desnudo, cultivos o pastizales), ver Figura 9.

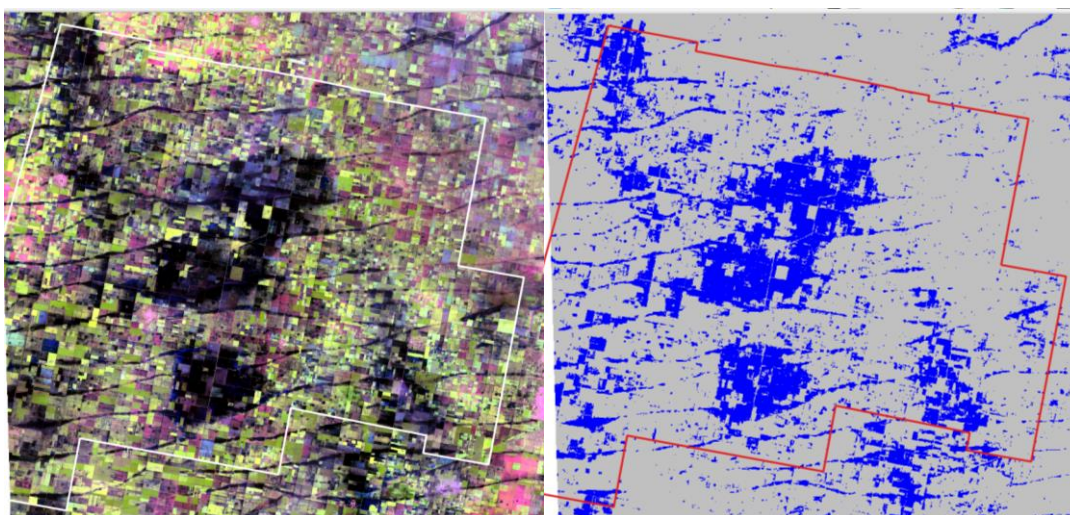


Figura 9: RGB-118a5 (izq.) e índice de agua NDWI (der.) de la imagen Sentinel 2 del 10/01/2017.

Luego, a partir de una interpretación visual de la composición color (RGB-118a5) de la imagen del 10/01/2017 y con apoyo en la imagen del NDWI, se procedió a digitalizar los contornos de dos bajos o cubetas que se encontraban inundados dentro el área de interés (Figura 10). Se generaron entonces, dos polígonos a los cuales se los empleó como la verdad del terreno para comparar los resultados obtenidos por la técnica PolSAR en la delimitación de las áreas anegadas.

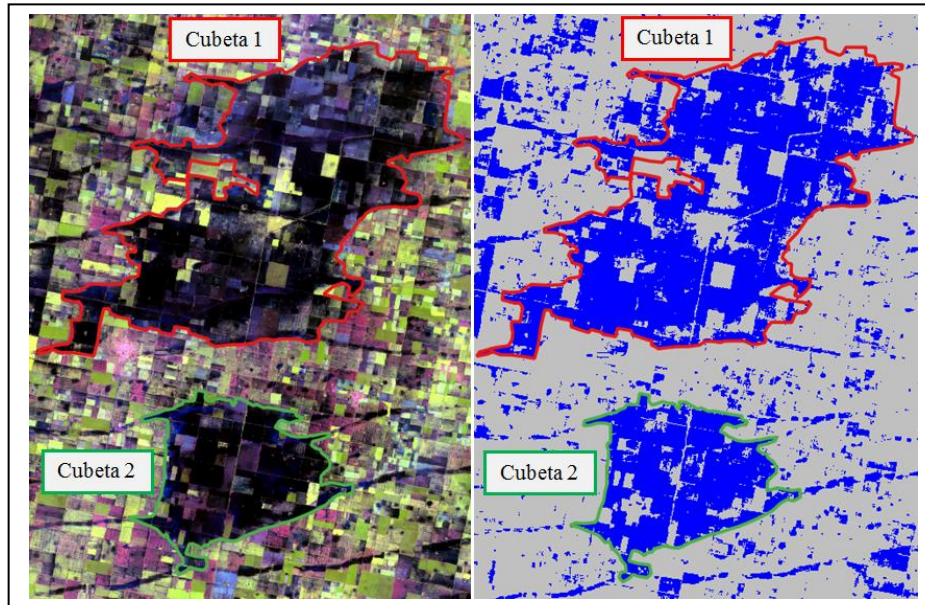


Figura 10: Cubetas o bajos digitalizados por interpretación visual de la imagen RGB-118a5 (izquierda) y del índice de agua NDWI (derecha) de la imagen Sentinel 2 del 10/01/2017.

2. Imagen SAR - PolSAR

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la técnica PolSAR sobre las imágenes Sentinel 1B del 14/01/2017 (formato SLC) para determinar la superficie inundada en la cubeta 1, siguiendo el procedimiento de cuatro pasos mencionado arriba. Es necesario comentar, que también se aplicó la misma técnica sobre la cubeta 2.

2.1. Parámetros Polarimétricos (H, α y A)

Se analizaron y compararon los tres parámetros polarimétricos obtenidos (Entropía-H, Alfa- α y Anisotropía-A). A continuación, se comentan los resultados obtenidos con cada parámetro y los umbrales aplicados a los mismos. En el caso de Alfa (α), se observó que resalta en color blanco las áreas inundadas de agua “libre” donde se produce interacción especular, dejando en color negro los lotes anegados con cultivos, no tapados por el agua, con dispersión de doble rebote (Figura 11).

Para el caso de la Entropía (H), presenta una imagen similar al parámetro anterior (Alfa- α) pero con menor contraste resaltando menos los objetos de interés, por lo tanto, se decidió no emplearla. En cuanto a la Anisotropía (A), se apreció que se comporta de manera opuesta al parámetro Alfa- α , es decir, resalta en color blanco los lotes con cultivos inundados en donde el agua no alcanza a cubrirlos (interacción de doble rebote) y en color negro las áreas anegadas en donde el agua tapa por completo los lotes produciendo dispersión especular (Figura 11).

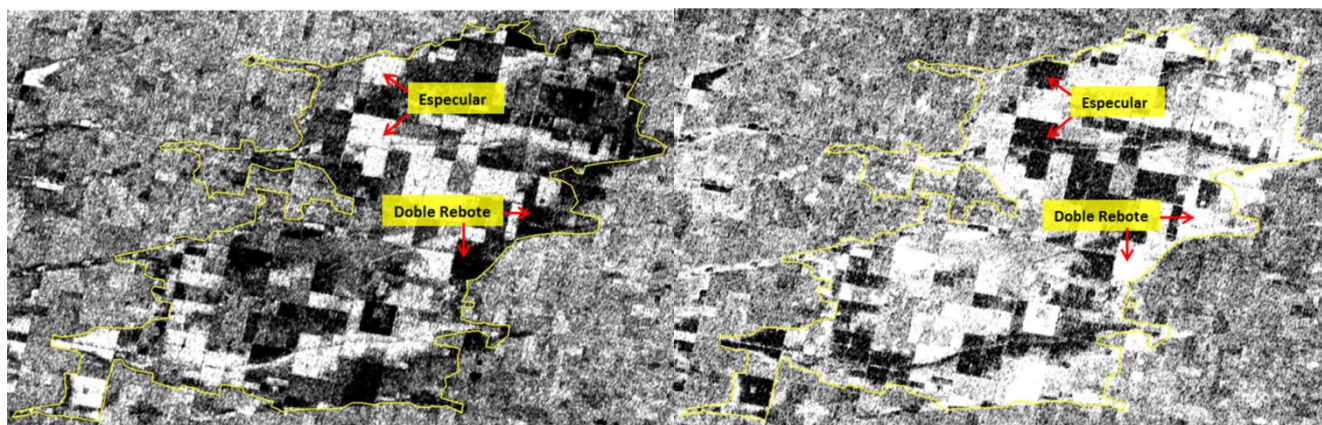


Figura 11: Imagen del parámetro polarimétrico Alfa (α), a la izquierda, en donde se observan en color blanco las áreas con dispersión especular y en negro con doble rebote. A la derecha se observa el parámetro Anisotropía (A) en donde se aprecian, con los colores invertidos respecto al anterior, en blanco las áreas con dispersión de doble rebote y en negro con especular.

Siguiendo el procedimiento, se fijaron los siguientes umbrales para destacar los sectores con dispersión especular y de doble rebote:

- Si $\alpha \geq 35$ implica se destacan los lotes inundados completamente cubiertos por el agua (dispersión especular);
- Si $\alpha \leq 12$ implica se resaltan los lotes anegados con cultivos, en los cuales el agua no cubre los mismos (dispersión doble rebote);
- Si $A \leq 0,35$ implica se destacan los lotes anegados completamente por el agua (interacción especular);
- Si $A \geq 0,85$ implica se resaltan los lotes anegados con cultivos en los cuales el agua los cubre parcialmente (interacción de doble rebote).

A continuación, se aplicaron los umbrales mencionados utilizando diferentes operadores lógicos para resaltar, por un lado, las áreas donde la inundación cubre completamente el suelo (dispersión especular) y, por otro, las superficies donde el agua inunda parcialmente los cultivos sin llegar a cubrirlos (dispersión de doble rebote). Para resaltar la dispersión especular se utilizó la rutina: $\text{Alpha} \geq 35$ or $\text{Anisotropy} \leq 0,35$; es decir, cualquiera de las dos condiciones que se cumpla implica la presencia de agua “libre”, es decir, sin obstrucción por la vegetación.

En el caso de la dispersión de doble rebote se aplicó la siguiente rutina: $\text{Alpha} \leq 12$ or $\text{Anisotropy} \geq 0,85$; esto es, cualquiera de las dos condiciones que suceda indica la presencia de cultivos anegados parcialmente por el agua, esto es, hasta una determinada altura de las plantas, produciéndose entonces una interacción de doble rebote. Por último, se realizó la suma de ambas imágenes (dispersión especular y doble rebote) obtenidas de la aplicación de las rutinas a los umbrales de las imágenes de los parámetros α y A, con objeto de obtener la superficie total inundada (Figura 12). **Sup. Total Inundada** = Dispersión Especular ($\alpha > 35$ or $A < 0,35$) + Dispersión Doble Rebote ($\alpha < 12$ or $A > 0,85$).

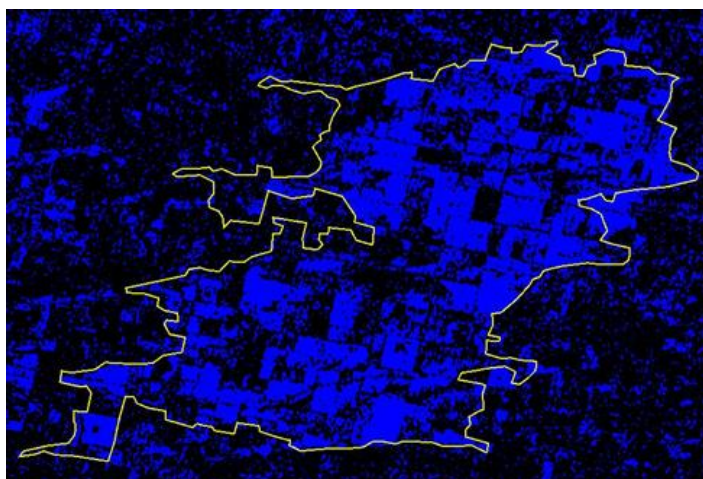


FIGURA 12: Superficie total inundada (azul) obtenida de la aplicación de los parámetros polarimétricos Alfa (α) y Anisotropía (A).

2.2. Clasificación Polarimétrica No Supervisada H-Alfa

Se aplicó una clasificación polarimétrica no supervisada denominada H-Alpha Wishart. Se obtuvieron 9 clases según el plano de clasificación H- α que corresponden a diferentes comportamientos de dispersión. De estas se identificaron dos que representaban los mecanismos de dispersión de interés (Figura 13):

- Clase 3: indica, según el plano de clasificación H- α , una dispersión de superficie con baja entropía o aleatoriedad. La misma marca (en color anaranjado) áreas abiertas inundadas en donde se produce dispersión especular de superficie.
- Clase 7: corresponde, según el plano de clasificación H- α , a una dispersión de doble rebote con alta entropía o aleatoriedad. Esta clase señala (en color azul) los lotes con cultivo anegados en donde el agua queda oculta por la vegetación produciéndose el mencionado mecanismo de interacción de doble rebote.

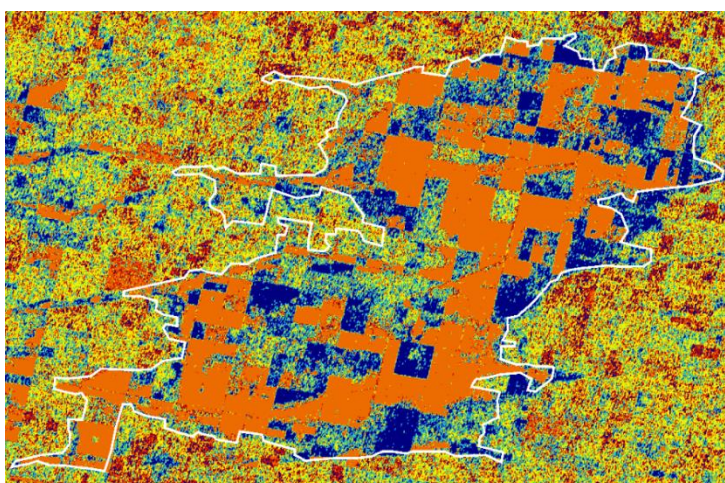


Figura 13: Clasificación polarimétrica H-Alpha Wishart indicando en color anaranjado la dispersión especular (clase 3) y en azul la de doble rebote (clase 7).

Finalmente, se realizó la suma de ambas imágenes (dispersión especular y de doble rebote) derivándose la superficie inundada en el área analizada (Figura 14).

$$\text{Sup. Total Inundada} = \text{Disper. Especular (clase 3)} + \text{Disper. Doble Rebote (clase 7)}$$

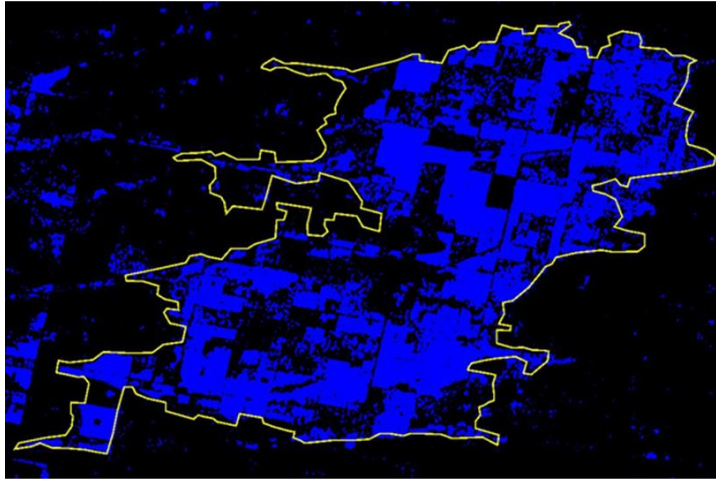


Figura 14: Superficie total inundada (azul) derivada de la clasificación H-Alpha Wishart.

3. Análisis de los Resultados

3.1. Comparación de las técnicas

Para comparar los resultados obtenidos con los parámetros polarimétricos (Alfa y Anisotropía) y con la clasificación polarimétrica (H-Alpha Wishart), se emplearon los dos polígonos correspondientes a los bajos presentes en el área de interés. Se consideró que ambos bajos estaban inundados en el 100% de su superficie (Figura 10). A estos se los empleó como la verdad del terreno para comparar las superficies inundadas determinadas por dichos algoritmos. A continuación, se pueden observar en las Tablas 4 y 5 las superficies inundadas en cada cubeta, derivadas desde ambos mecanismos de dispersión (especular y doble rebote), determinadas por cada técnica considerada.

Tabla 4: Superficies inundadas en la cubeta 1 derivadas de los mecanismos de dispersión especular y de doble rebote, determinadas por PolSAR.

TÉCNICAS	CUBETA 1 (Sup. 12263,71 Ha)			
	Sup. Especular (Ha)	(%)	Sup. Doble Rebote (Ha)	(%)
H - Alfa	2570,59	58	1896,74	42
H - Alfa - Clasif.	4545,14	71	1885,17	29

Tabla 5: Superficies inundadas en la cubeta 2 derivadas de los mecanismos de dispersión especular y de doble rebote, determinadas por PolSAR.

TÉCNICAS	CUBETA 2 (Sup. 4139,82 Ha)			
	Sup. Especular (Ha)	(%)	Sup. Doble Rebote (Ha)	(%)
H - Alfa	897,65	62	549,18	38
H - Alfa - Clasif.	1822,71	77	555,70	23

Para comparar el desempeño de ambas técnicas aplicadas en la detección de los dos mecanismos de interacción predominantes en las cubetas, se promediaron los porcentajes

obtenidos de los mismos (especular y doble rebote) en ambas cubetas para cada algoritmo utilizado, ver Tabla 6.

Tabla 6: Porcentaje promedio (%) de la superficie inundada en ambas cubetas, detectada a partir de la dispersión especular y de doble rebote por PoISAR.

TÉCNICAS	Sup. Especular (%)	Sup. Doble Rebote (%)
H - Alfa	60	40
H - Alfa - Clasif.	74	26

Del análisis de la Tabla 6 surge que ambos algoritmos polarimétricos (parámetros H-Alfa y la clasificación no supervisada H-Alfa), determinaron la superficie total inundada en las cubetas con un porcentaje promedio del 67% derivado de la dispersión especular y un 33% de la de doble rebote. Es decir, el mecanismo especular contribuyó con 2/3 del total y el de doble rebote aportó cerca de 1/3 de la superficie total inundada. Con lo cual se observa la importancia de la detección de este último mecanismo de interacción en áreas agrícolas anegadas en donde los cultivos ocultan el agua de la inundación.

A continuación, se muestra en la Tabla 7 la superficie total inundada en cada cubeta, detectada por las dos técnicas polarimétricas aplicadas a las imágenes radar Sentinel 1.

Tabla 7: Superficie total inundada en cada cubeta determinada por ambas técnicas

TÉCNICAS	CUBETA 1 (Sup. 12263,71 Ha)	CUBETA 2 (Sup. 4139,82 Ha)
H - Alfa	4467,33	1446,83
H - Alfa - Clasif.	6430,31	2378,41

Continuando, la Tabla 8 permite apreciar el porcentaje de inundación detectado por cada técnica en las dos cubetas analizadas.

Tabla 8: Porcentaje de la superficie inundada en cada cubeta derivado por las dos técnicas.

TÉCNICAS	Cubeta 1 (%)	Cubeta 2 (%)	% Promedio
H - Alfa	36,43	34,92	36
H - Alfa - Clasif.	52,43	57,41	55

Del análisis de la Tabla 8 surge que de las dos técnicas PoISAR aplicadas, la que determinó en mayor porcentaje la superficie anegada en ambas cubetas fue la clasificación no supervisada H-Alfa con un 55% y la de los parámetros H-Alfa lo hizo apenas con un 36%. Aunque el resultado no es tan prometedor, se detectó solo un 55% del área de las cubetas inundadas a través de la clasificación no supervisada H-Alfa, es importante considerar que la misma puede ser aplicada durante la ocurrencia de eventos climáticos extremos dado la posibilidad única de adquirir imágenes radar en tales circunstancias. Además, en caso de tener la posibilidad de contar con

una imagen óptica durante un período de condiciones climáticas adversas, que permita determinar la superficie inundada de agua “libre” (sin cobertura vegetal), la técnica PolSAR mencionada podrá contribuir con la detección de aquellas áreas anegadas cubiertas por la vegetación en donde se produce el mecanismo de dispersión de doble rebote.

3.2 Validación de las técnicas

Para validar las técnicas utilizadas, se aplicaron las mismas en toda el área de estudio con objeto de determinar los sectores inundados (clase agua) y los no inundados (clase no agua). En la Tabla 9 se pueden apreciar las áreas determinadas por las distintas técnicas sobre el área de estudio, cuya superficie total es de 118.082,44 Ha. También se observan los porcentajes de la superficie inundada, detectados por cada método, en el área de interés. Del estudio de esta Tabla se desprenden que los algoritmos polarimétricos aplicados mostraron los siguientes porcentajes de superficie inundada: H-Alfa - Clasif. (13,61%) y H-Alfa (11,95%).

Tabla 9: Superficies inundada y no inundada determinadas por las técnicas PolSAR en al área de estudio dispuestas en orden decreciente.

TÉCNICAS	Sup. No Inundada (Ha)	Sup. Inundada (Ha)	Sup. Inundada (%)
H - Alfa - Clasif,	102093,95	16071,67	13,61
H - Alfa	104038,95	14113,31	11,95

A continuación, se efectuó la validación de las imágenes binarias (agua y no agua), derivadas de los algoritmos empleados, utilizando la matriz de error o confusión. Como áreas de control o de verdad del terreno, se emplearon las muestras obtenidas en campo (19) y otras (131) adquiridas sobre la imagen óptica RGB-118a5 (del 10/01/2017) a partir de la interpretación visual, dando un total de 150 áreas de test. Las mismas corresponden a las dos clases de interés: agua y no agua, que se encuentran presentes en las imágenes binarias a controlar.

Las Tablas 10 y 11 muestran las matrices de error ejecutadas para cada técnica considerada. En las mismas se observan las dos clases validadas (agua y no agua) y las exactitudes del productor y del usuario dadas en porcentaje (%), las mismas luego serán relacionadas con los errores de omisión y comisión.

Tabla 10: Matriz de error de la técnica H – Alfa.

	> ERROR MATRIX (pixel count)		
	> Referencia		
V_Classified	No Agua	Agua	Total
No Agua	34113	15049	49162
Agua	798	57000	57798
Total	34911	72049	106960
Exac. Productor [%]	98.7843	20.1196	
Exac. Usuario [%]	48.5118	95.5991	

Tabla 11: Matriz de error de la técnica H - Alfa - Clasif.

	> ERROR MATRIX (pixel count)		
	> Referencia		
V_Classified	No Agua	Agua	Total
No Agua	34066	15139	49205
Agua	800	56971	57771
Total	34866	72110	106976
Exac. Productor [%]	99.6861	33.5356	
Exac. Usuario [%]	69.2328	98.6152	

Abajo, en la Tabla 12, es posible observar los errores de omisión y comisión cometidos por cada técnica derivados de la matriz de error. Estos son importantes para conocer cuánto de menos ha detectado la inundación (error de omisión) o cuanto en exceso lo ha hecho (error de comisión) cada técnica.

Tabla 12: Errores de Omisión y Comisión de cada técnica presentados en orden creciente.

TECNICA	Errores (%)	No Agua	Agua
H - Alfa - Clasif,	Omisión	0,3	66,5
	Comisión	30,8	1,4
H - Alfa	Omisión	1,2	79,9
	Comisión	51,5	4,4

Del análisis del error de omisión (Tabla 12) de las técnicas PolSAR aplicadas a las imágenes SAR, surge que en ellas dicho error para la clase “agua” es alto y va desde 66,5% a 79,9%, es decir, los algoritmos están omitiendo en ese porcentaje la detección de áreas inundadas. También, es elevado el error de comisión para la clase “no agua” encontrándose el mismo en el rango de 30,8% a 51,5%, esto es, existe un exceso en la determinación de áreas no inundadas, lo cual es concordante con el déficit u omisión de la clase “agua”.

Por lo tanto, de esta validación queda claro que los algoritmos aplicados omiten la detección de áreas inundadas, indicando que la superficie total anegada determinada por los mismos es menor a lo señalado por las áreas de control de la verdad del terreno. Por el contrario, los algoritmos mostraron un error de omisión muy bajo (de 0,3% a 1,2%) para la clase “no agua”. También, es muy pequeño el error de comisión (de 1,4% a 4,4%) de la categoría “agua”. A continuación, la Tabla 13 muestra los índices de fiabilidad global (%) y Kappa determinados por la matriz de confusión para cada método.

Tabla 13: Índices de Fiabilidad global (%) y Kappa de cada técnica PolSAR.

TÉCNICAS	Fiabilidad global [%]	Kappa
H - Alfa - Clasif,	73,2	0,4
H - Alfa	54,1	0,2

En la Tabla 13 se puede observar un índice de Fiabilidad global de 73,2% para la técnica denominada H-Alfa - Clasif. Este supera al índice logrado por el algoritmo H-Alfa (54,1%). En cuanto al índice Kappa, este presenta un valor bajo (0,4) para H-Alfa - Clasif y muy bajo (0,2) para H-Alfa.

Continuando, la Figura 15 muestra la información generada a partir de la aplicación del algoritmo polarimétrico H-Alfa - Clasif. sobre la imagen SAR del día 14/01/2017. La misma corresponde a una cartografía temática de áreas inundadas, en el sector bajo estudio, ejecutada según la norma cartográfica de la Provincia de Santa Fe (SCIT-UNL, 2007) [19].

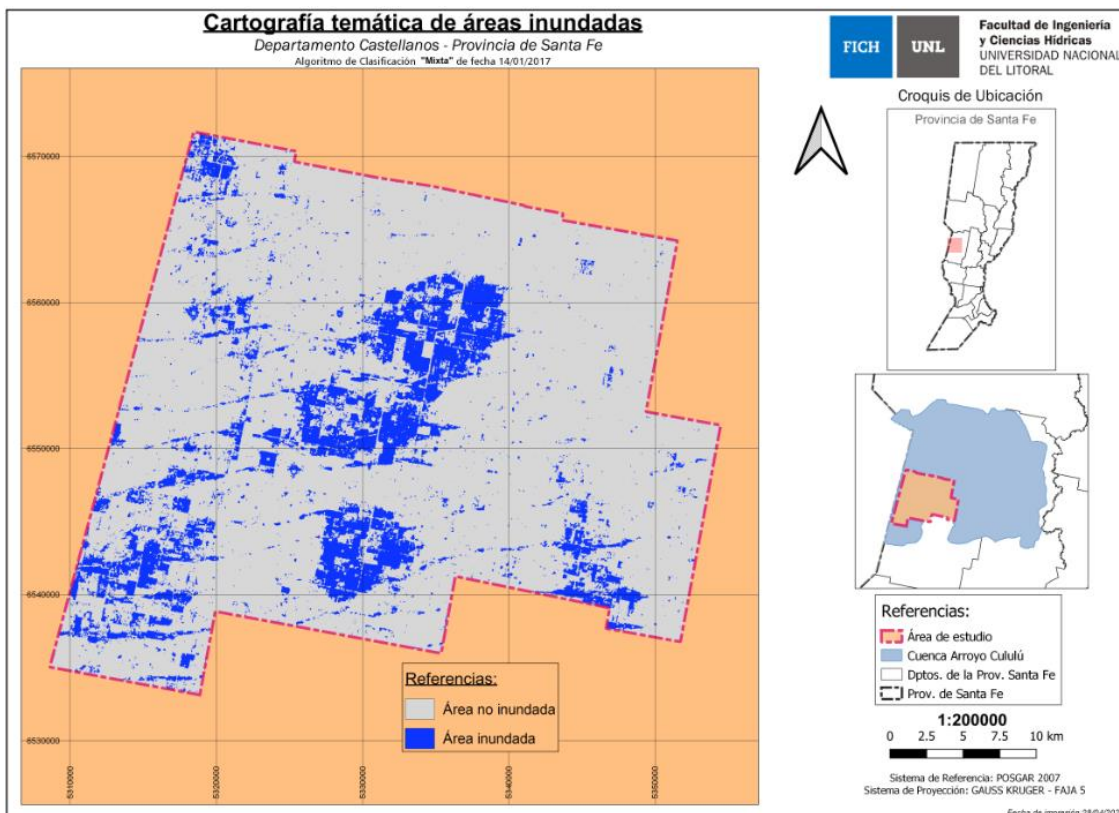


Figura 15: Cartografía temática de superficies inundadas en el área de estudio.

Conclusiones

En relación al objetivo general de esta investigación, se concluye que se consiguió determinar la superficie inundada en el área de estudio durante un evento climático extremo, a partir del uso de imágenes SAR en banda C y polarización dual (VV - VH).

Fue posible diferenciar algunos lotes inundados con cobertura de cultivos, en los cuales estos cubrían el agua. Particularmente, en los lotes con maíz se verificó la presencia del mecanismo de dispersión de doble rebote entre el agua y los tallos de las plantas. Sin embargo, este mecanismo de interacción no pudo ser comprobado en otros cultivos presentes en el área de estudio, tales como: soja, girasol y sorgo.

En cuanto a la validación de las técnicas PolSAR empleadas sobre el área de estudio, se aplicó la matriz de error considerando un número importante de muestras de la verdad del terreno (150). Se emplearon diversos indicadores generados por la misma, obteniendo un índice de fiabilidad global de 73,2% para H-Alfa - Clasif.

Otra ventaja del algoritmo seleccionado, es que el mismo permite generar los mapas temáticos de inundación a través de la aplicación de un procedimiento sencillo de cuatro pasos, que utiliza

como insumo básico una imagen SAR de descarga gratuita y se ejecuta a través de un programa de acceso libre.

Referencias por orden de citación

- [1] David Ford, Nathan Pingel, J. J. DeVries, "Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Applications Guide". HQ U.S. Army Corps of Engineers 441 G St., Washington - USA, 2002.
- [2] X. Shen, D. Wang, K. Mao, E. Anagnostou and Y. Hong, "Inundation Extent Mapping by Synthetic Aperture Radar: A Review", *Remote Sensing*, 11, 879, 2019.
- [3] MAH, UNL, INA, INTA, "Influencia de los Cambios Físicos y Climáticos en el Regimen de escurrimiento del Río Salado – Tramo Inferior". Informe Final Convenio MAH con UNL-INA-INTA, Santa Fe, Noviembre de 2007.
- [4] Servicio Meteorológico Nacional - SMN, "Estadísticas Meteorológicas", Buenos Aires, 2008.
- [5] Daniela Krohling y Ernesto Brunetto, "Bases Conceptuales para el Ordenamiento Territorial en el Medio Rural", Gobierno y UU NN de las Provincias de la Región Centro. Capítulo 26: Marco Geológico y Geomorfológico de la Cca. Cululú, pp. 483-511, 2013.
- [6] M. Iriondo, "Estudio Geomorfológico de la Cuenca del Río Salado en Santa Fe". Convenio UNL-INCYTH, Santa Fe, 1983.
- [7] M. Iriondo y E. Drago, "The headwater hydrographic characteristics of larga plains: the Pampa case. *Ecology Hydrology*, vol. 4, n° 1, pp. 7-16, 2004.
- [8] Servicio Meteorológico Nacional - SMN, "Informe de las precipitaciones ocurridas en Enero 2017", Buenos Aires, 2017.
- [9] S. Solbø and I. Solheim, "Towards Operational Flood Mapping with Satellite SAR", Norut Information Technology AS. Tromsø Science Park, N-9291 Tromsø, Norway, 2005.
- [10] N. Pierdicca, L. Pulvirenti, M. Chini, G. Boni, G. Squicciarino and L. Candela, "Flood Mapping by SAR: Possible approaches to mitigate errors due to ambiguous radar signatures", 2014.
- [11] Kefeng Ji y Yonghui Wu, "Scattering Mechanism Extraction by a Modified Cloude-Pottier Decomposition for Dual Polarization SAR", *Remote Sensing* 7, 7447-7470, 2015.
- [12] S. R. Cloude, "Radar Polarimetry and Interferometry: A Tutorial Introduction", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Newsletter*, June 2004.
- [13] S. R. Cloude and E. Pottier, "An Entropy Based Classification Scheme for Land Applications of Polarimetric SAR", *IEEE Trans. Geos. and Rem. Sens.*, vol. 35, n° 1, 1997.
- [14] Héctor Del Valle, "Radares de Apertura Sintética y su sinergia con datos ópticos", Curso 09, Centro Regional de Geomática (CEREGEO), Facultad de Ciencia y Tecnología (FCyT) Universidad Autónoma de Entre Ríos (UADER), 2017.
- [15] Mason D., Horritt M., Dall'Amico J., Scott T., and Bates P. "Improving river flood extent delineation from synthetic aperture radar using airborne laser altimetry", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(12), pp. 3932-3943, 2007.
- [16] Richards J., Woodgate P., and Skidmore A., "An explanation of enhanced radar backscattering from flooded forests", *International Journal of Remote Sensing*, 8(7), pp. 1093-1100, 1987.
- [17] Salvia Mercedes, "Aporte de la teledetección al estudio del funcionamiento del Macrosistema Delta del Paraná: análisis de series de tiempo y eventos extremos (Tesis doctoral). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Buenos Aires, 2010.
- [18] Podest Erika, "Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar o SAR)". NASA's Applied Remote Sensing Training Program, p.p. 56, 2017.

- [19] SCIT-UNL, "Norma Cartográfica de la Provincia de Santa Fe", Decreto N°0884/07. Santa Fe, 50 p., 2007.

CONTRIBUIÇÕES DAS CIÊNCIAS GEODÉSICAS PARA MONITORAMENTO AMBIENTAL E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Christian Pilapanta Amagua, Cláudia Pereira Krueger, Hideo Araki, Jorge Silva Centeno, Paulo de Oliveira Junior, Rodrigo de Campos Macedo, Tiago Lima Rodrigues

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

christian.pilapanta@ufpr.br

Resumo

No atual contexto de globalização, o crescimento populacional, a expansão da atividade econômica e da ocupação do solo, criaram problemas regionais que afetam extensas áreas e muitas vezes superam as fronteiras das agências de gerenciamento local. Por outro lado, os avanços em termos de coleta, processamento e análise de informações da superfície da Terra permitiram desenvolver ferramentas para o monitoramento ambiental e desenvolvimento sustentável. Muitas soluções podem ser encontradas nas Ciências Geodésicas, que envolvem a Geodésia, Cartografia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, e se dedicam ao desenvolvimento de métodos e soluções relacionados à informação espacial. Dentre as principais fontes de dados destacam-se as imagens de satélites, as imagens aéreas, as observações GNSS (*Global Navigation Satellite System*), nuvens de pontos de levantamento com laser scanner (aéreo ou terrestre), ou ainda dados de levantamentos topográficos e geodésicos obtidos com equipamentos específicos. Os dados processados muitas vezes são incorporados a bases de dados cartográficos precedentes que servem de referência para a obtenção de informações complementares. Neste contexto, as Ciências Geodésicas desempenham um papel importante porque servem de suporte para ações baseadas em informações espaciais atualizadas e de alta qualidade. Tais informações são disponibilizadas em tempo cada vez mais curto, muitas vezes em tempo real. Nesta contribuição são apresentados os mais recentes avanços e perspectivas nas Ciências Geodésicas, no contexto do monitoramento ambiental e desenvolvimento sustentável, mostrando exemplos da experiência do grupo de pesquisa em Ciências Geodésicas da UFPR, que envolvem o desenvolvimento de produtos para geolocalização e análises espaciais com ferramentas de Cartografia, Sensoriamento Remoto, Fotogrametria e Geodésia, mostrando como, sob diversos aspectos e em diferentes escalas, o uso das tecnologias e métodos empregados na área pode contribuir no alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Palavras-chave: ciências geodésicas, monitoramento ambiental, geolocalização, análises espaciais, desenvolvimento sustentável

Introdução

No mundo moderno a informação espacial é um elemento fundamental para a compreensão de um fenômeno que ocorre na superfície do planeta e para o conhecimento, ocupação e exploração organizada, justa e sustentável da superfície física da Terra. Com o decorrer dos anos, aumenta cada vez mais a necessidade de obtenção e disponibilidade de dados geoespaciais para a realização de diferentes atividades, quer seja em escala local ou regional. Os avanços em termos de coleta, processamento e análise de informações da superfície da Terra permitiram desenvolver ferramentas para o monitoramento ambiental e promoção do desenvolvimento sustentável. Dentre as principais fontes de dados destacam-se as imagens de satélites, as imagens aéreas, as observações GNSS (Global Navigation Satellite System), nuvens de pontos de levantamento com laser scanner (aéreo ou terrestre), ou ainda dados de levantamentos topográficos e geodésicos obtidos com equipamentos específicos. Neste contexto, as Ciências Geodésicas desempenham um papel importante porque servem de suporte para ações baseadas em informações espaciais atualizadas e de alta qualidade. Neste capítulo são apresentados exemplos da experiência do grupo de pesquisa em Ciências Geodésicas da UFPR, que envolvem o desenvolvimento de produtos para geolocalização e análises espaciais com ferramentas de Cartografia, Sensoriamento Remoto, Fotogrametria e Geodésia, mostrando como, sob diversos aspectos e em diferentes escalas, o uso das tecnologias e métodos empregados na área pode contribuir no alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS's). Ferramentas geoespaciais como o Sensoriamento Remoto (SR), o GNSS e os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), quando integradas, funcionam muito bem na coleta, análise e divulgação de informações diversas.

Ciências Geodésicas na UFPR

O Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná (UFPR) é a unidade administrativa de lotação dos professores que ministram disciplinas voltadas à formação de recursos humanos em Geodésia, Fotogrametria, Topografia, Cartografia, Geoprocessamento/SIG, Sensoriamento Remoto, Agrimensura, e Cadastro Territorial e que atendem, no nível de graduação, principalmente ao Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, criado em 1977 na UFPR e que em 2012 passou a se chamar Engenharia Cartográfica e de Agrimensura. Esta é a área da Engenharia responsável pelo levantamento e representação da superfície terrestre e exige o conhecimento de métodos e técnicas para coletar, processar e representar dados, para obter informações sobre a localização e dinâmica de fenômenos que ocorrem na superfície terrestre. Além do curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura, o Departamento de Geomática oferta disciplinas para outros cursos de graduação: Agronomia, Arquitetura, Engenharia Ambiental, Engenharia Civil, Engenharia Florestal, Geografia, Geologia e Zootecnia.

No âmbito da pós-graduação, o departamento apoia as atividades de pesquisa do Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG), e também presta apoio a outros cursos relacionados com o meio ambiente e engenharias. O PPGCG é um dos programas de pós-graduação mais antigos da UFPR, e completou 50 anos de história em 2021. O programa iniciou em nível de mestrado e em 1983 passou a contar com o nível de doutorado. Em 1996, passou por uma reestruturação, e hoje tem as áreas de concentração: Geodésia e Levantamentos, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, Cartografia e Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Atualmente, os projetos desenvolvidos nas diferentes áreas têm impacto em atividades relevantes para a sociedade, como:

- O desenvolvimento de métodos para mapeamento de áreas com grande vulnerabilidade social, econômica e ambiental;
- O desenvolvimento de métodos de mapeamento de baixo custo para aplicações em municípios de pequeno porte como ferramenta para o desenvolvimento sustentável;
- O desenvolvimento de sistemas de monitoramento de massas aplicados na prevenção de desastres naturais;
- O desenvolvimento de sistema para monitoramento de deslocamentos absolutos e relativos de pontos empregando-se Smart-Sensors (sensores inteligentes) de baixo custo;

- Calibração geométrica em órbita de sensores remotos imageadores orbitais e estudo do controle de qualidade das imagens provenientes;
- O levantamento geológico-estrutural da região e entorno de barragens;
- O processamento e análise de nuvens de pontos LiDAR, aéreo e terrestre, para a modelagem numérica do terreno, análise de ambientes urbanos e mapeamentos a curta distância para a geração de modelos BIM;
- O estudo sobre Sistemas Verticais de Referência, modernização da componente altimétrica do SGB e conexão com o futuro IHRS;
- Sistemas Geodésicos de Referência e Conexão de Redes Geodésicas;
- A calibração geométrica de sensores imageadores transportados por drones ou aviões, o controle de qualidade de suas imagens, e o estudo de seu potencial uso como ferramenta de apoio para estudos ambientais e mapeamento de baixo custo;
- O uso de métodos de inteligência artificial e processamento de imagens de satélite para o monitoramento de extensas áreas e estudo de problemas ambientais.

A maior parte dessas atividades possui suporte financeiro do setor privado ou da esfera pública, através de agências de fomento à pesquisa e extensão. Alguns exemplos das atividades desenvolvidas nesses projetos são apresentados a seguir.

PPP-RTK em suporte às atividades de monitoramento e navegação de segurança

Os Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) possibilitam estimar de forma contínua posições tridimensionais com alta precisão. O posicionamento pelo GNSS é essencial ao desenvolvimento tecnológico, haja vista que há vários setores impactados pela localização por satélite. Alguns exemplos: agricultura de precisão, monitoramento ambiental, veículos autônomos, navegação aérea, navegação marítima, mapeamento, *internet of things* (IoT), *smart cities*, e *big data*.

O PPP (*Precise Point Positioning*) é um método de posicionamento pelo GNSS baseado no conceito SSR (*State Space Representation*) (Wübbena et al., 2014). O PPP em tempo real (RT-PPP – *Real Time PPP*) com acurácia centimétrica é possível graças à disponibilidade de produtos precisos, para órbitas e relógios dos satélites GNSS, fornecidos pelo IGS (*International GNSS Service*), e por seus centros de análise, como o CNES (*Centre National d'Etudes Spatiales*). O chamado PPP-RTK apresenta-se como um método alternativo ou complementar ao atual método NRTK (*Network Real-Time Kinematic*) (Zou et al., 2018). Assim como no NRTK, um dos maiores desafios do PPP-RTK é a mitigação dos efeitos da atmosfera terrestre sobre os sinais eletromagnéticos do GNSS. Para corrigir os erros ocasionados pelas interações atmosféricas é fundamental observar que a atmosfera terrestre se divide em duas camadas, quando se considera sua influência sobre os sinais eletromagnéticos, sendo elas ionosfera e troposfera. Desse modo, é necessária uma modelagem específica para cada camada. São vários os trabalhos na literatura que empregam correções atmosféricas para melhorar o PPP-RTK tornando a qualidade da solução mais próxima do NRTK. O desempenho do PPP-RTK depende da topologia das redes de estações permanentes e das condições atmosféricas (Laurichesse & Privat, 2015; Oliveira Jr, 2017). O PPP-RTK apresenta algumas vantagens em termos de custo operacional e área de cobertura com redes de estações de referência ativas menos densas. Essa característica é interessante para os países da América do Sul que possuem vastas áreas e onde seria onerosa e complexa a instalação e manutenção de estações de referência com as as condições necessárias ao NRTK.

Na UFPR, têm sido realizados estudos sobre o PPP-RTK e a infraestrutura otimizada em termos de custos e benefícios para sua implementação na região brasileira. São investigadas possibilidades de melhorias nos algoritmos de modelagem dos efeitos da ionosfera e fixação das ambiguidades presentes nas medidas de fase, visando atender e otimizar as soluções PPP-RTK (Oliveira Jr et al., 2020). A estratégia se baseia em estimativas de atraso ionosférico nas estações

de referência, com mitigação das tendências instrumentais e posterior interpolação das correções para a posição do usuário. A combinação dessas estratégias é mais um aspecto dos trabalhos desenvolvidos na UFPR, além disso deve-se considerar ainda que tais correções são baseadas no conceito avançado SSR, e que o PPP-RTK é um método considerado “low cost” visando melhorias do desempenho da fixação das ambiguidades e redução do tempo necessário em campo. Os experimentos envolvendo PPP-RTK têm sido conduzidos em pesquisas de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, com enfoque em aplicações relacionadas ao monitoramento de eventos sismológicos, bem como à navegação aérea inteligente baseada no posicionamento por satélites voltada à otimização de operações com maior segurança e menor dispêndio de energia e recursos ambientais.

Sistemas GNSS como ferramenta para o monitoramento contínuo de processos físicos terrestres

Os sistemas GNSS têm contribuído substancialmente ao monitoramento em tempo real, destinado principalmente a caracterizar e compreender os mecanismos pelos quais os diferentes processos físicos da Terra Sólida são gerados. Neste sentido, um processo biogeoquímico de grande importância, devido a seus efeitos na definição e conceptualização dos diversos parâmetros geodésicos, e conseqüentemente, devido à potencialidade intrínseca de poder correlacionar suas implicações no estudo da variabilidade espaço-temporal do seu ambiente, é o denominado de ciclo hidrológico (Watanabe & Ortega, 2011). Esse ciclo encontra-se ligado à troca de água pelas múltiplas regiões da biosfera (atmosfera, oceanos, mares, rios, geleiras, águas superficiais, entre outros), produzindo o movimento das massas e conseqüentemente o sobrecarregamento e deformação da superfície terrestre.

A principal abordagem utilizada para a modelagem deste processo foi estabelecida por (Farrell, 1972) através da convolução espacial das Funções elásticas de Green (Longman, 1962) e a variação total das massas, fruto da força exercida pelos efeitos de carga. Estes efeitos, podem surgir de diversas fontes e com frequências e intervalos de tempo diferentes, no entanto, todos eles encontram-se baseados no Princípio de Conservação de Massas. Assim, por exemplo, a redistribuição de massa na atmosfera terrestre carrega sua superfície e a deforma. Este tipo de carga se produz por dois efeitos principais. O primeiro devido ao aquecimento solar e à força de gravidade, pelo qual o efeito de carga é chamado de Carga Atmosférica por efeito da maré (em inglês: Atmospheric Tidal Loading, ATL), e o segundo, devido ao movimento contínuo das massas de ar como parte do sistema climático local, que recebe o nome de Carga Atmosférica sem efeitos de maré (em inglês: Non-Tidal Atmospheric Loading, NTAL). Além da atmosfera, as mudanças na massa dos oceanos também geram pressão na superfície terrestre, e em função do período de oscilação dos seus harmônicos, esta carga também pode ser dividida em força de Carga Oceânica por efeito da maré (em inglês: Oceanic Tidal Loading, OTL) e força de Carga Oceânica sem efeitos de maré (em inglês: Non-Tidal Oceanic Loading, NTOL). Assim, a OTL refere-se ao processo pelo qual a redistribuição da água dos oceanos exerce uma força normal na superfície da Terra, e a NTOL, por sua vez, refere-se às variações de massa produzidas por instabilidades internas geradas principalmente pela sua interação com a atmosfera. Finalmente, existe um terceiro tipo de carga, denominada de Carga Hidrológica (em inglês: Hydrological Loading, HYDL), a qual é produzida pelas variações no armazenamento de água terrestre.

Dependendo da localização geográfica, os deslocamentos superficiais induzidos pelos efeitos de carga podem variar entre algumas décimas de milímetro até vários centímetros de amplitude, podendo ser inferidos através das observações dos sistemas GNSS com precisões submilimétricas. Desta maneira, as propriedades espaço-temporais dos deslocamentos podem ser exploradas para a caracterização da estrutura da Terra, bem como de processos correlacionados com ela. A título de exemplo, a Figura 1, apresenta a amplitude média do sinal HYDL obtido para um total de 514 estações GNSS de monitoramento contínuo pertencentes à rede SIRGAS-CON (Sánchez & Drewes, 2020), junto com 3 séries de coordenadas e seus respectivos sinais de carga para as estações NAUS (Manaus), POVE (Porto Velho) e PAIT (Itaituba); todas elas localizadas na Bacia do Rio Amazonas. Nesta, é possível observar como a amplitude encontra-se acima dos 15 mm, para a maior parte das estações, sendo o efeito maior naquelas estações localizadas

perto de vertentes de rios ou corpos de água. No que diz respeito a análise das séries temporais, é possível observar a presença de uma forte correlação entre o comportamento espaço-temporal das estações e o efeito de carga. Dito preceito, deu lugar ao advento de diversos estudos voltados à caracterização da variabilidade espacial do armazenamento total de água (em inglês: Total water storage, TWS), além de inúmeras outras aplicações de prospecção de dados por meio do uso das diferentes redes GNSS de monitoramento contínuo que existem no mundo (Ferreira et al., 2019).

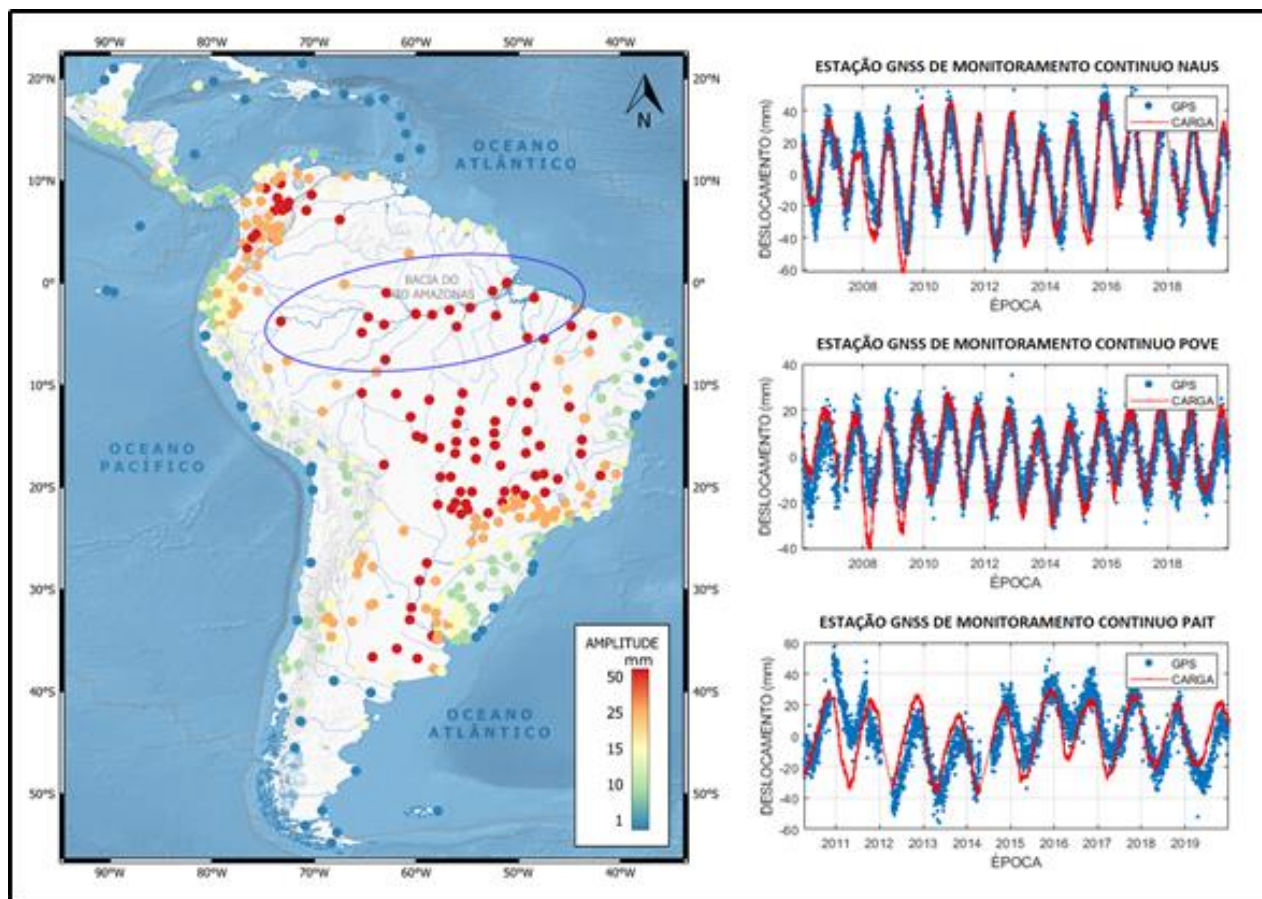


Figura 1. Amplitude média do efeito HYDL obtido entre os anos de 2000 e 2020 para a Rede SIRGAS-CON. Fonte: o Autor (2021)

Assim, seja qual for o objetivo, é evidente que a implementação dos sistemas GNSS como sistemas de monitoramento e observação terrestre tornou-se uma alternativa cada dia mais viável, principalmente naquelas regiões de difícil acesso, onde o monitoramento é difícil pela falta de infraestrutura adequada ou pelas próprias características físicas da região (Moreira et al., 2016). Na atualidade, os sistemas GNSS formam parte do denominado de Sistema Geodésico Global de Observação (GGOS) (Plag et al., 2009) e como tal, se constituem em uma ferramenta essencial no estudo dos diversos processos que se desenvolvem na Terra e sua abrangência só está limitada pela imaginação e os conhecimentos que cada pessoa possui sobre seu funcionamento e aplicabilidade.

Emprego do GNSS no monitoramento de massas de água visando colaborar com a prevenção de desastres naturais

Preocupado com as ações de prevenção de desastres naturais, o governo brasileiro criou, em 2010, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). No plano diretor, elaborado para os anos de 2019 a 2022, é destacado que a emissão de alertas é de

fundamental importância, e que deve ter confiabilidade e disponibilidade. Segundo Marcelino (2008), uma das principais ferramentas para a gestão de risco são as geotecnologias, representadas especialmente pelo Sistema de Informação Geográfica (SIG), o Sensoriamento Remoto (imagens de satélite) e os sistemas GNSS. Os últimos possibilitam o monitoramento contínuo, podendo ainda ser em tempo real. Aplicando esta tecnologia é possível ainda coletar, armazenar, analisar e disponibilizar grande quantidade de dados, em algumas áreas de risco onde, devido à extensão, seria inviável a obtenção de dados por métodos tradicionais. Internacionalmente, verifica-se o emprego de plataformas flutuantes onde são instalados receptores/antenas GNSS que realizam o monitoramento da variação das massas de água em tempo real, por meio de sistema de comunicação via satélite. Por exemplo, cita-se a GPS TMB (*Tide Monitoring Buoy*) que emprega para a transmissão o ARGOS.

Uma experiência pioneira no Brasil é o emprego da plataforma Euleriana Tryaxis (Krueger et al., 2013), adquirida pela Marinha do Brasil, com sistema GPS e IMU integrados. Após reduzir as medições ao mesmo referencial, foi realizada uma comparação entre as curvas de maré oriundas dos registros da boia GPS e de um marégrafo e constatou-se que a boia GPS pode ser utilizada como estação de apoio, ou mesmo de referência, nas reduções de sondagem. No entanto, como as observações do sistema da boia GPS apresentam oscilações de alta frequência, recomenda-se que as mesmas sejam eliminadas por meio de um filtro de média móvel. Ainda é indicado que se transporte o nível médio e o nível de redução de uma estação maregráfica principal para a posição da bóia, visto que, o período de observação de maré feita pela bóia GPS é, geralmente, inferior a um ano.

Em face das necessidades brasileiras e do custo mais elevado destas plataformas, desde 2006, o LAGEH (Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia) da UFPR, vem trabalhando no desenvolvimento de métodos e equipamentos com tecnologia nacional e de baixo custo de construção (Viski et al., 2011; Viski, 2017). De acordo com Euriques, Krueger e Viski (2017), este é um procedimento indispensável no planejamento e gestão de medidas aplicadas à prevenção ou na minimização dos efeitos causados por desastres naturais. Em 2015 foi desenvolvida a plataforma Euleriana de nível (PEN-01) de estrutura leve e construída com materiais recicláveis (Figura 2). Testes foram realizados com diferentes equipamentos, bem como diferentes configurações de processamento de dados foram aplicadas. A melhor configuração obtida foi para uma linha de base curta, com gravação dos dados a cada minuto pelas ondas portadoras L1 e L2 do sistema GPS. Esta configuração proporcionou soluções com 100% das ambiguidades fixadas e com precisão interna média de 1,5 centímetros e desvio padrão de 5 milímetros. Os resultados obtidos com o pós-processamento dos dados comprovaram que se pode obter alta precisão para o monitoramento das variações verticais do nível da água com esta plataforma. Em outros testes foi verificado que ela teve comportamento semelhante a um marégrafo de pressão instalado nas imediações, também apresentou um melhor desempenho para estudos cíclicos temporais de massas de água ou aplicações de emissão de alerta com variações superiores a 0,5m. Foi empregado um sistemas de transmissão de dados XBee e TK-103B, e constatou-se que em locais obstruídos por vegetação e construções o equipamento XBee, obteve um alcance aproximado de 900 metros entre o emissor e receptor para as condições destas obstruções. Neste protótipo foram empregadas baterias mantidas carregadas por uma placa solar o que proporcionou um período de 14 horas de coleta de informações.

Novos testes estão sendo desenvolvidos com relação a sensores de baixo custo; ao material isolante capaz de atenuar o efeito de multicaminho (AEM-03), o qual proporcionou redução média de cerca de 40% para as ondas portadoras; filtros adequados; influência dos parâmetros de calibração das antenas GNSS no posicionamento e quanto ao sistema de comunicação. O interesse é obter uma melhor qualidade no monitoramento das variações verticais do nível da água em tempo real.



Figura 2. Estrutura da PEN-01 em levantamento de campo. Fonte: VISKI, 2017.

Calibração geométrica em órbita de sensores remotos imageadores orbitais

Dados obtidos por sensores imageadores instalados em plataformas orbitais são importantes fontes de informações espaciais da superfície terrestre, úteis no monitoramento ambiental e ações para o desenvolvimento sustentável. Como exemplos pode-se citar os estudos da qualidade e quantidade de água em corpos hídricos, o monitoramento da alteração de cobertura de vegetação por ações naturais e/ou antrópicas, o monitoramento de conformidade ambiental em propriedades agrícolas, monitoramento de composição do solo, monitoramento temporal da temperatura, do crescimento urbano, dentre outros. Dentre algumas vantagens em relação aos métodos terrestres, têm-se: maior cobertura espacial da área monitorada, coleta de dados de maneira sistemática e não intrusiva, e possibilidade de aquisição de dados em áreas de difícil acesso.

Porém, em determinados casos, não basta identificar, mas é necessário quantificar a área ocupada pelos fenômenos estudados, para o desenvolvimento de estudos confiáveis que possam subsidiar o planejamento urbano, e ambiental, otimizado e eficaz. Isto propicia a melhor alocação de recursos financeiros e contribuições mais efetivas para o desenvolvimento sustentável. Nestes casos, é imprescindível que as informações espaciais obtidas a partir das imagens sejam as mais confiáveis e acuradas possíveis, no contexto da escala cartográfica adotada. Para isso, as imagens devem ser orientadas com relação a um sistema de referência do espaço objeto e, posteriormente, corrigidas geometricamente.

Dentro do contexto do processo de orientação físico (Kim e Dowman, 2006) são usados os parâmetros de orientação exterior (POE), os parâmetros de orientação interior (POI) e os chamados parâmetros de montagem (PM). Os valores destes dois últimos são normalmente estimados a partir de processos de medição em laboratório, previamente ao lançamento do satélite. No entanto, para atingir o completo potencial de exatidão geométrica de informações espaciais extraídas das imagens, os valores devem ser refinados/atualizados, periodicamente, após o satélite estar em órbita. Da mesma forma, é necessário o refinamento do alinhamento entre as bandas espectrais (Storey, Choate e Lee, 2014). Esses processos constituem a chamada calibração geométrica em órbita do sensor.

A calibração geométrica em órbita periódica torna-se necessária em função de basicamente dois problemas que contribuem para a instabilidade dos valores nominais, a saber: as acelerações e mudanças ambientais drásticas impostas durante o lançamento do satélite, e a influência termal do sol quando o satélite encontra-se em órbita (Jacobsen, 2005). Além disso, tem-se o próprio desgaste dos componentes internos constituintes do plano focal. Ao se manter um processo frequente de calibrações geométricas em órbita, têm-se valores mais confiáveis de POI, PM e ABE, isto é, mais próximos da realidade física no instante da formação da imagem. É importante mencionar que as atividades de calibração e validação (Cal/Val) são essenciais para o controle de qualidade de uma determinada missão, principalmente na fase de comissionamento (primeiros meses de atividade).

No contexto das pesquisas desenvolvidas no Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná (UFPR), calibrações geométricas em órbita de sensores têm sido realizadas. Como exemplos pode-se citar a calibração do sensor HRC (High Resolution Camera) do satélite CBERS 2B (China-Brazil Earth Resources Satellite 2B) (Rodrigues et al., 2016), do sensor PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping) do satélite ALOS-2 (Advanced Land Observing Satellite 2) (Rodrigues et al., 2017) e, em andamento, dos sensores MUX (Multispectral Camera) e WPM (Multispectral and Panchromatic Wide-Scan Camera) dos satélites CBERS 4 e CBERS 4A. Cabe ressaltar que as imagens CBERS são disponibilizadas gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), sendo uma das opções viáveis para atividades de monitoramento ambiental e planejamento ambiental e urbano.

Adicionalmente, também têm sido desenvolvidas pesquisas relacionadas ao estudo, adaptação e avaliação de diferentes modelagens matemáticas já existentes para a orientação rigorosa/física da(s) imagem(ns), bem como o desenvolvimento e proposição de novos modelos matemáticos. Como exemplo podem-se citar Rodrigues et al. (2015), Rodrigues et al. (2017), Rodrigues e Machado (2019) e Akiyama et al. (2021).

Avanços em sensoriamento remoto para monitoramento ambiental e desenvolvimento sustentável

O recente desenvolvimento tecnológico resultou em novos métodos para a obtenção de dados espaciais de forma mais eficiente e barata. Neste particular, destaca-se o sensoriamento remoto, ou a coleta de informações a distância, sem contato direto com a região ou objeto de estudo. As novas tecnologias trouxeram grande incentivo à utilização de dados e imagens orbitais para mapeamentos e, no âmbito urbano, trouxeram também novos desafios tecnológicos. Nesta seção são apresentados alguns exemplos de como os recentes avanços em sensoriamento remoto podem contribuir para o monitoramento ambiental e o desenvolvimento sustentável, com base na experiência do Departamento de Geomática e do PPGCG.

Um dos recentes avanços neste campo é a tecnologia LiDAR (ou também conhecida como varredura a laser), que permite a medição de coordenadas tridimensionais da superfície da Terra usando um dispositivo de medição a laser instalado em um avião, drone ou helicóptero sobrevoando a área de estudo. O resultado da varredura é um denso conjunto de pontos, com coordenadas tridimensionais, chamado de "nuvem de pontos". Esta nuvem não é uniforme e inclui pontos refletidos pelo terreno e outros objetos, como árvores e edifícios. Recentemente, as vantagens do processamento digital permitiram também obter uma densa nuvem de pontos similar, usando fotografias aéreas. Usando drones, várias imagens de um objeto podem ser adquiridas e processadas para calcular a posição de uma grande quantidade de pontos visíveis em pelo menos duas fotografias.

Com isto, o processamento de nuvens de pontos ganhou relevância como ferramenta no mapeamento ambiental. Através do processamento digital, é possível separar os pontos que atingem o chão e interpolar um modelo que represente a variação do terreno e outro que representa a geometria dos objetos acima do mesmo. Essas informações são relevantes para projetos de engenharia. Um exemplo de aplicação é a detecção de telhados e a estimativa da área coberta. Esta quantificação pode ser usada para fins de taxaço, mas também permite analisar o tamanho dos telhados para fins de captação de águas pluviais, como é mostrado em Amisse (2018). Tais informações possibilitam detectar edifícios adequados para a interceptação de águas pluviais e avaliar o benefício econômico.

O processamento das nuvens de pontos de telhados também permite estimar a forma, orientação e inclinação de cada elemento do telhado e com isso avaliar sua adequação à coleta de energia solar. Isto pode ser aplicado em duas fases. Em uma primeira fase se pode fazer um levantamento de uma área maior, para detectar os potenciais telhados considerando suas características geométricas, como mostra Silva (2013) Com uma nuvem de pontos mais densa, torna-se possível modelar com mais detalhe os elementos de cada telhado e assim avaliar seu potencial fotovoltaico, como é descrito em Amisse (2018). As variáveis geométricas relevantes

que podem ser extraídas, além da área de cada face do telhado, incluem a orientação do plano em relação ao norte, e sua inclinação. A inclinação dos painéis em relação à vertical é importante porque a produção de energia é máxima quando o sol está diretamente perpendicular aos painéis. Da mesma forma, a orientação dos painéis, que está fortemente condicionada pela orientação do telhado, responde pela incidência solar em cada painel e depende também da latitude local.

A modelagem tridimensional dos ambientes urbanos permite também analisar e modelar os caminhos do escoamento superficial e prever situações de concentração de escoamento e ocorrência de inundações, como é mostrado em Pereira (2012). A informação da altitude do terreno permite calcular a declividade e a direção do escoamento em cada local. Isto, somado ao mapeamento de obstáculos, como paredes, viabiliza a estimativa da direção do escoamento em cada ponto da área de estudo e o cálculo do acúmulo de escoamento ao longo do percurso. Esta informação é valiosa para projetos de drenagem e até ações de defesa civil em caso de enchentes.

Por outro lado, a disponibilidade de sensores orbitais com cada vez maior resolução espacial é uma vantagem na caracterização dos objetos presentes na cena. Tradicionalmente, imagens multiespectrais de sensoriamento remoto são usadas para classificar o uso e cobertura da terra de forma sistemática. Esta prática beneficia estudos ambientais, pois permite produzir mapas atualizados de extensas áreas, como toda uma bacia hidrográfica, e avaliar suas variações temporais. Em Casaroti (2020) é descrito um exemplo do uso da classificação orientada a objeto (GEOBIA) para a produção de mapas de uso e cobertura do solo que possam ser usados em modelos hidrológicos em escala global.

Com a disponibilidade de dados hiperespectrais, a possibilidade de discriminar objetos com características espectrais similares aumentou. Isto fomentou o desenvolvimento de novos métodos para a classificação destas imagens aliado a integração dos conhecimentos e informações obtidos através das novas tecnologias de inteligência artificial (por exemplo) aplicados aos problemas remanescentes das ciências geodésicas. O exemplo descrito em Jijón-Palma et al (2021) descreve como ferramentas de inteligência artificial podem ser usadas para o pré-processamento destes dados, com a finalidade de selecionar as bandas espectrais mais relevantes e também eliminar bandas ruidosas, bem como na fase de classificação.

Nos anos recentes, juntamente com a disponibilidade de dados abertos de Observação da Terra e de imagens de altíssima resolução espacial, a aprendizagem profunda (*deep learning*) de redes neurais têm recebido grande atenção. No sensoriamento remoto, o aprendizado profundo vem sendo usado no sensoriamento remoto com sucesso no âmbito de aplicações em segmentação, classificação e detecção de objetos (Hoeser e Kuenzer, 2020). Em 2020, o PPGCG passou a ofertar a disciplina de Deep Learning com base na linguagem e nas bibliotecas Python (OpenCV, scikit-learn, TensorFlow e Keras), e dentre as pesquisas atualmente em desenvolvimento pode-se citar a detecção de palmeiras com YOLO e a aplicação de ERSGAN na geração de modelos digitais de superfície.

Modelagem do crescimento urbano e projeção das tendências por meio de autômatos celulares

As condições urbano-ambientais têm-se deteriorado de maneira ostensiva em termos de impacto sobre a água, o solo, o ar e as áreas verdes. Isto, somado à alta incidência de fenômenos naturais que afetam regularmente a América Latina, e às limitadas condições econômicas e institucionais, transforma extensas áreas e seus centros urbanos em zonas extremamente vulneráveis física e socialmente (IPEA, 2016). Atualmente, mais de 54% da população mundial vive em áreas urbanas, sendo estimado que a população urbana alcance 66% em 2050 (ONU, 2018). De acordo com o IBGE, 84,72 % da população brasileira vive em áreas urbanas, sendo que Curitiba, a oitava cidade mais populosa, apresenta crescimento populacional de 0,83% enquanto a média do país é 0,79% (IBGE, 2021a).

O processo de ocupação e configuração da aglomeração metropolitana em Curitiba foi intenso e rápido nas últimas décadas do século XX, transpondo as fronteiras administrativas de Curitiba e

criando áreas contíguas de ocupação nos municípios vizinhos. Adicionalmente, as áreas urbanas representam o fator mais importante de comprometimento da qualidade hídrica dos mananciais da Região Metropolitana de Curitiba (LIMA, 2000).

O sensoriamento remoto tornou-se uma ferramenta indispensável no contexto do estudo das mudanças no ambiente urbano, pois permite observar extensas áreas de forma sistemática. Além do diagnóstico das mudanças de cobertura e uso da terra, é de grande valia os prognósticos das mudanças vindouras. A partir da mensuração/mapeamento das mudanças, é necessário analisá-las sob diversas abordagens. Neste sentido, a Geosimulação constitui uma ferramenta para o estudo de fenômenos urbanos, como é o caso da expansão urbana (Freitas e Araki, 2021).

Na modelagem com autômatos celulares, o espaço é representado por meio de uma grade regular bidimensional composta de células, cada qual com um conjunto finito de estados. O estado de cada célula é atualizado de acordo com uma regra de transição que leva em conta o estado prévio da célula e os estados das células vizinhas, de modo a reproduzir o padrão de dinâmica de uso da terra. As regras de transição consideram fatores tais como restrições legais, pressões econômicas, atrativos e facilidade de acesso, e considera camadas tais como planos diretores, parques, praças, e áreas de preservação ambiental. Os mapas de uso e cobertura e uso da terra, já existentes ou geradas a partir da classificação de imagens orbitais, permitem estimar processos e padrões de mudanças (tipos de transições e taxas de alterações). A calibração consiste na análise do desempenho do modelo com base na coincidência espacial entre a simulação a partir de uma época anterior e o uso da terra atual. Com o modelo calibrado, pode-se realizar projeções para um período futuro. Vale ressaltar que as modelagens representam a tendência do passado, e que, se estas se mantiverem, as simulações serão mais fiéis à realidade.

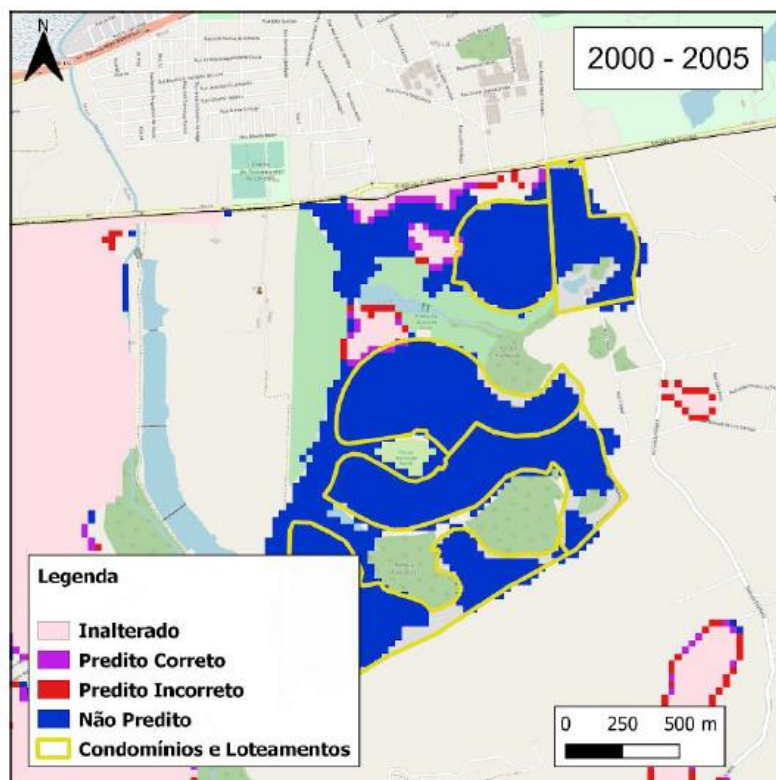


Figura 3. Recorte da modelagem para o período 2000-2005 para a região norte de Pinhais. Fonte: Peschl (2021).

Peschl (2021) realizou um estudo para a porção leste da Região Metropolitana de Curitiba (RMC) que abrange os municípios de Curitiba, Pinhais, Piraquara e São José dos Pinhais. Nestes municípios estão localizados os principais mananciais de abastecimento público de água da RMC. Foram utilizadas imagens Landsat classificadas de 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019, e as regras de transição consideraram fatores como distâncias a partir das estradas principais e da zona central,

declividade, densidade populacional e áreas restritas, conforme proposto por Kumar e Tripathy (2019). A Figura 3 ilustra a comparação entre a previsão realizada pelo modelo para 2005 e a ocupação do solo verdadeira naquele ano. Percebeu-se que houve crescimento não previsto por este modelo simples de autômato celular nos períodos 2000-2005, 2010-2015 e 2015-2019 em locais de loteamento e de ocupações irregulares, evidenciando a necessidade de refinamento dos parâmetros para melhorar a modelagem.

Estudos sobre Sistemas Verticais de Referência, modernização da componente altimétrica do SGB e conexão com o futuro IHRs

Idealmente, os dados geoespaciais planialtimétricos, ou puramente altimétricos, devem ser atuais, confiáveis e consistentes com as aplicações ambientais e de monitoramento, o que serve de base para aplicações como gerenciamento de recursos; planejamento urbano e rural; monitoramento de estruturas, de impactos ambientais e de efeitos climáticos; implantação de infraestrutura urbana; dentre outros. Em muitos casos, verifica-se a necessidade de se utilizar as altitudes físicas, como as ortométricas ou normais, ao invés das elipsoidais obtidas por posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*), pois as altitudes físicas apresentam correlação com o campo de gravidade da Terra real. Como exemplos de aplicações pode-se citar o planejamento, execução e monitoramento de barragens, de infraestruturas de saneamento, de gerenciamento de corpos d'água, de vias de transporte em geral e de distribuição de energia elétrica.

No contexto internacional, iniciativas promovidas pela Associação Internacional de Geodésia (IAG - *International Association of Geodesy*), como a criação do Sistema Global de Observação Geodésica (GGOS – *Global Geodetic Observing System*) e a busca de uma conexão global de observações geodésicas, confirmam este propósito. Em termos de unificação global, o estado da arte também aponta para a definição de um sistema de referência de alturas, o que foi indicado, em termos de definição e implementação, pela Resolução nº 01 de 2015 do IAG. Este é o Sistema Internacional de Referência de Altura (IHRs – *International Height Reference System*) e sua futura realização o *International Height Reference Frame* (IHRF). Vale ressaltar que seis estações no Brasil irão integrar o IHRF (IBGE, 2019). A ideia é que futuramente as altitudes no Brasil sejam densificadas a partir destas seis estações fiduciais.

No Brasil, desde a década de 40, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) mantém a Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), composta de estações geodésicas materializadas no terreno denominadas de Referências de Nível (RN). Grande parte da RAAP é referenciada ao Datum Vertical Brasileiro em Imbituba (DVBI), e uma pequena parte na região ao norte do Rio Amazonas, referenciada ao Datum Vertical Brasileiro em Santana (DVBS). Atualmente, há cerca de 66900 RRNN (plural de RN) implantadas pelo IBGE, distribuídas ao longo de todo o território brasileiro, com as altitudes normais estimadas a partir de medidas de desníveis obtidas por processos de nivelamento geométrico e dados de gravimétricos terrestres, com localização predominantemente ao longo de rodovias (Figura 4).

A fim de que uma informação geoespacial tridimensional tenha a componente altimétrica referenciada à um dos Data Verticais Brasileiros (DVB), é necessária a realização do transporte de altitude normal a partir de uma RN próxima. Normalmente, o transporte é realizado por meio de nivelamento geométrico ou de nivelamento trigonométrico. Porém, dependendo da distância a ser percorrida, o transporte por nivelamento pode se caracterizar como oneroso ou até impraticável, tanto em termos de recursos financeiros quanto em termos de tempo de planejamento, execução e processamento dos dados medidos em campo. Na região amazônica tem-se o pior caso, alcançando-se centenas de quilômetros (Figura 4).

Atualmente, com o posicionamento GNSS, as altitudes elipsoidais são facilmente obtidas, com possibilidade de precisão submilimétrica, o que representa uma alternativa ao processo de nivelamento. Porém, conforme mencionado, há de se considerar o fato de este tipo de altitude não ser o ideal para uma gama de aplicações. Assim, há a necessidade da conversão das altitudes elipsoidais em altitudes ortométricas ou normais, utilizando para tal propósito um modelo geoidal

ou de quase-geoide, respectivamente. Estes podem ser obtidos a partir da integração de Modelos Geopotenciais Globais (MGG), com dados de gravimetria e de topografia da superfície terrestre, provenientes, por exemplo, de Modelos Digitais de Terreno (MDT) ou de superfície (MDS).

No Brasil, tem-se o bem conhecido modelo geoidal MAPGEO, desenvolvido no âmbito de uma parceria de pesquisa científica entre o IBGE e a Universidade de São Paulo (USP), com sua última versão sendo o MAPGEO2015. Porém, conforme indicado em IBGE (2021c), ainda não se tem modelos gravimétricos de quase-geoide, de fato, referenciados ao DVBI e ao DVBS. Assim sendo, no âmbito do PPGCG, dentro do grupo de estudo sem Otimização de Levantamentos Geodésicos, pesquisas relacionadas a esta e outras questões em aberto têm sido investigadas. Como exemplo de outras questões pode-se citar: a futura conexão da RAAP ao IHRIS (De Freitas, Ferreira e Luz, 2018; Nicacio e Dalazoana, 2019; Dalazoana e De Freitas, 2020; Rodrigues e Delgado, 2022); contribuições ao estabelecimento do IHRIS no Brasil (Rodrigues, 2021); os estudos de conexão entre data verticais locais (Moreira e De Freitas, 2016; Sánchez e De Freitas, 2016; Jaramillo, De Freitas e Luz, 2019); desenvolvimento, melhoria e avaliação de modelos a partir da disponibilidade e investigação de dados mais recentes e precisos de MGG, de campo de gravidade marinhos, de MDT/MDS, e de gravidade terrestres, aéreos e marítimos (Nicacio, Dalazoana e De Freitas, 2018; Jesus e De Freitas, 2020; Jaramillo e De Freitas, 2021); integração dos Referenciais Verticais Terrestre e Oceânico (Santana e Dalazoana, 2020); e análise da variação temporal de componentes altimétricas (Silva, De Freitas e Dalazoana, 2016; Cagido e Dalazoana, 2018; Castro e De Freitas, 2021).

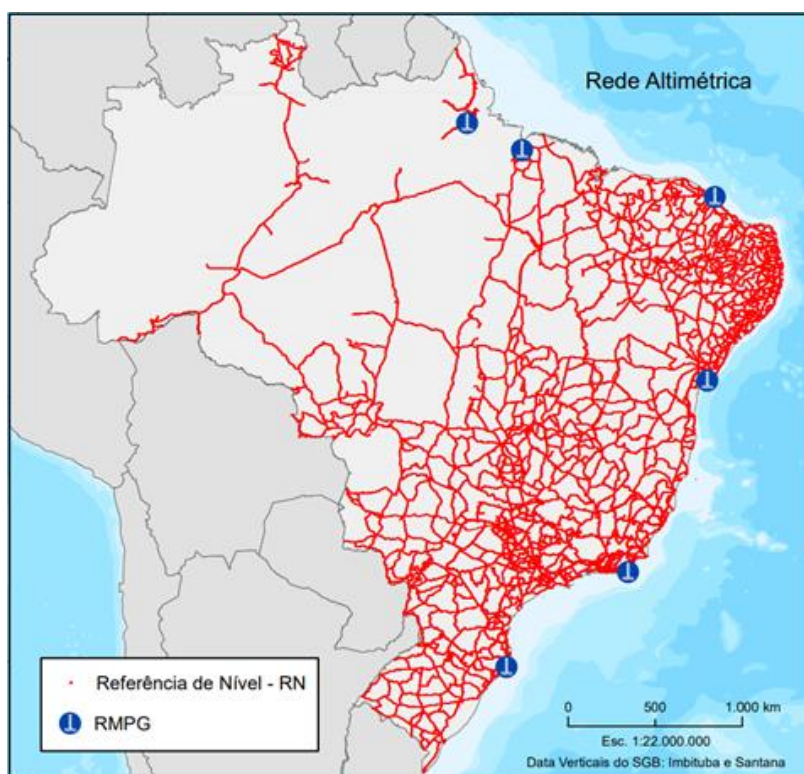


Figura 4. Distribuição das RRNN no Brasil. Fonte: IBGE (2021b).

Outro ponto é que o grupo de pesquisas vem contribuindo com os objetivos do Grupo de Trabalho III (SIRGAS GTIII), no sentido de procurar estabelecer uma rede vertical unificada na América do Sul, Central e Caribe, com sentido físico, vinculada a um Sistema Global de Altitudes. Isso para que se tenha um sistema vertical único que atenda de forma adequada a referência espacial dos dados em toda a área de abrangência do SIRGAS. Além disso, parcerias com instituições nacionais e internacionais vêm sendo realizadas, como o IBGE e IAG/USP, no Brasil; DGFI (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut) e Karlsruhe Institute of Technology (KIT), na Alemanha; a Hohai University (HU), na China; Universidad de La Plata, na Argentina; Universidad de Las Fuerzas Armadas, no Equador; e Universidad de Concepción, no Chile.

Considerações finais

O recente desenvolvimento tecnológico resultou em novos métodos para a obtenção de dados espaciais de forma mais eficiente e barata.

As pesquisas realizadas na UFPR têm contribuído com vários aspectos relacionados às geociências em suporte ao monitoramento e prevenção de desastres naturais. Em termos de Geodésia espacial, destaca-se o desenvolvimento e avaliação de alternativas para posicionamento pelo GNSS em tempo real. Em termos de Sensoriamento Remoto, as novas tecnologias trouxeram grande incentivo à utilização de dados e imagens orbitais para mapeamentos e, no âmbito urbano, trouxeram também novos desafios tecnológicos.

Estes e outros avanços ampliam as possibilidades de descrever uma região com maior detalhe e acurácia e propor soluções. As novas ferramentas permitem realizar o monitoramento ambiental de extensas áreas de forma sistemática. Ainda, permitem obter muitos dados atualizados, alguns em tempo real, para descrever as alterações do meio ambiente resultantes da ação antrópica ou natural e com isso tornam-se um suporte para a construção de uma sociedade sustentável.

Referências bibliográficas

- Akiyama, T. S., Marcato Junior, J., Tommaselli, A. M. G., Rodrigues, T. L. e Estrabis, N. V. (2021). Orientação Exterior de Imagens CBERS-4/PAN Utilizando Modelos Rigorosos. *Revista Brasileira de Cartografia*, 73, 2, 329-339.
- Amisse, C. (2018). *Modelagem 3D de telhados de edificações singulares a partir de imagens UAV para estimativa do potencial fotovoltaico e coleta de água pluvial*. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná.
- Baggio Filho, H. (junho, 2012). Rainfalls and natural disasters: the 2011- 2012 events in Minas Gerais State Brazil. *Natural Hazards – Research on natural disasters, civil defense, disaster prevention, and aid*, DAAD, Petrópolis, Rio de Janeiro.
- Cagido, A. C. e Dalazoana, R. (2018). Análise da Variação Temporal das Altitudes Elipsoidais e Ortométricas em Estações da RBMC a Partir de Dados GNSS e Dados GRACE. *Revista Brasileira de Cartografia (Online)*, 70, 453-485.
- Casaroti, C.J. (2020). *Feature selection for land cover classification using object-based approach for global application hydrological models*. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná.
- Castro, H. D. M. e De Freitas, S. R. C. (2021). Implications of the temporal variations of geoid heights over South American vertical reference frames. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 185.
- Dalazoana, R. e De Freitas, S. R. C. (2020). Sistemas Geodésicos de Referência: Rumo ao GGRS/GGRF. *Revista Brasileira de Cartografia (Online)*, 72, 962-982.
- De Freitas, S. R. C., Ferreira, V. G. e Luz, R. T. (2018). Efforts for aligning the Brazilian Height System to the International Height Reference System. *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik*, 2018, 75-82.
- Delgado, R. E. e Rodrigues, T. L. (2022). Use of GNSS and refined global geopotential model data for determining normal heights referred to the Imituba Brazilian Vertical Datum and International Height Reference System. *Boletim de Ciências Geodésicas (Online)*, no prelo.
- Euriques, J. F., Krueger, C. P. e Viski, R. A. (2017). Análise das variações das altitudes obtidas com RTK visando o monitoramento de massas de água por meio de plataformas Eulerianas. *Revista Brasileira de Geomática*, v.05, n.2, 126-148.

- Farrell, W. E. (1972). Deformation of the Earth by surface loads. *Reviews of Geophysics*, 10(3), 761.
- Ferreira, V. G., Montecino, H. D., Ndehedehe, C. E., del Rio, R. A., Cuevas, A. e de Freitas, S. R. C. (2019). Determining seasonal displacements of Earth's crust in South America using observations from space-borne geodetic sensors and surface-loading models. *Earth, Planets and Space*, 71(1), 84.
- Fraser, C.S., Dial, G. e Grodecki, J. (2006). Sensor orientation via RPCs. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 60, 182-194.
- Freitas, E. e Araki, H. (2021) .Simulation of urban growth: a case study for Curitiba City, Brazil. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 27 (spe). <https://doi.org/10.1590/s1982-21702021000s00019>
- Hoeser, T. e Kuenzer, C. (2020). Object detection and image segmentation with deep learning on earth observation data: a review – part I: evolution and recent trends. *Remote Sensing*, 12, 1667.
- Huinca, S. C. M., Krueger, C.P., Heck, B.; Mayer, M. e Knöpfler, A. (2014). BCAL/UFPR - The GNSS Antenna Calibration Service of Latin America. *International Association of Geodesy Symposia*, v. 143,1-12.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019) - *Reajustamento da rede altimétrica com números geopotenciais* / IBGE, Coordenação de Geodésia. 2ª ed., Rio de Janeiro.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021a). Curitiba. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/curitiba/panorama>>. Acesso em 23, abril de 2021.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021b). Mapa das redes do Sistema Geodésico Brasileiro 2021. Disponível em: <https://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/mapas_do_brasil/redes_geodesicas/mapa_rede_s_geodesicas_2021.pdf>. Acesso em 20, dezembro de 2021.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021c). Mapa das redes do Sistema Geodésico Brasileiro 2021. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/geociencias/modelos-digitais-de-superficie/modelos-digitais-de-superficie/31283-hgeohnor2020-modeloconversaoaltitudesgeometricasgnss-datumverticalsgb.html>>. Acesso em 20, dezembro de 2021.
- IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2016). *Relatório brasileiro para Habitat III*. Disponível em: <<https://uploads.habitat3.org/hb3/National-Report-LAC-Brazil-Portuguese.pdf>>. Acesso em 21, dezembro de 2021.
- Jacobsen, K. (Outubro, 2005). Geometry of satellite images – calibration and mathematical models. *Korean Society of Remote Sensing - ISPRS international conference*, Jeju.
- Jaramillo, A. S. e De Freitas, S. R. C. (2021). Geração de Funcionais da Gravidade a partir de Observações Aerogravimétricas e de Modelos Geodésicos Globais. *Revista Brasileira de Cartografia* (Online), 73, 245-260.
- Jaramillo, A. S., De Freitas, S. R. C. e Luz, R. T. (2019). Physical connection between BVRF segments based on leveling associated with gravimetry. *Boletim de Ciências Geodésicas* (Online), 25, 1-16.
- Jesus, R. M. L., De Freitas, S. R. C. e Luz, R. T. (2020). Potencialidade do Uso de Dados Geofísicos Aerolevantados para Aplicações Geodésicas. *Revista Brasileira de Cartografia* (Online), 72, 19-33.
- Jijón-Palma, M.E., Kern, J., Amisse, C. e Centeno J.A.S. (2021). Improving stacked-autoencoders with 1D convolutional-nets for hyperspectral image land-cover classification. *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 2, Nro. 2. pág:026506
- Kim, T. e Dowman, I. (2006). Comparison of two physical sensor models for satellite images: Position-Rotation model and Orbit-Attitude model. *The Photogrammetric Record*, 21, 114, 110–123.

- Kumar, A. e Tripathy, P. (2019). Monitoring and modelling spatial-temporal urban growth of Delhi using Cellular Automata and geoinformatics. *Cities*, Vol. 90.
- Krueger, C.P., Da Silva, G.N. e de Souza, A.V. (2013). Utilização da Boia GPS Hydrolevel na Redução da Sondagem. *Anais Hidrográficos*, DH3, LXIX.
- Laurichesse, D. e Privat, A. (Setembro, 2015). An Open-source PPP Client Implementation for the CNES PPP-WIZARD Demonstrator. trabalho apresentado em *Proceedings of ION GNSS*. Tampa, Florida, USA.
- Lima, C. A. (2000). *A ocupação de área de mananciais na Região Metropolitana de Curitiba: do planejamento à gestão ambiental urbana - metropolitana*. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento). Universidade Federal do Paraná.
- Longman, I. M. (1962). A Green's function for determining the deformation of the Earth under surface mass loads: 1. *Theory*. *Journal of Geophysical Research*, 67(2), 845–850. <https://doi.org/10.1029/JZ067i002p00845>
- Marcelino, E. V. (2008). Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos. *Caderno Didático* nº 1. INPE/CRS, Santa Maria.
- Monico, J. F. G. (2008). *Posicionamento pelo GNSS descrição, fundamentos e aplicações*. Editora UNESP.
- Moreira, R. M. e De Freitas, S. R. C. (2016). Conexão de Sistemas Verticais de Referência locais ao Sistema Geodésico Brasileiro com base em um Sistema Vertical de Referência global. *Boletim de Ciências Geodésicas* (Online), 22, 232-247.
- Moreira, D. M., Calmant, S., Perosanz, F., Xavier, L., Rotunno Filho, O. C., Seyler, F. e Monteiro, A. C. (2016). Comparisons of observed and modeled elastic responses to hydrological loading in the Amazon basin. *Geophysical Research Letters*, 43(18), 9604–9610. <https://doi.org/10.1002/2016GL070265>
- Nicacio, E. e Dalazoana, R. (2019). O emprego da Solução do Problema de Valor de Contorno da Geodésia à Vinculação Nacional a um Sistema Vertical de Referência Global: uma Revisão Conceitual. *Revista Brasileira de Cartografia* (Online), 71, 122-148.
- Nicacio, E., Dalazoana, R e De Freitas, S. R. C. (2018). Evaluation of recent combined global geopotential models in Brazil. *Journal of Geodetic Science*, 8, 72-82.
- Oliveira Jr, P. S. (2017). *Definition and Implementation of a New Service for Precise GNSS Positioning*. CNAM and Unesp.
- Oliveira Jr, P. S., Monico, J. F. G. e Morel, L. (2020). Mitigation of receiver biases in ionospheric observables from PPP with ambiguity resolution. *Advances in Space Research*, 65(8), 1941–1950. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.01.037>
- Oliveira Jr., P. S., Morel, L., Fund, F., Legros, R., Monico, J. F. G., Durand, S. e Durand, F. (2017). Modeling tropospheric wet delays with dense and sparse network configurations for PPP-RTK. *GPS Solutions*, 21(1), 237–250.
- ONU (2018). The World's Cities in 2018: Data Booklet. Disponível em <https://www.un.org/en/events/citiesday/assets/pdf/the_worlds_cities_in_2018_data_booklet.pdf>. Acesso em 23, abril de 2021.
- Pereira, G.H.A. (2012). *Avaliação do uso combinado de métodos de modelagem da direção do escoamento superficial e modelos digitais de superfície derivados de laser scanner em regiões urbanas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná.
- Peschl, H. (2021). *Modelagem do crescimento urbano com autômatos celulares: estudo de caso para Curitiba e região*. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura. Universidade Federal do Paraná.
- Plag, H. P., Rothacher, M., Pearlman, M., Neilan, R. e Ma, C. (2009). The Global Geodetic Observing System. In *Advances in Geosciences* (pp. 105–127). World Scientific.

- Rodrigues, T. L. (Novembro, 2021). Análise do efeito RTM para a futura estação IHRS PPTe a partir da integração de diferentes métodos, com correção harmônica e uso de modelo de densidades global. Trabalho apresentado no *Simpósio SIRGAS 2021*, online.
- Rodrigues, T. L. e Machado, M. V. (2019). A novel model for orientation of linear optical satellite images based in the adaptation of the orbit-attitude model. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 25, 3, 1-17.
- Rodrigues, T. L., Machado, M. V., Debiasi, P., Mitishita, E. A. e Ferreira, L. D. D. (2016). Calibração geométrica em órbita do sensor HRC-CBERS 2B. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 22 1, 1413-4853.
- Rodrigues, T. L., Mitishita, E. A. e Ferreira, L. D. D. (2015). Orientação de imagens PRISM – ALOS utilizando diferentes modelos de plataforma. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 21, 2, 409-432.
- Rodrigues, T. L., Mitishita, E. A., Ferreira, L. D. D. e Tommaselli, A. M. G. (2017). Accuracy Improvements in the Orientation of ALOS PRISM Images Using IOP Estimation and UCL Kepler Platform Model. *Remote Sensing*, 9, 7, 634-665.
- Sánchez, J. L. C. e De Freitas, S. R. C. (2016). Estudo do Sistema Vertical de Referência do Equador no contexto da unificação do datum vertical. *Boletim de Ciências Geodésicas (Online)*, 22, 248-264.
- Sánchez, L. e Drewes, H. (2020). Geodetic Monitoring of the Variable Surface Deformation in Latin America. *International Association of Geodesy Symposia Series*, Vol 152
- Santana, T. A. e Dalazoana, R. (2020). Integração dos Referenciais Verticais Terrestre e Oceânico: Conceitos Relacionados, Projetos Desenvolvidos e Desafios. *Revista Brasileira de Cartografia (Online)*, 72, 345-364.
- Sanz Subirana, J., Juan Zornoza, J. M. e Hernández-Pajares, M. (2013). *Fundamentals and algorithms. Vol. 1. Vol. 1.* ESA Communications.
- Silva, K.S. (2013). *Metodologia para análise preliminar da disponibilidade de áreas para implantação de painéis solares fotovoltaicos com dados LIDAR.* Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná.
- Silva, L. M., De Freitas, S. R. C. e Dalazoana, R. (2016). Análise de séries temporais maregráficas correlacionadas com observações GNSS no Datum Vertical Brasileiro de Imbituba - SC. *Revista Brasileira de Cartografia (Online)*, 68, 73-90.
- Siqueira, K.W.de S., Krueger, C.P., Dos Santos, D.R., Viski, A. R. e Da Costa, C.R. (2017). Filtragem adaptativa de Kalman aplicada a altitudes elipsoidais obtidas por receptores GPS visando o monitoramento de massas de água. *Revista Brasileira de Geomática*, v.05, n.2, 126-148.
- Storey, J., Choate, M. e Lee, K. (2014). Landsat 8 Operational Land Imager On-Orbit Geometric Calibration and Performance. *Remote Sensing*, 6, 11127-11152.
- Viski, A. R., Werlich, R. M. C., Krueger, C.P., Huinca, S. C. M., Leandro, D., Bleninger, T. e Fernandes, C. V. S. (2011). Prototypes of Monitoring Devices for Water Levels and Currents in Coastal Waters. *Journal of Coastal Research* SI 64, 618-621, ISSN 0749-0208.
- Viski, A. R. (2017). *Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento de Massas de Água por Meio de Plataformas Eulerianas e Sensores de Baixo Custo Aplicados na Prevenção de Desastres Naturais*. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Universidade Federal do Paraná,
- Watanabe, M. D. B. e Ortega, E. (2011). Ecosystem services and biogeochemical cycles on a global scale: Valuation of water, carbon and nitrogen processes. *Environmental Science and Policy*, 14(6), 594–604.
- Wübbena, G., Schmitz, M. e Bagge, A. (Junho, 2014). PPP with ambiguity resolution (AR) using RTCM-SSR. Trabalho apresentado no *IGS Workshop, Pasadena, CA, USA*.

Zou, X., Wang, Y., Deng, C., Tang, W., Li, Z., Cui, J., Wang, C. e Shi, C. (2018). Instantaneous BDS + GPS undifferenced NRTK positioning with dynamic atmospheric constraints. *GPS Solutions*, 22(1).

APRENDIZAJE AUTOMÁTICO PARA LA CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES DEL RÍO PARANÁ CON SENTINEL 2

Gianfranco Fagioli¹; Virginia Venturini^{1,2}; Zuleica Marchetti^{1,2}; Elisabet Walker^{1,2}

¹Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina

²CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), Argentina

vventurini@fich.unl.edu.ar

Resumen

El cambio climático se hace sentir en todo el mundo, causando desastres naturales de toda índole. Frente a estas catástrofes, es fundamental una gestión eficiente que tome decisiones rápidas para minimizar los daños, lo cual es una preocupación latente en los gobiernos locales y regionales y en la comunidad científica.

En la Argentina, las regiones Pampeana y Litoral representan un recurso estratégico en sí mismo, ya que no solo engloban la mayor riqueza fluvial y pluvial y en ellas se encuentran los centros urbanos con mayor población. Sin embargo, estas dos regiones son muy afectadas por frecuentes anegamientos de los humedales y alteración de la hidrodinámica de los cursos de agua.

En este trabajo se propone el desarrollo el monitoreo de los humedales de los sistemas fluviales de llanura haciendo foco en ambientes donde coexisten el agua libre y la vegetación acuático-palustre, debido a que la presencia de vegetación enmascara las áreas anegadas, ocultando así los primeros indicios de las variaciones de los niveles de los ríos.

Para el desarrollo de este trabajo se adoptó un enfoque estadístico, que utiliza imágenes satelitales y modelos de aprendizaje automático. Se seleccionaron imágenes de la misión Sentinel con la que se entrenaron distintos modelos de clasificación y se realizaron los análisis de desempeño de los mismos. El método Random Forest fue el que mejor desempeño mostró para la clase vegetación-agua. Todos los métodos probados fueron eficientes para en detectar las clases agua, ciudades y vegetación.

Palabras clave: *segmentación, Sentinel 2, aprendizaje automático, humedales fluviales*

Introducción

Los humedales en general, y entre ellos, las planicies de inundación de los ríos en particular, presentan características que hacen que su monitoreo sea difícil de realizar por métodos tradicionales (registros in situ). Esto es aún más evidente durante un evento hídrico extremo dado que la vegetación, adaptada a la dinámica de los humedales, enmascara la presencia de agua. La información a tiempo cuasi-real relacionada a estos ambientes, adquiere especial importancia en la gestión de una emergencia de origen hídrico, en la que la comunidad y sus servicios básicos son amenazados.

Bajo el término de humedales se conoce una variedad de ambientes que presentan al menos una de las siguientes características; 1- el sustrato es predominantemente un suelo hídrico no saturado o el sustrato no es suelo y está saturado con agua o cubierto con aguas someras por algún tiempo, particularmente durante la estación de crecimiento de cada año, 2- posee suelos donde dominan procesos anaeróbicos y se fuerza a la biota, particularmente a las plantas arraigadas, a presentar adaptaciones para tolerar la inundación, y 3- posee plantas hidrófitas al menos periódicamente (Minotti, Ramonell y Kandus, 2013).

El creciente interés por los humedales, se debe en gran parte, al reconocimiento de la cantidad y variedad de servicios ecosistémicos que cumplen; proporcionan alimento y materia prima, almacenan carbón, filtran contaminación, controlan inundaciones, proporcionan protección para las poblaciones litorales y constituyen hábitats para diferentes especies de flora y fauna (Kandus, Morandeira y Schivo, 2010; Tiner, Lang y Klemas, 2015). A mayor escala influyen en el clima regional amortiguando el cambio climático y contribuyen en la sostenibilidad ambiental local y global.

Los humedales fluviales como los que componen las planicies de inundación de los grandes ríos americanos no pueden ser individualizados y representados en cartografía. Por el contrario, presentan diferentes grados de conectividad hídrica, y de acuerdo a las fases hidrológicas pueden estar completamente inundados sin diferenciación de límites o, estar completamente secos, y estar limitada la presencia de agua en superficie solo al curso principal y sus secundarios. Por esta razón, no se habla de humedales, sino de paisaje de humedales donde el arreglo de elementos del paisaje conforma mosaicos integrados por la red hídrica tanto superficial como profunda pudiendo tanto la matriz como los parches ser todos humedales (Minotti et al. 2013).

En estos humedales, la conectividad hídrica inicia cuando los ríos comienzan a incrementar su caudal, y cuando éste excede el nivel de desborde, el área cubierta por agua se incrementa hasta su máxima expresión. El incremento del nivel de la red de drenaje y el patrón de inundación asociado, son claves para generar alertas de inundaciones que faciliten la gestión de la emergencia hídrica. Así, el monitoreo del avance de la inundación, se torna indispensable para la gestión mencionada (Marchetti, Minotti, Ramonell, Schivo y Kandus, 2016).

En un paisaje de humedales como el aludido en párrafos precedentes, el monitoreo basado en los mapeos de precisión donde los humedales son individualizados es ineficiente. Ello se debe no sólo al tamaño de los mismos y a la inaccesibilidad de las zonas donde se ubican (cobertura de vegetación, hidrología y topografía hacen que los estudios de terreno sean difíciles y costosos), sino a las características y dinámicas propias de estos paisajes.

En la actualidad, grandes cantidades de datos están siendo producidos por satélites con diferentes sensores a bordo, los cuales, durante las últimas dos décadas, se han utilizado ampliamente para actualizar la cartografía y para el seguimiento de distintos fenómenos naturales a nivel mundial. Así, los enfoques de monitoreo y detección remota han abordado efectivamente gran parte de las dificultades propias de los enfoques tradicionales como lo son la accesibilidad y repetibilidad. Un ejemplo de esto es la Misión Sentinel dirigida por la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) cuyo objetivo es apoyar la generación de políticas para el monitoreo global del medio ambiente, para lo cual ofrece imágenes de alta resolución espacial, temporal y espectral, combinando sensores ópticos, de radar y térmicos obtenidos por sus satélites.

Aprovechando esta información proveniente de este tipo de satélites, los algoritmos de aprendizaje automático se han convertido en una parte integral en estudios de teledetección en los últimos años debido a su capacidad para realizar clasificaciones de cobertura de la superficie. Los algoritmos más populares utilizados para este fin, son bosques aleatorios (RF, por sus siglas en inglés) (Breiman, 2001) y máquinas de soporte vectorial (SVMs, por sus siglas en inglés) (Cortes y Vapnik, 1995). Estos algoritmos de aprendizaje automático son técnicas que poseen flexibilidad, permitiendo ser entrenados y probados con combinaciones de datos obtenidos a partir de diversos tipos de sensores. Un ejemplo de aplicación exitosa de ambos métodos se encuentra en Whyte, Ferentinos y Petropoulos (2018).

A pesar de la gran aplicabilidad de estas herramientas, el mapeo temático de paisajes complejos como los de humedales, es un desafío debido a la alta similitud de algunas clases (por ejemplo,

vegetación sobre suelo seco y vegetación sobre agua), lo que contribuye a la confusión en el esquema de clasificación y dificulta el correcto desempeño de estos algoritmos.

En este contexto, este trabajo tiene como objetivo estudiar distintos algoritmos de aprendizaje automático para la segmentación de áreas con vegetación-agua en imágenes satelitales, y el desarrollo de una herramienta simple para su visualización, con el objetivo de poder monitorear el avance de las inundaciones.

Área de estudio

Este trabajo se llevó a cabo en el área de humedales, de la zona de influencia de la ciudad de Santa Fe, representativos del tramo medio de sistema fluvial del Río Paraná centrados en 31° 37'S / 60° 33'W (Figura. 1). El Río Paraná es considerado uno de los 10 ríos más importantes del mundo (Ashworth y Lewin, 2012) y es el segundo en Sudamérica después del Amazonas (Latrubesse, 2008). Su caudal medio histórico es de 17.000 m³/s (registrados en el puerto de la Ciudad de Paraná) con extremos de 8.000 y 60.000 m³/s (Giacosa, Paoli y Cacik, 2000). El régimen hidrológico de este río se caracteriza por una sucesión de aguas altas y bajas con inundaciones regulares (cada 1 a 3 años) y extremas (frecuencias variables) (Ceirano, Paoli y Schreider, 2000), donde la oscilación del nivel del agua entre ambos tipos de inundaciones alcanza los 3-4 m. La variabilidad espacio temporal en la cual este gran sistema fluvial se ha ido construyendo y modelando (manifiesta en sus geoformas, tipos de vegetación, redes de drenaje, etc.) determina la presencia de diferentes tipos de humedales. Estos van desde los netamente lóticos (con agua en circulación en forma constante), a los leníticos (aguas quietas), e incluyen entre ambos extremos un amplio gradiente en términos de conectividad hidro-sedimentológica y características bióticas asociadas. En cualquiera de sus expresiones, la vegetación es un elemento común que define la presencia y muchas veces la dinámica misma de los humedales. Entre algunos de los humedales frecuentes del sistema fluvial del Paraná aparecen bosques inundables (dominados por *Salix humboldtiana* y *Tessaria integrifolia*), bosques en galería con menor recurrencia de inundaciones pero igualmente adaptados a inundaciones extraordinarias (dominados por *Albizia inundata*, *Nectandra angustifolia*, *Inga uraguensis*, *Croton urucurana* y *Erythrina crista-galli*, entre otros), pajonales (representados por *Coleataenia prionitis*), bajíos, pantanos, bordes de laguna, cauces abandonados y otros cuerpos de agua colonizados por diferentes tipos de comunidades acuático-palustres que colonizan estos humedales en forma parcial o total, dependiendo del nivel y permanencia del agua (*Polygonum* spp., *Ludwigia peploides*, *Echinochloa* spp., *Paspalum* spp., *Panicum* spp. *Azolla filiculoides*, *Salvinia biloba* y *Eichhornia crassipes*) (Marchetti, Pereira, Ramonell y Latrubesse, 2013).

Datos de la misión Sentinel-2

Sentinel-2 es una misión del programa Copernicus, el cual forma parte de la Agencia Espacial Europea (ESA). Esta misión está compuesta por 2 satélites que se encuentran en la misma órbita desfasados en 180° entre sí. El primero de los satélites fue puesto en órbita el 26 de junio del 2015, mientras que el segundo se lanzó al espacio el 7 de marzo del 2017. La resolución temporal es de 10 días por satélite, es decir, que se obtienen imágenes de una misma zona cada 5 días teniendo en cuenta que la misión está compuesta por 2 satélites iguales. Estos satélites llevan a bordo el instrumento multiespectral (MSI), cuyo barrido es de 290 km (Drusch et al., 2012).

Las imágenes Sentinel-2 están formadas por 13 bandas que cubren desde el espectro electromagnético visible hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR). Las bandas corresponden al espectro visible, el borde rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta. Cada una de las bandas de Sentinel-2 tiene una resolución particular por lo que, dependiendo del tipo de banda de análisis que se emplee, la visualización de la imagen se verá más o menos limitada. No todas las bandas ofrecen la misma resolución, las mismas pueden ser de 10, 20 y 60 m, según se ve en la Tabla 1.

Para este trabajo se seleccionaron imágenes Sentinel-2 que cumplieran las siguientes condiciones: 1-El estado de los ríos y la nubosidad al momento en que el satélite captó las imágenes El estado de los ríos ha sido una variable de suma importancia ya que el foco de interés del análisis está en zonas anegadas, donde coexisten el agua y la vegetación. 2-En presencia de nubes, se contamina la escena captada por el satélite, por lo que se evita utilizar información durante días nublados.

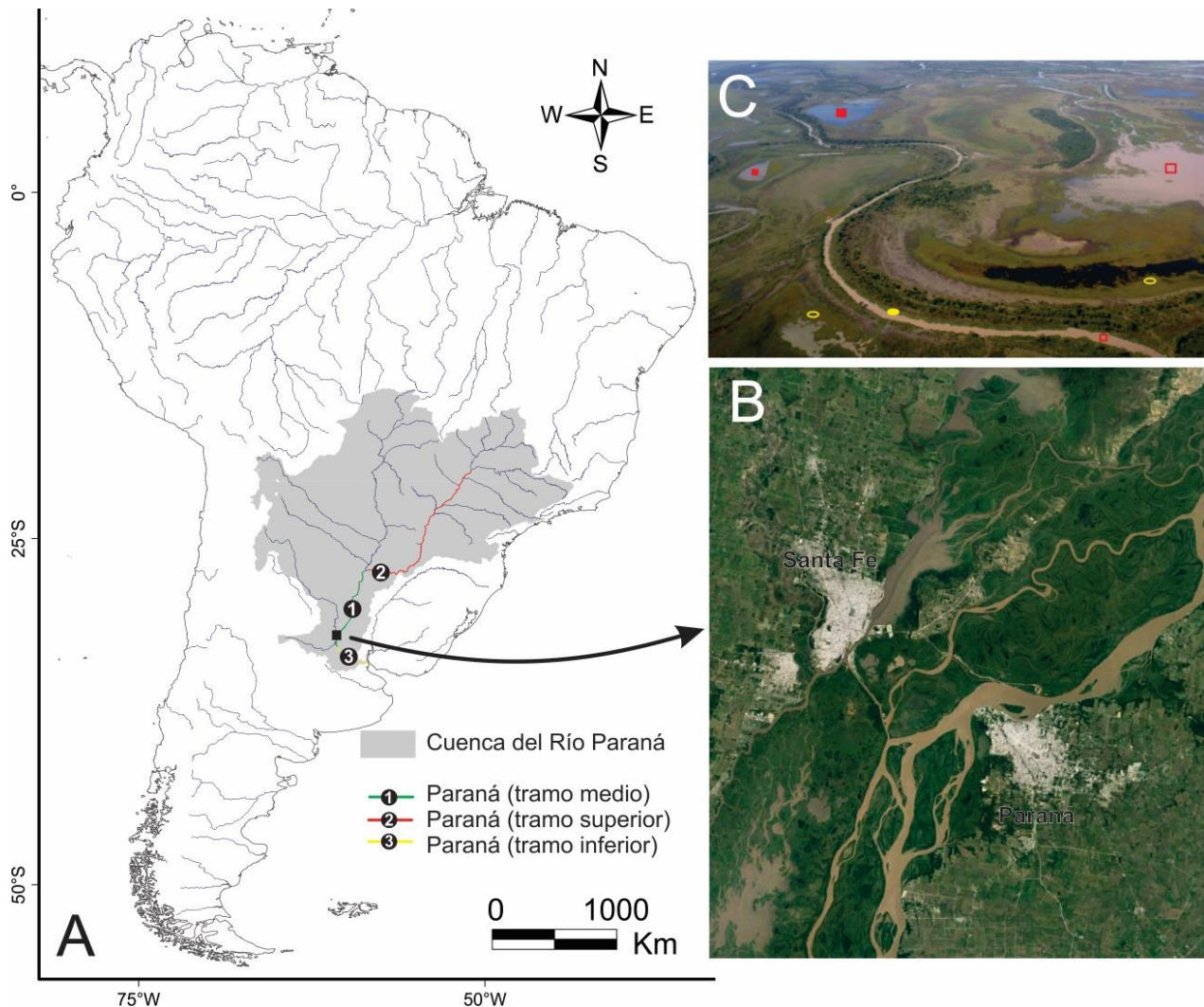


Figura 1: Ubicación del área de estudio dentro de Argentina y de la Cuenca del Plata (A). Imagen color verdadero del área de estudio (B) e imagen de los ambientes loticos y leníticos muestreados (C).

Tabla 1: Descripción de las bandas de Sentinel 2

Banda	Resolución	Long de Onda central	Descripción
Banda 1	60 m	443 nm	Azul-Violeta
Banda 2	10 m	490 nm	Azul
Banda 3	10 m	560 nm	Verde
Banda 4	10 m	665 nm	Rojo
Banda 5	20 m	705 nm	Visible e infrarrojo cercano

cont. Tabla 1

Banda 6	20 m	740 nm	Visible e infrarrojo cercano
Banda 7	20 m	783 nm	Visible e infrarrojo cercano
Banda 8	10 m	842 nm	Visible e infrarrojo cercano
Banda 8a	20 m	865 nm	Visible e infrarrojo cercano
Banda 9	60 m	940 nm	Infrarrojo de onda corta
Banda 10	60 m	1375 nm	Infrarrojo de onda corta
Banda 11	20 m	1610 nm	Infrarrojo de onda corta
Banda 12	20 m	2190 nm	Infrarrojo de onda corta

Las imágenes seleccionadas que cumplían las condiciones explicadas corresponden a las fechas 15-08-2017 y 19-09-2017 y 10-08-2018. Las escenas seleccionadas estaban libres de nubes y el río Paraná en el hidrómetro del puerto de Santa Fe vario de 3.34 mts a 2.61 mts durante el periodo analizado.

Modelos de Inteligencia Artificial

La inteligencia artificial (IA) hace referencia a la simulación de aspectos humanos, llevados a cabo por computadoras. Con la IA se busca que las máquinas adquieran cierta independencia y puedan resolver tareas que normalmente son realizadas por personas. Estas tareas engloban una amplia variedad de ejemplos que van desde algoritmos que puedan jugar al ajedrez hasta el desarrollo de automóviles que puedan conducirse solos.

Una rama de la IA es el aprendizaje automático, que hace referencia a cómo construir algoritmos que mejoren automáticamente a través de la experiencia. Es uno de los campos técnicos de más rápido crecimiento en la actualidad. Este progreso reciente en el aprendizaje automático ha sido impulsado tanto por el desarrollo de nuevos algoritmos y técnicas de aprendizaje, como por el aumento de la disponibilidad de datos en línea y computación de alto rendimiento y de bajo costo.

La visión artificial es una subdisciplina del aprendizaje automático. Esta disciplina que tiene como objetivo distinguir elementos dentro de imágenes digitales. Busca imitar la capacidad visual de reconocimiento que tienen los seres humanos, y lo hace mediante el entrenamiento de algoritmos computacionales (Kodratoff, 2014).

En este trabajo se seccionaron tres algoritmos de aprendizaje automático con el fin de seleccionar el que tenga mejor desempeño dentro del sistema de visión computacional para clasificar los distintos ambientes propuestos. Los mismos se describen a continuación.

1. Máquina de vectores de soporte (SVM, del inglés Support Vector Machine)

SVM fue desarrollado por Vapnik, Guyon y Hastie (1995). En esencia, una máquina de soporte vectorial es un algoritmo que intenta colocar un umbral de decisión de forma tal que se maximice la distancia del mismo a las clases presentes en la colección de datos (verdad de campo) que se dispone. Las bondades de esta metodología radican en las sólidas bases matemáticas de la teoría estadística detrás de este método. Las SVM han demostrado proporcionar resultados precisos en una amplia gama de problemas del mundo real. Desarrolladas inicialmente para resolver problemas de clasificación, las técnicas de SVM también se pueden aplicar con éxito en

problemas de regresión. Básicamente el SVM estima una regresión para un conjunto de datos dado $\{(x_i, y_i)\}_n$, donde x_i son los vectores de entrada, y_i es el valor de salida y n es el número total de conjuntos de datos (Tang, Dai, Jiang, Li y Liu, 2018).

2. Bosques Aleatorios (RF, del inglés Random Forest)

Los bosques aleatorios son una combinación de árboles predictores donde cada árbol depende de valores seleccionados aleatoriamente del conjunto de datos y tienen la misma distribución para todos los árboles del bosque (Breiman, 2001).

El proceso de entrenamiento de RF se basa generar un nuevo conjunto de datos, donde los valores que lo componen son seleccionados aleatoriamente del conjunto de datos de entrenamiento. Este nuevo grupo de datos puede tener un número de muestras menor al de entrenamiento e incluso tener valores repetidos. Luego se confecciona un árbol de decisión para este subconjunto.

El procedimiento antes detallado se repite N veces generando N conjuntos con sus correspondientes árboles de decisión asociados a cada uno. Quedando así conformado un bosque aleatorio con N árboles.

Al momento de utilizar RF para predecir un valor, todos los árboles del bosque predicen una salida y el valor más popular es el que finalmente se elige como salida del método.

3 Perceptrón Multicapa (MLP, del inglés Multilayer Perceptron)

El MLP es un algoritmo que busca imitar el funcionamiento de las neuronas biológicas. Computacionalmente la estructura principal son las neuronas computacional o perceptrón las cuales reciben las señales de entrada y mediante los pesos sinápticos se ponderan las entradas. Esta ponderación permite asignar una importancia a cada una de estas entradas. Los pesos sinápticos se van modificando en la etapa de aprendizaje y son los que le permiten a la neurona aprender.

El perceptrón multicapa consiste en un agrupamiento de perceptrones simples distribuidos en diferentes capas. Estas estructuras suelen contar con 3 capas: una de entrada, una capa oculta (que puede tener varios niveles), y otra de salida. Todos los perceptrones o neuronas de la capa de entrada reciben los mismos datos de entrada, pero las neuronas de las capas ocultas y de salida reciben como entrada la salida de las neuronas de la capa anterior, es por este motivo que estos modelos son denominados totalmente conectados.

Definición de la verdad de campo

Se utilizaron las imágenes Landsat 8 disponibles en el entorno Google Earth con las fechas más cercanas a las imágenes Sentinel-2 seleccionadas. Sobre las primeras, se digitalizaron manualmente 250 polígonos (en promedio) sobre coberturas representativas de agua, vegetación acuática, ciudades y vegetación en tierra firme. En la Figura 2 se muestran algunos de los polígonos que pertenecen a la clase vegetación acuática.

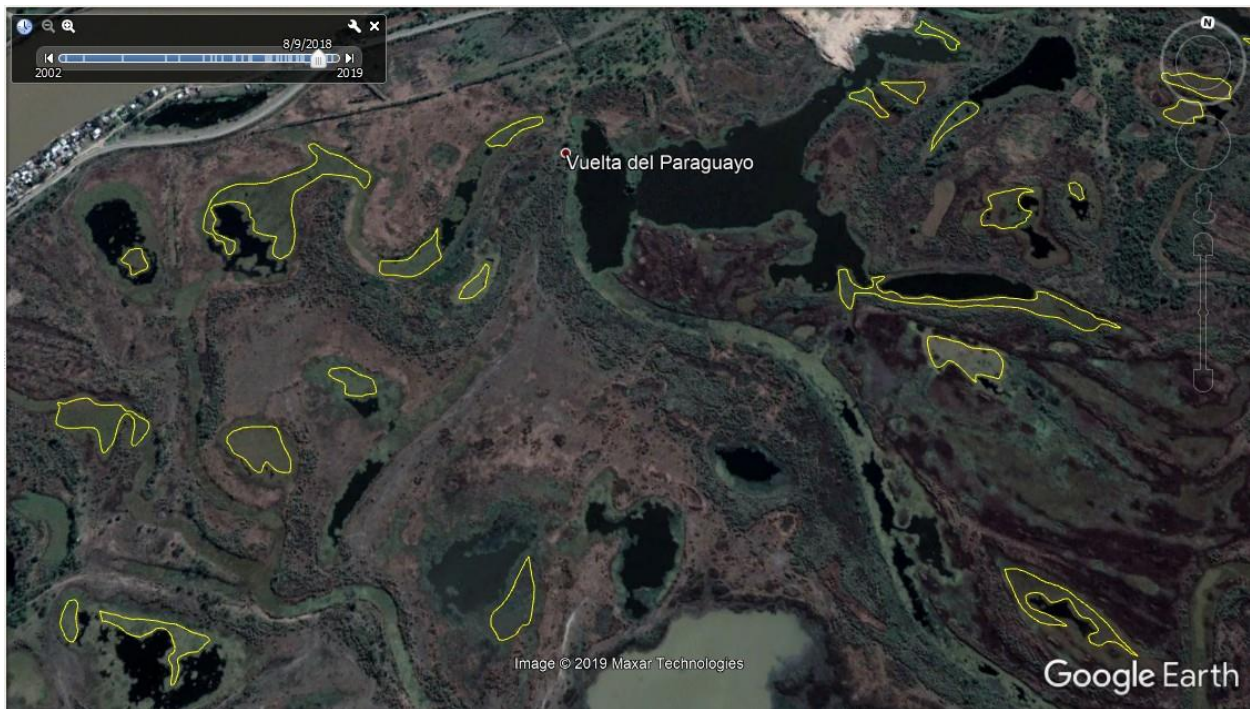


Figura 2: Ejemplo de polígonos correspondientes a la clase vegetación acuática generados manualmente (en color amarillo) con las herramientas de digitalización disponibles en la plataforma Google Earth.

Los polígonos representan, en este trabajo, la verdad de campo. Para poder utilizar esta verdad como información de entrada en los modelos de aprendizaje automático se compatibilizó la información de cada polígono con la respuesta electromagnética del suelo, representada en las imágenes satelitales Sentinel-2. Para esto se posicionaron los polígonos obtenidos desde Google sobre las imágenes satelitales Sentinel y se extrajeron los valores de los píxeles que quedaron englobados dentro de cada polígono. El resultado de este proceso fue un listado de píxeles etiquetados, es decir, todos los valores de las bandas de cada píxel con su correspondiente etiqueta de clase.

Para unificar la resolución espacial de todas las bandas de Sentinel-2, de modo de generar matrices apilables, se re-muestraron las bandas con el método de interpolación lineal (Hwang y Lee, 2004) de forma tal que todos tengan píxeles de 10 m por 10 m. Así, las muestras de cada clase se conformaron de la reflectancia de todas las bandas de Sentinel-2 en aquellos píxeles etiquetados.

El conjunto de datos para cada imagen estuvo formado por una cantidad aproximada de 200.000 muestras para cada clase a excepción de la clase vegetación acuática, para la cual se contaba con 7000 muestras en cada imagen. Este desbalance entre las clases se resolvió descartando muestras de las clases agua, ciudad y vegetación. De esta forma, se garantiza que la evaluación de los modelos no esté afectada por un desbalance de clases.

Posteriormente se procedió a particionar el conjunto de datos para entrenar y chequear los algoritmos. Para evaluar de mejor forma la capacidad de clasificación de la red, se fijaron sectores en las imágenes que fueron utilizadas para entrenar y testear. Para esto se utilizó la aplicación ITK-SNAP (<http://www.itksnap.org/pmwiki/pmwiki.php?n=Main.HomePage>) con la cual se generan polígonos de segmentación. Las muestras ubicadas dentro de estos polígonos son utilizadas para entrenar y las restantes son utilizadas para testear. La Figura 3 ejemplifica los sectores definidos para entrenar y chequear los algoritmos.

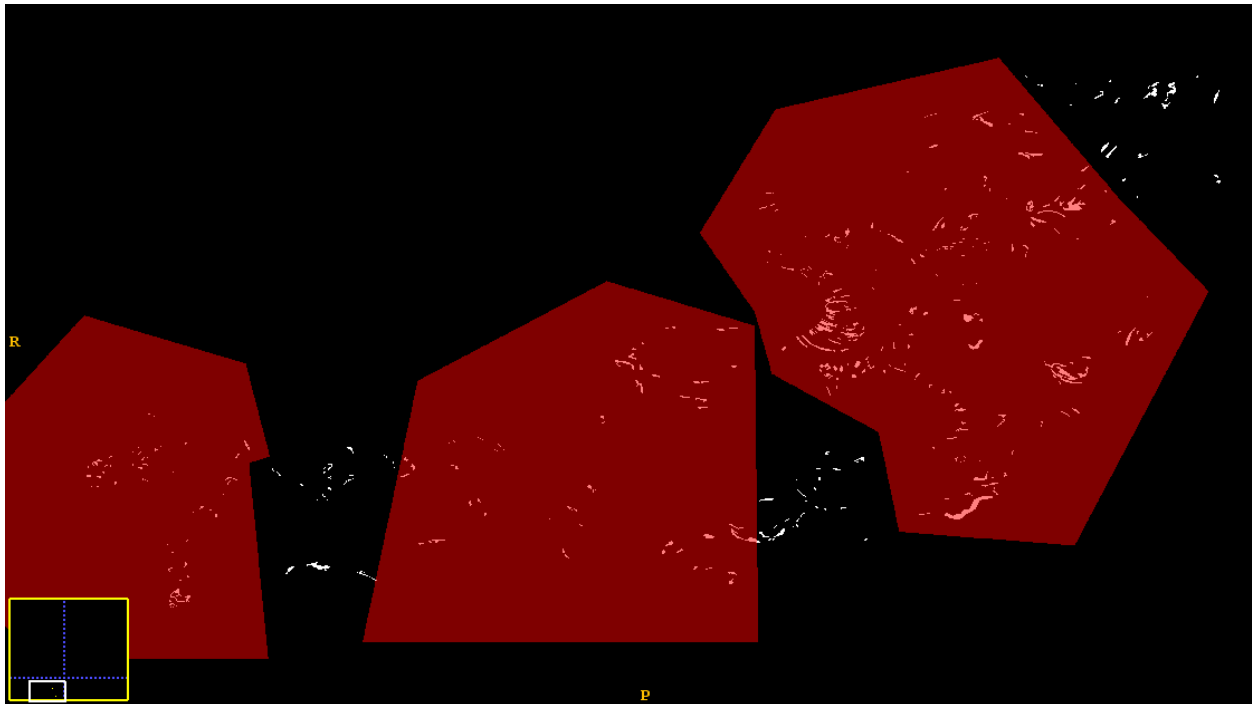


Figura 3: Particiones sectoriales, las muestras se representan con el color blanco, el polígono de segmentación se representa en color rojo y el fondo en negro.

Entrenamiento y prueba de los modelos

El proceso de entrenamiento de cada modelo implica la selección de los hiperparámetros que configuran la red para adaptarlo al problema y lograr el mejor desempeño. Esta tarea se implementó en una búsqueda de grilla que combina una amplia variedad de valores de los parámetros y mediante sucesivas pruebas, se seleccionan los más eficaces. La selección de la configuración más exitosa se realiza mediante el cálculo del Ac (ver ecuación 2), seleccionando la configuración que mayor Ac obtenga.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo en esta etapa es escoger el clasificador que mejor se desempeñe de los tres propuestos. Es por esto que una vez escogidos los hiperparámetros de los modelos se prosiguió con el entrenamiento y prueba de los mismos con el fin de obtener información y poder comparar los modelos. Para los experimentos, se consideraron variaciones tanto en la dimensión temporal como espacial. La dimensión temporal hace referencia a diferentes instantes de tiempo, es decir, diferentes imágenes ya que cada una fue obtenida en distintas fechas. Mientras que la dimensión espacial hace referencia a los distintos sectores de una misma imagen.

Se decidió realizar las siguientes pruebas para evaluar el desempeño:

Prueba 1: Entrenamiento y Test en dominio espacial y temporal fijo.

Prueba 2: Entrenamiento y Test en dominio espacial fijo y temporal variante.

Prueba 3: Entrenamiento y Test en dominio espacial y temporal variante.

Para evaluar el desempeño de los clasificadores en cada prueba propuesta, se utilizaron las siguientes métricas de error:

**Exactitud (Re)* por clase: Efectividad de un clasificador para identificar clases.

$$Re = \frac{\text{True positive}}{\text{True positive} + \text{False negative}} \quad (1)$$

*Precisión general (Ac): Expresa la efectividad promedio del clasificador.

$$Ac = \frac{\text{True positive} + \text{True negative}}{\text{True positive} + \text{True negative} + \text{False positive} + \text{False negative}} \quad (2)$$

Resultados

En las siguientes figuras se exponen los resultados obtenidos en las sucesivas pruebas realizadas.

En la Figura 4 se muestran el desempeño obtenido por los clasificadores teniendo en cuenta el Ac para todas las clases. En términos generales puede verse que MLP y SVM responden relativamente bien cuando se hace el entrenamiento y test en dominio espacial y temporal fijo (prueba 1), pero pierden capacidad de generalización, en relación a que RF, cuando se los somete a la prueba 2. En efecto, durante la prueba 1 todos los clasificadores arrojaron un Ac superior a 0.95. Para la prueba 2 solo RF mostró un valor medio de Ac superior a 0.95, mientras que los otros clasificadores cayeron por debajo de 0.9. En la prueba 3, RF y SVM conservan una buena Ac (superior a 0.95) pero MLP cae por debajo de 0.9.

La clase vegetación-agua (Figura 5 A) resultó en valores de Re muy cercanos a 1 para el clasificador RF en todas las pruebas realizadas. En la prueba 2, RF y MLP mantienen un Ac cercano a 1 mientras que SVM muestra un desempeño pobre, con un valor medio de Ac de 0.8 aproximadamente. La prueba 3 arrojó buenos resultados para todos los clasificadores (Ac > 0.9) aunque RF sobresale por tener un Ac próximo a 1.

Tanto para la clase agua como para la clase ciudad, los 3 clasificadores propuestos arrojan resultados de Re superiores al 0.9 en todas las pruebas realizadas (Figuras 5 B y C).

Estos resultados demuestran que todos los clasificadores propuestos arrojan buenos resultados para las clases con firmas espectrales claramente definidas, y se dificulta la elección de uno de ellos. Sin embargo, cuando la clase es una superposición de diferentes materiales, como el caso de vegetación-agua el método a utilizar, y el modo de utilizarlo (variabilidad espacial y temporal), marca diferencias significativas como se observa en la Figura 5.

Pereira, Melfi y Montes (2017) encontraron una precisión global de alrededor del 98.5%, en el Pantanal y resaltaron el detalle espectral y espacial logrado con la fusión de imágenes de diferentes misiones satelitales. En dicho trabajo las bandas de Sentinel-2 usadas fueron las que tienen alta resolución espacial. En este trabajo se logra una precisión similar, sin fusionar imágenes de diferentes sensores y con todas las bandas de Sentinel 2.

Kandus, Karszenbaum y Frulla (1999) encontraron con Landsat Thematic Mapper y un método no supervisado una exactitud del 83%, en el delta del río Paraná. Grimson, Morandeira, Gayol y Kandus (2019), utilizando una clasificación basada en objeto junto a imágenes de COSMO SkyMed, reportó una precisión global de aproximadamente 75% también en el delta del río Paraná.

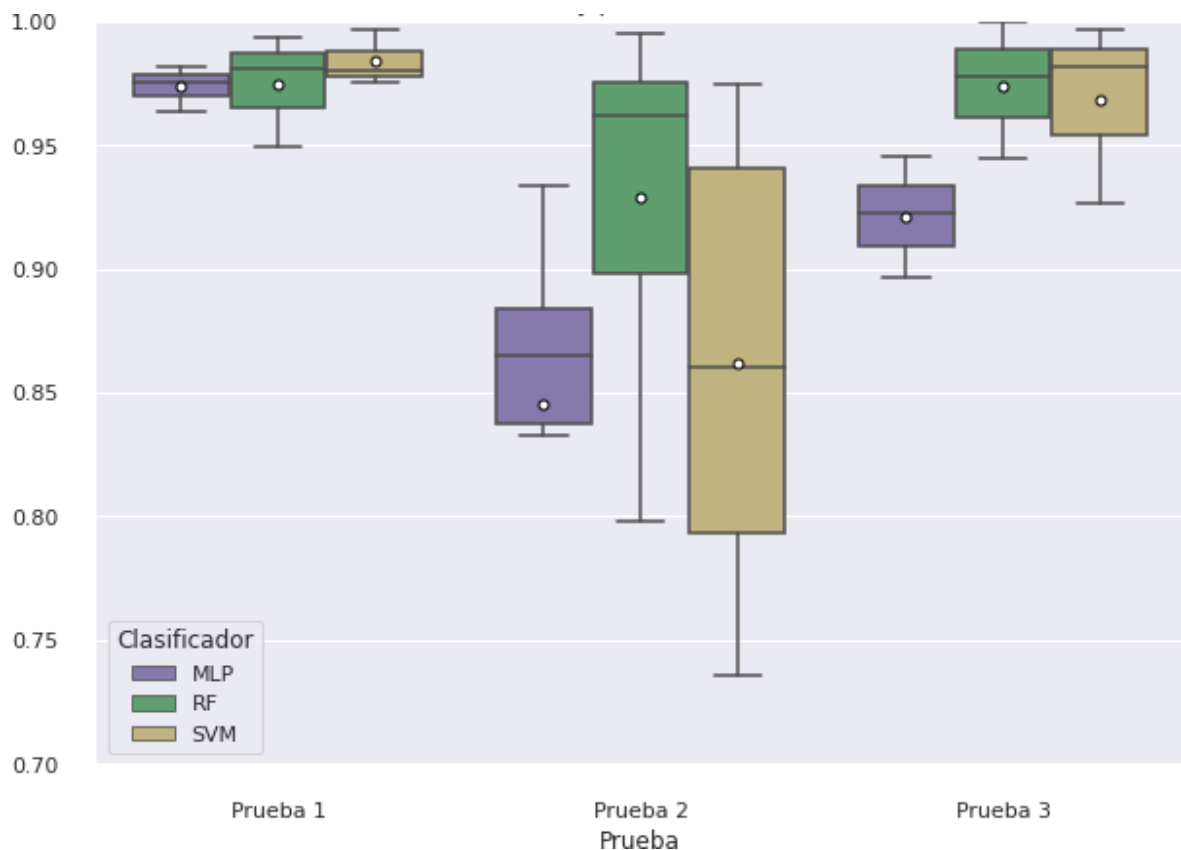


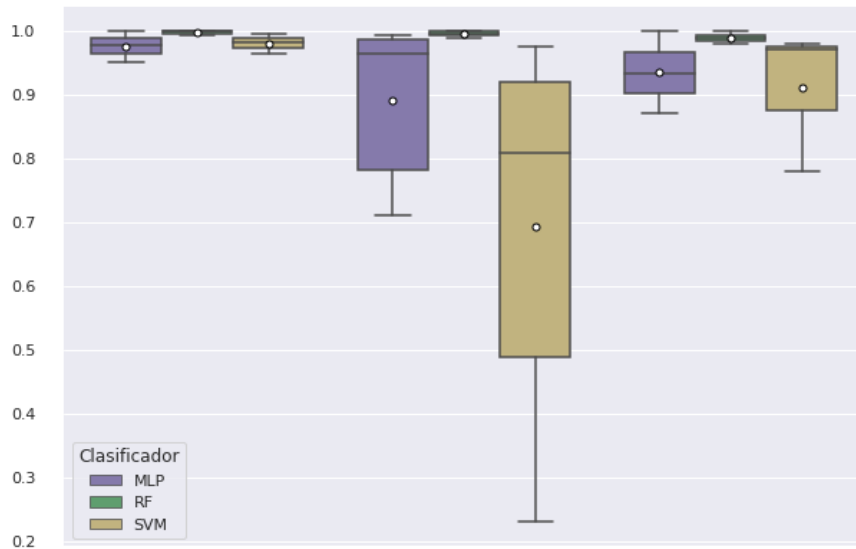
Figura 4: Diagrama donde se representa la precisión obtenida por los diferentes modelos de aprendizaje automático al realizar la clasificación, teniendo en cuenta todas las clases.

Importancia de las bandas de Sentinel-2

El clasificador RF tiene implementado un método que permite conocer que banda de Sentinel-2 tuvo más importancia en la clasificación. En este caso se identificaron las bandas B1, B11 y B12 como las más importantes para la clasificación de las clases propuestas. En la Figura 6 se muestra el nivel de importancia de las bandas.

Se destaca la importancia de la B1, ya que la literatura relacionada a clasificación de vegetación acuática, y de vegetación en general, descartan la B1 por tener una resolución espacial de 60 m (Pereira et al., 2017). Sin embargo, la interpolación realizada en este trabajo para llevar todas las bandas a 10 m, resultó en la posibilidad de explorar el rol de la B1 en la clasificación de áreas complejas con vegetación-agua.

A



B



C

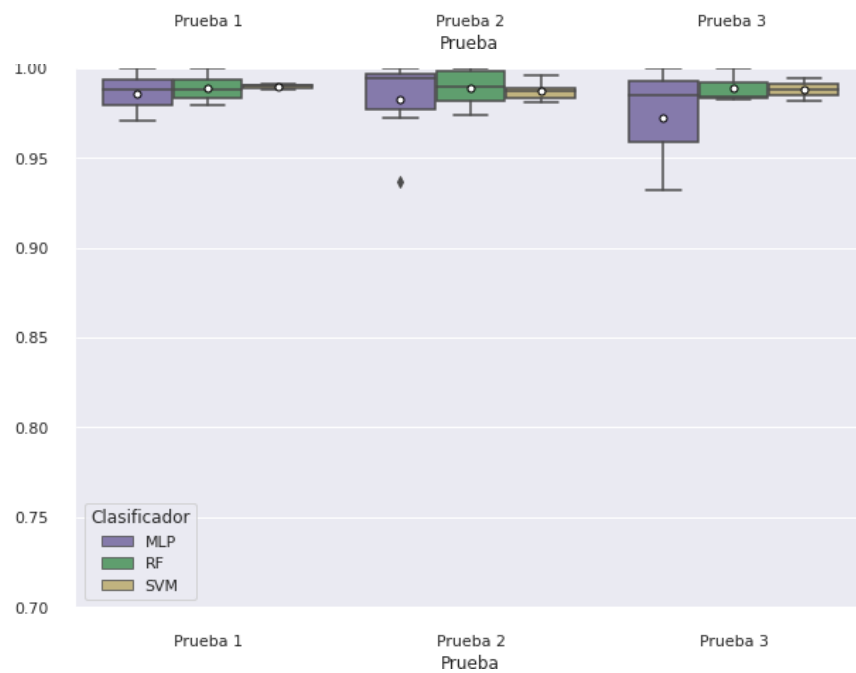


Figura 5: Diagrama donde se representa la exactitud obtenida por los diferentes modelos de aprendizaje al realizar la clasificación de la clase (A) vegetación-agua, (B) agua y (C) ciudad

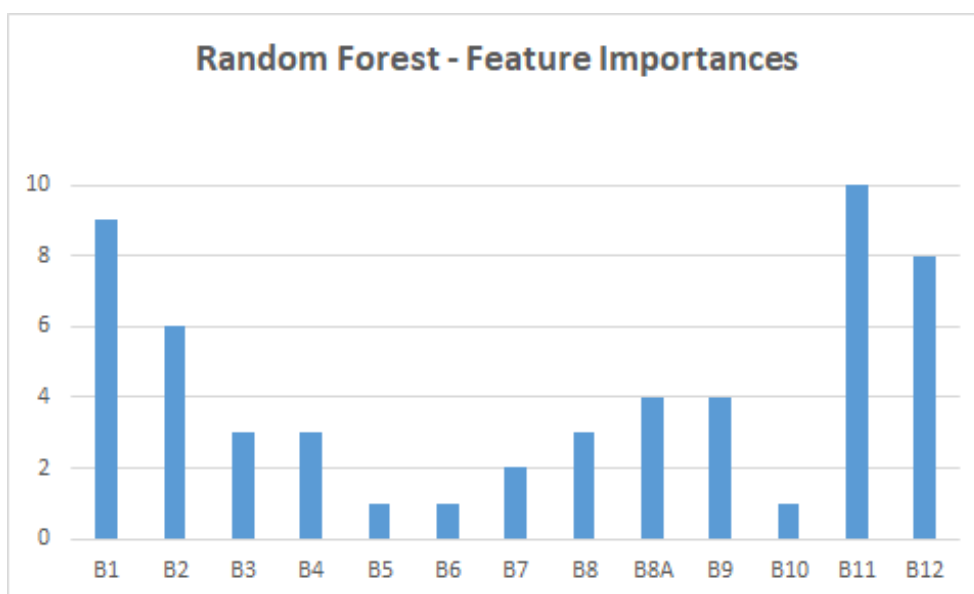


Figura 6: Importancia de las bandas según el método Random Forest

Poursanidis, Traganos, Reinartz y Chrysoulakis (2019), Traganos y Reinartz (2018) y Traganos et al. (2018) usaron las bandas de Sentinel-2 para explorar la contribución de la banda de aerosoles costeros (443 nm), que la asimilamos al color azul-violeta, para la cartografía de los hábitats costeros marinos e incluso la batimetría en tres lugares de estudio en el Mediterráneo oriental. Estos autores encontraron una precisión de aproximadamente 87% o inferior en la mayoría de los casos. Estos trabajos sustentan nuestros resultados, en el sentido que B1 también parece aportar información valiosa en la clasificación de vegetación sobre el agua. Hasta el momento, no se han encontrado publicaciones con resultados comparables a los presentados en este trabajo en el río Paraná.

En la Figura 7 se presenta el resultado de RF para la imagen de fecha 10-08-2018, cuando se registraban 3.34 m. de altura en el río Paraná a la altura de Santa Fe que corresponde a aguas medias. Se implementó un sistema que permite sectorizar la imagen para clasificar solo las regiones de interés del usuario y evitar así el procesamiento innecesario que consume tiempo computacional.

En la Figura 7-A se perfila claramente la ciudad de Santa Fe, en la que se identificaron claramente los parques más importantes de la ciudad en color verde y la laguna Setúbal en color azul. Esta imagen muestra como ambas clases son perfectamente identificadas por los clasificadores. En la Figura 7-B se observa la confusión entre las clases construcciones y vegetación. La ruta sobre la ruta provincial 2, a la altura de San Justo – Santa Fe, se perfila como vegetación y solo las estructuras de más notorias se identifica como tal. Además, se observa que las zonas de vegetación acuática sobredimensionada en algunos sectores. En contraste, la Figura 7-C muestra la zona identificada en la Figura 2, que fue correctamente clasificada en todas las clases.

Si bien estos resultados son preliminares se observa que RF puede identificar las diferentes clases, incluso la más compleja de todas.

Discusión y conclusiones

La vegetación acuática que naturalmente coloniza cauces o lagunas, o vegetación no acuática, pero que permanece inundada durante los eventos de inundación que caracterizan la dinámica natural de los humedales del río Paraná. Esto es de suma importancia a los efectos de monitorear el avance de la inundación sobre la compleja matriz que forman estos humedales. La vegetación y el agua son elementos claves en los humedales y, de acuerdo a los niveles inundación, el agua

puede resultar enmascarada por la vegetación hasta el punto tal de que la presencia del agua sólo comienza a ser perceptible por los satélites cuando la magnitud de la inundación alcanza valores críticos. Hasta el momento muchos autores han trabajado sobre el mapeo de los humedales utilizando información de diferentes misiones satelitales. Sin embargo, hasta el momento no se encuentra literatura sobre el mapeo de la vegetación palustre del río Paraná, a la que en este trabajo denominamos clase “vegetación-agua”, con información de Sentinel 2. Las imágenes satelitales ofrecen uno de los enfoques más rentables, eficientes y prácticos para cartografiar grandes áreas, con ventajas que incluyen incorporar de datos multispectrales y multitemporales en métodos de aprendizaje automático.

El principal objetivo en este estudio fue evaluar la idoneidad de Sentinel-2 para derivar las zonas con vegetación acuática y vegetación inundada, en el complejo paisaje del río Paraná a la altura de la ciudad de Santa Fe. Para alcanzar nuestro objetivo, empleamos un flujo de trabajo metodológico que consistió en el re-muestreo de las bandas de Sentinel-2 de mayor resolución para utilizarlo en algoritmos de aprendizaje automático.

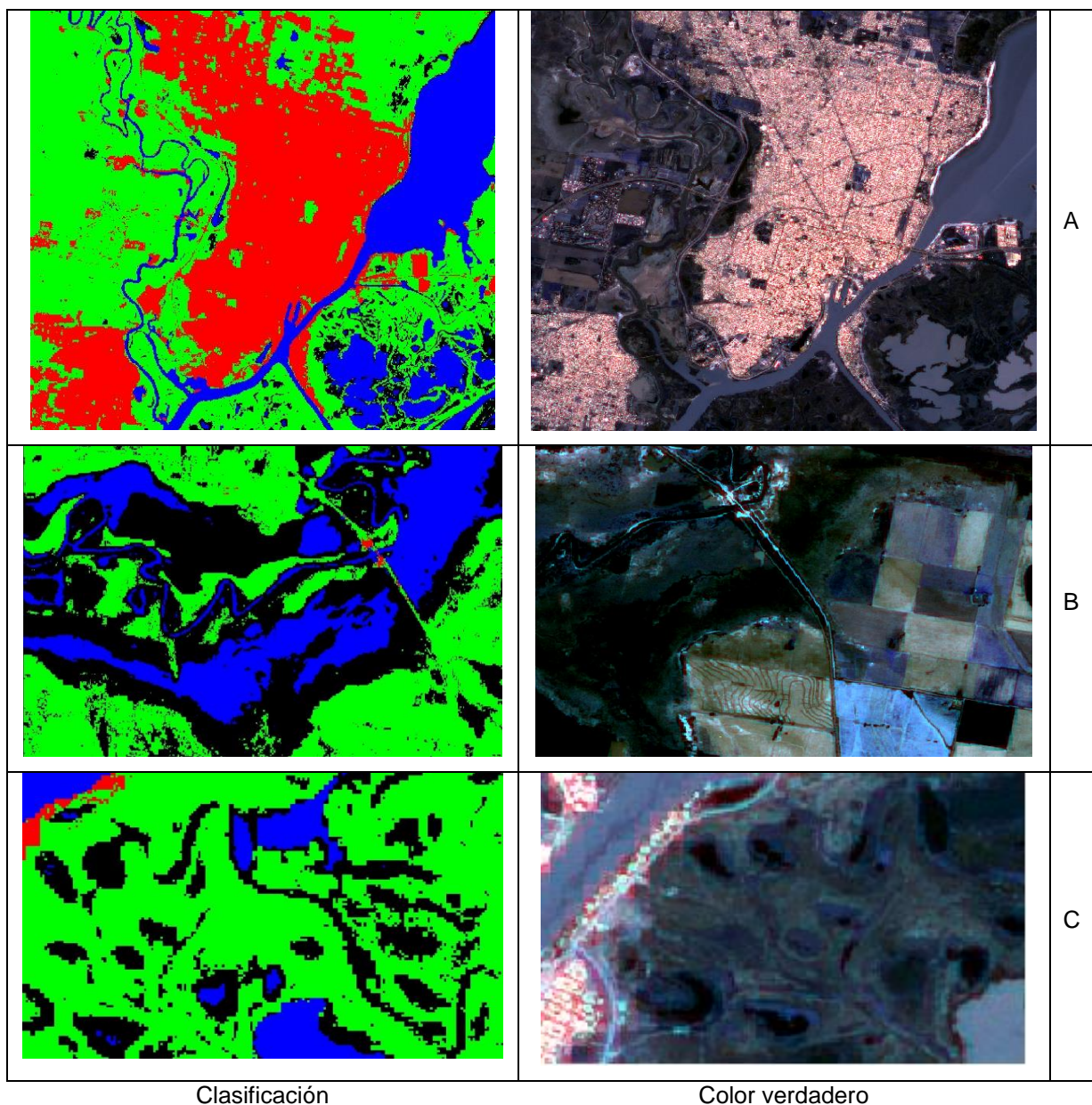


Figura 7: Resultado de aplicar Random Forest a la imagen de fecha 10-08-2018. Rojo: construcciones o ciudades; verde: vegetación; azul: agua; negro: vegetación-agua. En tres sectores: (A) ciudad de Santa Fe y Laguna Setubal, (B) Puente sobre el río Salado en ruta provincial 2 (C) zona frente a la ciudad universitaria, conocido como vuelta del Paraguayo; coincidente con la Figura 2.

En este caso se utilizaron todas las bandas de Sentinel-2, sin discriminar por su resolución espacial, y se compatibilizaron las matrices mediante una interpolación lineal utilizando la resolución menor. Esta práctica implicó dividir el pixel de 60x60 m en 36 pixeles de 10x10 m y los pixeles de 20x20 m en 4 pixeles de 10x10 m, tratando de preservar la información original de las bandas (Traganos y Reinartz, 2018). De este modo se logró incorporar la reflectancia de todas las bandas, sin descartar información a priori.

Entre los principales resultados se resalta la importancia de la banda 1, centrada en la longitud de onda 443 nm, y las bandas 11 y 12 por sobre las otras bandas visibles. Esto constituye un aporte de interés dado que, en gran parte de los antecedentes consultados, las bandas de menor resolución espacial se descartan, sin evaluar el aporte de las mismas después de un procesamiento como el realizado en este trabajo.

Los datos recolectados de la imagen de alta resolución disponible en Google se dividieron en dos grupos, uno para entrenar los algoritmos y el otro grupo para validar los parámetros resultantes del entrenamiento. Estos grupos fueron generados de forma tal de analizar la variabilidad espaciotemporal de las clases. Es importante destacar que los problemas de variación del dominio espacial pueden afectar los resultados de una clasificación, si los niveles de agua y conectividad entre los humedales cambian. En este trabajo se observó que la prueba 2, donde se fijaba el espacio y se incluían los datos en diferentes fechas, fue la de mayor exigencia durante la clasificación, con resultados muy variables según los métodos seleccionados. En base a los resultados de la prueba 2, Random Forest mostró ser el método más robusto para representar la variabilidad temporal intra clase. Esto es muy importante ya que la clase vegetación-agua cambia con los niveles hidrométricos del sistema fluvial y con la fenología de las plantas.

Si bien todos los métodos son excelentes para detectar las clases definidas espectralmente, como por ejemplo agua, no todos mostraron buenos resultados con la clase mixta vegetación-agua. En este sentido cabe aclarar que incluso Random Forest, pareciera confundir el agua cargada de clorofila por algas con vegetación-agua.

En la actualidad se está trabajando en la obtención de firmas espectrales de la vegetación acuática y en una mejor localización de las muestras. También se observó que es necesario discriminar mejor la superficie que fueron incluidas en la clase vegetación. Se espera que al incluir mayor cantidad de clases el desempeño de los clasificadores mejore.

Referencias bibliográficas

- Ashworth, P. J., y Lewin, J. (2012). How do big rivers come to be different?. *Earth-Science Reviews*, 114(1-2), 84-107.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5-32.
- Ceirano, E., Paoli, C., y Schreider, M. (2000). Las inundaciones en el área de Santa Fe. Interpretación de sus efectos y simulación de los subsistemas Leyes-Setúbal y Ruta Nacional 168-Alto Verde. En C. Paoli y M. Schreider (Eds.), *El Río Paraná en su Tramo Medio. Una contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura* (pp. 239–297). Vol. 2. Universidad Nacional del Litoral: Santa Fe.
- Cortes, C., y Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine learning*, 20(3), 273-297.
- Giacosa, R., Paoli, C., y Cacik, P. (2000). Conocimiento del régimen hidrológico. En C. Paoli y M. Schreider (Eds.), *El Río Paraná en su Tramo Medio. Una contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura* (pp. 71–103). Vol. 2. Universidad Nacional del Litoral: Santa Fe.

- Grimson, R., Morandeira, N. S., Gayol, M. P., y Kandus, P. (2019). Freshwater marsh classification in the Lower Paraná River floodplain: an object-based approach on multitemporal X-band COSMO-SkyMed data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(1), 014531.
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., y Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote sensing of Environment*, 120, 25-36.
- Hwang, J. W., y Lee, H. S. (2004). Adaptive image interpolation based on local gradient features. *IEEE signal processing letters*, 11(3), 359-362.
- Kandus, P., Karszenbaum, H., y Frulla, L. (1999). Land cover classification system for the Lower Delta of the Paraná River (Argentina): Its relationship with Landsat Thematic Mapper spectral classes. *Journal of Coastal Research*, 909-926.
- Kandus, P., Morandeira, N., y Schivo, F. (2010). Bienes y servicios ecosistémicos de los humedales del Delta del Paraná. *Wetlands International: Fundación Humedales*.
- Kodratoff, Y. (2014). *Introduction to machine learning*. Elsevier.
- Latrubesse, E. M. (2008). Patterns of anabranching channels: the ultimate end-member adjustment of mega rivers. *Geomorphology*, 101(1–2), 130–145.
- Marchetti, Z. Y., Pereira, M. S., Ramonell, C. G., y Latrubesse, E. M. (2013). Vegetation and its relationship with geomorphologic units in the Paraná River floodplain, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 46, 122–136.
- Marchetti, Z. Y., Minotti, P. G., Ramonell, C. G., Schivo, F., y Kandus, P. (2016). NDVI patterns as indicator of morphodynamic activity in the middle Paraná River floodplain. *Geomorphology*, 253: 146–158.
- Minotti, P., Ramonell, C., y Kandus, P. (2013) Regionalización del Corredor fluvial Paraná-Paraguay. En: L. Benzaquen, D. Blanco, R. Bó, P. Kandus, G. Lingua, P. Minotti, R. Quintana, S. Sverlij y L. Vidal (Eds.), *Inventario de los Humedales de Argentina. Sistemas de Paisajes de humedales del Corredor Fluvial Paraná- Paraguay* (pp. 35–90). Buenos Aires: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, ISBN 978-987-29340-0-2.
- Pereira, O. J. R., Melfi, A. J., y Montes, C. R. (2017). Image fusion of Sentinel-2 and CBERS-4 satellites for mapping soil cover in the Wetlands of Pantanal. *International Journal of Image and Data Fusion*, 8(2), 148-172.
- Poursanidis, D., Traganos, D., Reinartz, P., y Chrysoulakis, N. (2019). On the use of Sentinel-2 for coastal habitat mapping and satellite-derived bathymetry estimation using downscaled coastal aerosol band. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 80, 58-70.
- Tang, H., Dai, Z., Jiang, Y., Li, T., y Liu, C. (2018). PCG classification using multidomain features and SVM classifier. *BioMed research international*, 2018.
- Tiner, R. W., Lang, M. W., y Klemas, V. V. (2015). *Remote sensing of wetlands: applications and advances*. CRC press, Taylor and Francis Group.
- Traganos, D., y Reinartz, P. (2018). Mapping Mediterranean seagrasses with Sentinel-2 imagery. *Marine pollution bulletin*, 134, 197-209.
- Traganos, D., Aggarwal, B., Poursanidis, D., Topouzelis, K., Chrysoulakis, N., y Reinartz, P. (2018). Towards global-scale seagrass mapping and monitoring using Sentinel-2 on Google Earth Engine: The case study of the aegean and ionian seas. *Remote Sensing*, 10(8), 1227.
- Vapnik, V., Guyon, I., y Hastie, T. (1995). Support vector machines. *Maching Learning*, 20(3), 273-297.

Whyte, A., Ferentinos, K. P., y Petropoulos, G. P. (2018). A new synergistic approach for monitoring wetlands using Sentinels-1 and 2 data with object-based machine learning algorithms. *Environmental Modelling & Software*, 104, 40-54.

DINÂMICA ESPACIAL LOCAL DOS CRIMES E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE PIRACICABA/SP

Eder Silvestre; Andréia Medinilha Pancher

Institui de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, Brasil

eder.roberto@unesp.br

Resumo

As causas da criminalidade têm sido vinculadas a fatores de natureza socioeconômica e ao baixo grau de integração moral dos infratores que atentam contra as normas estabelecidas pela sociedade. As abordagens que colocam a pobreza absoluta como principal causa da criminalidade, associada ao papel desempenhado pelas agências de controle, contribuem para a criminalização das camadas de baixa renda. Para a teoria da desorganização social, a pobreza mantém uma estreita relação com a criminalidade, porém não causalmente conectadas. O status socioeconômico, junto a outros fatores, influencia a organização comunitária e sua capacidade em exercer o controle social informal, com impactos sobre a criminalidade. Diante do exposto, o objetivo fundamental desse estudo é analisar a dimensão espacial do crime em Piracicaba/SP, na perspectiva teórica da desorganização social, indicando a influência que a desigualdade socioespacial exerce sobre a violência. Informações sobre homicídios, estupros, roubo/furto de automóveis e residências, foram adquiridas dos Boletins de Ocorrência, da Secretária de Segurança Pública do Estado de São Paulo (SPP). Os dados compreendem o período de 2008 a 2012 e foram comparados com as variáveis coletadas no Censo Demográfico, do IBGE (2010). Os procedimentos metodológicos consistiram na utilização das Geotecnologias para espacializar os crimes e para as análises espaciais, abrangendo o mapeamento de clusters e outliers, agrupamento de dados, regressão exploratória e modelos de regressão espacial. Os resultados indicaram um suporte parcial à teoria da desorganização social para a explicação da criminalidade no município, demonstrando as semelhanças e as diferenças entre o crime em Piracicaba/SP e em outras cidades do Brasil e do mundo. É uma contribuição relevante, pois os dados produzidos e as análises realizadas podem subsidiar políticas de segurança pública ao nível local para a redução dos crimes e contribuir em outros níveis de governo para a compreensão das peculiaridades que a dinâmica criminal pode assumir.

Palavras-chave: *criminologia espacial. geografia do crime. Geotecnologia. análise espacial*

Introdução

Ao longo da história, as causas da criminalidade têm sido vinculadas, de um lado, a fatores socioeconômicos e, de outro, ao baixo grau de integração moral dos infratores que atentam contra as normas estabelecidas pela sociedade. As abordagens que colocam a pobreza absoluta como principal causa da criminalidade, associada ao papel desempenhado pelas agências de controle, contribuem para a criminalização das camadas de baixa renda. Para a teoria da desorganização social, a pobreza mantém uma estreita relação com a criminalidade, porém não causalmente conectadas. O status socioeconômico, em conjunto com outros fatores, influencia a organização comunitária e a sua capacidade em exercer o controle social informal, com impactos sobre a criminalidade. Diante do exposto, o objetivo fundamental desse capítulo é analisar a dimensão espacial do crime em Piracicaba/SP, na perspectiva teórica da desorganização social. As informações sobre os homicídios, estupros, roubo/furto de automóveis e residências, foram adquiridas dos Boletins de Ocorrência, disponibilizados pela Secretária de Segurança Pública do Estado de São Paulo (SPP). Os dados compreendem o período de 2008 a 2012 e foram comparados com as variáveis coletadas no Censo Demográfico de 2010, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os procedimentos metodológicos consistiram na utilização das Geotecnologias para a espacialização dos crimes e para as análises espaciais, abrangendo o mapeamento de clusters e outliers, agrupamento de dados, regressão exploratória e modelos de regressão espacial. Os resultados demonstraram um suporte parcial à teoria da desorganização social para a explicação da criminalidade no município, indicando as semelhanças e diferenças da violência no município, em relação a outras cidades do Brasil e do mundo.

Geotecnologias, crime e os objetivos do desenvolvimento sustentável

Em 2015, a Organização das Nações Unidas lançou um conjunto de objetivos e metas que englobam aspectos econômicos, sociais e ambientais, visando o desenvolvimento sustentável. Entre os desafios que conduziriam a sociedade rumo a tal desenvolvimento, destacam-se ações comuns a todos os países que buscam a erradicação das principais mazelas da sociedade, como a pobreza, a fome, a violência, as alterações climáticas e a degradação ambiental.

A nova Agenda 2030 é fruto de consultas públicas em várias partes do mundo envolvendo diversos setores da sociedade civil, principalmente as populações em situação de vulnerabilidade, que durante mais de dois anos puderam contribuir para a construção dos 17 objetivos e das 169 metas associadas aos mesmos. Entre os anseios da sociedade, a preocupação com a violência foi materializada no objetivo nº 16 da Agenda 2030, o qual busca a “promoção de sociedades pacíficas e inclusivas, com acesso equitativo à justiça e instituições eficazes, responsáveis e inclusivas, parte fundamental para alcançar o desenvolvimento sustentável” (Organização das Nações Unidas [ONU], 2015, p.36). A figura 1 evidencia os 17 objetivos dos ODS, com destaque para o objetivo nº 16.



Figura 1: Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Fonte: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>

Para alcançar uma cultura de paz e não violência, algumas metas foram propostas, salientando-se a redução significativa de todas as formas de violência e das taxas de mortalidade relacionadas a ela, em todos os lugares. Além dessa meta, outras relacionadas à violência contra a criança, ao crime organizado e seus fluxos financeiros, à corrupção, fortalecimento e transparência das instituições, garantias de acesso à informação e fortalecimento do Estado Democrático de Direito, também foram propostas para alcançar uma cultura de paz e não violência.

No Brasil, o acompanhamento da violência e das taxas de mortalidade é realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), órgão federal responsável pela produção e disponibilização dos indicadores. Atualmente, essa meta possui 4 indicadores, sendo 2 desses produzidos: Número de vítimas de homicídio intencional, por 100.000 habitantes, por sexo e idade e Proporção da população sujeita a violência física, psicológica ou sexual nos últimos 12 meses; 1 relacionado a conflitos que não se aplica ao Brasil: Óbitos relacionados com conflitos por 100.000 habitantes, por sexo, idade e causa; e 1 em análise/construção: Proporção da população que se sente segura quando caminha sozinha na área onde vive. Tais indicadores são produzidos em pequenas escalas, apresentados a nível nacional, grandes regiões e a nível estadual. (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2022).

Num país de dimensões continentais como o Brasil e que, historicamente, apresenta grandes desigualdades socioeconômicas regionais e locais, grandes unidades de análise podem ocultar a heterogeneidade espacial tanto dos indicadores socioeconômicos quanto da própria atividade criminal. Ao longo da história, a criminologia direcionada ao estudo da dimensão espacial dos crimes, permitiu identificar que grandes unidades de análise podem conduzir a inferências imprecisas sobre a atividade criminal, denominada por Robison (1950) de falácia ecológica. Dessa forma, os estudos relacionados à Criminologia Espacial ou Geografia do Crime, passaram a utilizar cada vez mais unidades espaciais de análise menores, movendo-se de condados para cidades, de unidades de saúde para bairros e vizinhanças, até os estudos mais atuais, que utilizam endereços, cruzamentos de vias e trechos de logradouros, por vezes denominados de micro-locais ou de análises micro-espaciais (Andresen, 2014).

As análises em nível local, articuladas com as escalas regionais e globais, são fundamentais na proposta de ações concretas que visam à redução da criminalidade no país e no mundo. Nesse sentido, a Geoinformação, aliada aos conhecimentos teóricos produzidos em outros ramos da ciência, se constituem em aliados importantes na compreensão da dinâmica criminal e das características locais do ambiente na qual ocorrem.

De acordo com Cubas e Taveira (2020, p.22), a Geoinformação, também chamada de Ciência da Informação Geográfica, “é um domínio científico autônomo que fundamenta teoricamente o conjunto de métodos, técnicas e ferramentas que compõem a esfera do Geoprocessamento”. Trata-se de um conceito geral, que abarca as Geotecnologias e o Geoprocessamento, central nas análises espaciais. Essas auxiliam não só na coleta de dados geográficos, armazenamento e análise, mas, também, na disponibilização da informação (Mapas, Cartas e WebGIS) que inclui aspectos da Cartografia (Cuba & Taveira, 2020).

Câmara e Monteiro (2001, p. 1) destacam que “o problema fundamental da Ciência da Geoinformação é o estudo e a implementação de diferentes formas de representação computacional do espaço geográfico”. Neste contexto, Moura evidencia que o Geoprocessamento “não é somente representar, mas é associar a esse ato um novo olhar sobre o espaço, um ganho de conhecimento, que é a informação” (Moura, 2014, p.4).

Assim, por meio do estudo de caso do município de Piracicaba/SP, procuramos demonstrar como a Geoinformação, aliada à Teoria da Desorganização oriunda da sociologia, auxiliam na coleta das informações, armazenamento, análise e disponibilização do conhecimento gerado sobre os delitos que ocorrem no município.

A teoria da desorganização social

O estudo da dinâmica espacial do crime é há muito tempo objeto de pesquisas que deram origem à Criminologia Espacial ou Geografia do Crime. Segundo Andresen (2014), os trabalhos

elaborados por André-Michel Guerry (1833) e Adolphe Quetelet (1842) no início do século XIX na França, foram pioneiros ao analisar a dimensão espacial do crime, sendo que o primeiro mapa do crime foi publicado por Guerry em 1829, utilizando como unidade de análise os departamentos franceses.

Os primeiros estudos sobre a distribuição espacial do crime, desenvolvidos no século XIX na França e Inglaterra, forneceram ideias importantes sobre o fenômeno. As pesquisas empreendidas na Europa demonstram que as taxas de crimes variavam significativamente no espaço e podiam ser verificadas em diversas escalas de análise. Além disso, esses padrões espaciais eram persistentes no tempo e correlacionados a problemas sociais como a pobreza, ao alcoolismo, a alta densidade populacional e ao analfabetismo, além da presença de vítimas potenciais e alvos atrativos (Brantingham, 1981 apud Bruinsma & Johnson, 2018, p.16).

No século XX, com o declínio do interesse dessa temática entre acadêmicos da França e Inglaterra, as pesquisas sobre a distribuição dos crimes se deslocou para os Estados Unidos, ganhando destaque nos estudos desenvolvidos por sociólogos da Universidade de Chicago. Dentre esses estudos, o trabalho desenvolvido por Clifford Shaw e Henry Mackay's pode ser visto como um marco, pois foram responsáveis pela elaboração da teoria da desorganização social, amplamente utilizada em diversas pesquisas atuais (Andressen, 2014).

No livro denominado *Juvenile Delinquency and Urban Areas*, Shaw e Mackay's (1942) analisaram a distribuição geográfica de jovens infratores na cidade de Chicago e identificaram que a delinquência era maior na área central e suas adjacências e menor nas áreas periféricas. Para elucidar esse modelo espacial, eles buscaram evidências na expansão e diferenciação da cidade em zonas, tomando como base as suas características físicas (áreas comerciais e industriais, distribuição de construções condenadas à demolição ou reparos e a áreas onde havia o aumento ou declínio da população), econômicas (famílias assistidas por programas sociais, o custo médio dos aluguéis, a ocupação da população e a propriedade dos domicílios) e populacionais (porcentagem de imigrantes).

Os autores constataram que as condições econômicas associadas à degradação física dos bairros, conduziram a uma forte movimentação de pessoas, tornando a compra e aluguel dos imóveis mais baratos e atraindo imigrantes para a área. As barreiras linguísticas e culturais oriundas da imigração, associadas à carência socioeconômica e a alta mobilidade residencial, levariam a dificuldades para construir uma coesão comunitária no local, influenciando o controle social informal exercido na comunidade e conduzindo ao aumento da criminalidade.

O primeiro estudo empírico que procurou testar diretamente a teoria da desorganização social proposta por Shaw e Mackay's (1942) foi elaborado por Sampson e Groves (1989). Os autores testaram a hipótese de que o baixo status econômico, a mobilidade residencial, a heterogeneidade étnica - variáveis presentes no trabalho de Shaw e Mackay's (1942) - e a desagregação familiar, incluída na pesquisa de Sampson e Groves (1989), levariam à desorganização social da comunidade e, conseqüentemente, ao aumento da criminalidade. Como medida da organização social, os autores examinaram três dimensões endógenas da comunidade: a sua capacidade em supervisionar e controlar os grupos de jovens, as redes de amizade local e a taxa de participação das pessoas na organização formal e voluntária da comunidade. A figura 2 apresenta uma extensão do modelo causal da teoria de Shaw e Mackay's da estrutura sistêmica comunitária e das taxas de criminalidade e delinquência.

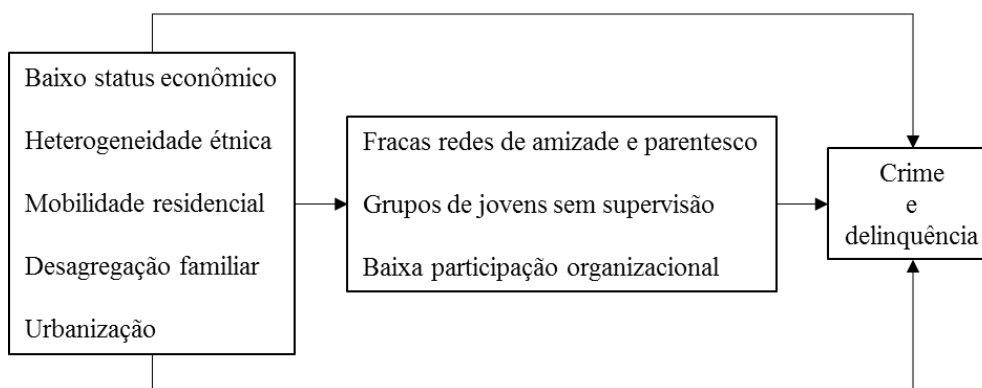


Figura 2: Modelo causal da teoria de Shaw e Mackay's da estrutura sistêmica comunitária e das taxas de criminalidade e delinquência. Fonte: Adaptado de Sampson e Groves (1989, p.783).

O estudo empírico revelou que comunidades que possuem fracas relações de amizade e parentesco, grupos de jovens sem supervisão e baixa participação organizacional, sofreram maiores taxas de vitimização, indicando um fraco controle social informal (Sampson & Groves, 1989).

U objeto de análise da criminalidade: área urbana de Piracicaba/SP

O município de Piracicaba localiza-se entre as coordenadas geográficas 47°29' e 48°05'O e 22°31' e 22°54'S, na porção centro-leste do Estado de São Paulo, tendo como municípios limítrofes: ao norte São Pedro, Charqueada, Ipeúna e Rio Claro; a leste Anhembi; oeste Iracemápolis, Limeira e Santa Bárbara D'Oeste; e ao sul Rio das Pedras, Saltinho, Tietê, Laranjal Paulista e Conchas (Figura 3).

Em 2020, segundo estimativa do IBGE (2020), o município de Piracicaba possuía uma população de 407.252 pessoas, representando um crescimento de 11,71% em relação às 364.571 pessoas censadas em 2010. Do total de habitantes registrados no último Censo Demográfico, 7.828 pessoas residiam na área rural e 356.743 na área urbana do município, representando um elevado grau de urbanização de 97,85% (população que vive em áreas urbanas) (IBGE, 2010a).

Considerando-se a área territorial de 1.376,9 km², Piracicaba possuía uma densidade demográfica de 264,77 hab/km² (IBGE, 2010a). Segundo a estimativa do IBGE de 2020, a densidade demográfica aumentou para 295,77hab./km². As áreas ao sudoeste e noroeste da região central, são as mais povoadas de Piracicaba. Na região central os locais com alta densidade demográfica correspondem aos condomínios residenciais verticais, que por suas características construtivas, reúnem um grande número de pessoas numa porção reduzida do espaço.

A população Piracicabana é constituída predominantemente por adultos (entre 30 e 59 anos) com 41,11%, seguido pelos jovens (entre 15 e 29 anos⁹) que representam 25,99% da população. As mulheres são a maioria da população com percentual de 51,1% (IBGE, 2010a).

Em relação à cor ou raça, predomina no município a população branca (72,5%), seguida por pardos (20,7%) e pretos (5,9%). As populações indígena e amarela, assim como aqueles que não declararam sua cor ou raça, representam cada uma, menos de 1% da população Piracicabana (IBGE, 2010a).

⁹ A classificação de jovens adotada é aquela considerada no Estatuto da Juventude instituído pela Lei nº 12.852, de 5 de agosto de 2013.

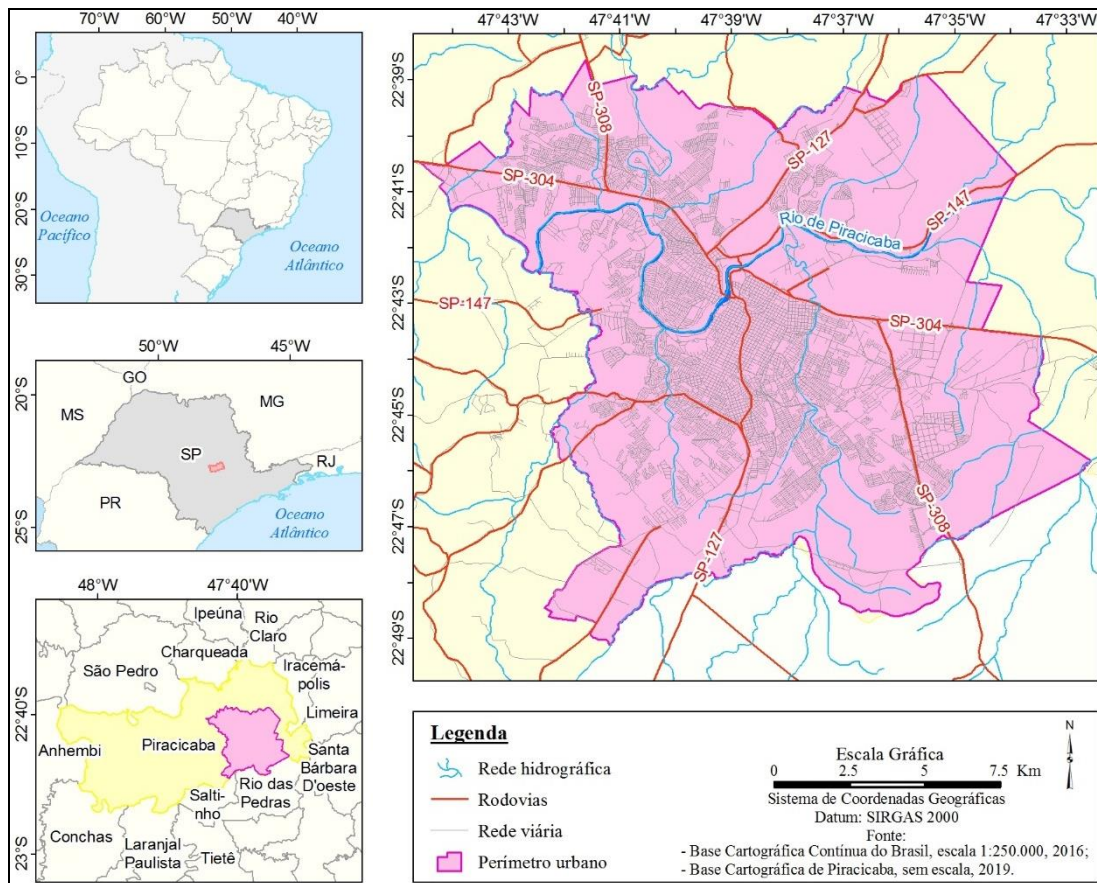


Figura 3: Localização da Área de Estudo. Fonte: Elaborado pelo autor

Devido ao número de habitantes, Piracicaba é classificada pelo IBGE como uma cidade de porte médio e na hierarquia urbana brasileira foi classificada como Capital Regional nível C. Em razão do intenso movimento pendular existente entre os municípios de Piracicaba, Charqueada, Rio das Pedras e Saltinho, o mesmo foi analisado como uma unidade urbana indissociável, denominada Arranjo Populacional de Piracicaba, no qual Piracicaba exerce o papel de atração populacional. O Arranjo Populacional de Piracicaba faz parte da região de influência do Arranjo Populacional de São Paulo (Grande Metrópole Nacional) (IBGE, 2018).

Na região de influência, o Arranjo Populacional de Piracicaba possui ligação com outros 3 arranjos populacionais e 2 municípios, a saber: Arranjo Populacional de Cerquilha - Tietê/SP (Cerquilha e Tietê), Mombuca, Santa Maria da Serra; Arranjo Populacional de São Pedro/SP (São Pedro e Águas de São Pedro); e, Arranjo Populacional de Capivari/SP (Capivari e Rafard). Considerando o próprio Arranjo Populacional de Piracicaba e sua região de influência, Piracicaba é o destino de 11 municípios.

Na hierarquia dos centros urbanos, a posição de Piracicaba é resultado de sua importância em relação à gestão do território, sendo expressiva sua participação tanto na gestão pública quanto empresarial do território, orientando o fluxo de informações imateriais que direcionam os fluxos de gestão, “incorporando ordens, hierarquias, informações, poder e dinheiro entre os agentes que se organizam de forma multilocalizados” (IBGE, 2018, p. 77). Além desses elementos que configuram as relações de longa distância, o Arranjo Populacional de Piracicaba ainda possui importantes relações de proximidade, sendo fonte de empregos para as populações dos municípios sob sua região de influência, além de se constituir o destino dessas para um conjunto de atividades, como saúde, educação, lazer, serviços especializados, dentre outros.

A importância regional de Piracicaba e sua relevância na gestão do território é produto do contexto histórico e socioeconômico que possibilitou sua expansão urbana, seu desenvolvimento industrial e, também, o crescimento do setor terciário. Em 2018, as atividades de comércio e prestação de

serviços respondiam pela maior parcela (42%) do Produto Interno Bruto (PIB) do município, seguido pela indústria (29,13%) (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2010b).

Na última década, o setor de serviços tem ocupado o primeiro lugar no número de empregos formais em Piracicaba, com destaque para os serviços de atenção à saúde humana, educação e administração pública, defesa e seguridade social. A indústria ocupa o segundo lugar, com a fabricação de máquinas e equipamentos; fabricação de veículos automotores, reboques e carrocerias; e fabricação de produtos alimentícios, responsável por grande parcela dos empregos. Já o setor de comércio ocupa o terceiro lugar no número de empregos formais, com destaque para o comércio varejista (Ministério do Trabalho e Emprego [MTE], 2021).

Os setores de serviços e comércios ocupam, predominantemente, a área central da cidade e o entorno de ruas e avenidas, caracterizando corredores comerciais. Por sua vez, a atividade industrial se localiza, predominantemente, nos distritos industriais Uninorte e Unileste, os quais se localizam, respectivamente, nos bairros Capim Fino e Unileste. Os eixos rodoviários, especialmente as Rodovias Geraldo de Barros e Fausto Santomauro, também representam locais relevantes para a atividade industrial, concentrando parcela considerável das unidades localizadas fora dos distritos industriais. Na área central do município, ainda é possível observar resquícios das atividades industriais desenvolvidas no local que, paulatinamente, vão cedendo lugar a atividade comercial, com a ocupação de galpões outrora industriais.

Entre 2010 e 2018, as pessoas ocupadas em Piracicaba tiveram uma queda no número de salários mínimos (SM), registrando uma redução de 3,32 para 3,28. Em 2018, a indústria foi o setor com a maior média salarial (3,86 SM), seguido pelo setor de serviços (3,53 SM). A agropecuária foi o setor no qual a média salarial foi a mais baixa (2 SM) (MTE, 2021). Em 2010, a classe de rendimento entre 2 e 5 SM abrangia o maior número de domicílios (36,85%), seguida pela faixa entre 5 e 10 SM, abarcando 26,90%. Juntas ambas representam a maioria dos domicílios em Piracicaba. Um número expressivo de domicílios não apresentou rendimentos (3,57%) e uma pequena parcela (0,71%) recebia até 1/2 SM (IBGE, 2010a).

Diante do exposto, evidencia-se que Piracicaba/SP possui uma posição regional importante. A indústria, com a maior média salarial no município, aliada ao setor de serviços, contribuem de modo relevante na hierarquia urbana brasileira. A população é predominantemente adulta, porém o número de jovens ainda é expressivo. Embora ocorra o predomínio da população branca, ainda é possível observar uma diversidade racial razoável, representada por pretos e pardos.

Especificidades do Levantamento de Dados e os métodos da pesquisa: ênfase a teoria da Desorganização Social com apoio nas Geotecnologias

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizadas ferramentas relativas às geotecnologias, especialmente os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), para analisar o crime a partir de uma perspectiva espacial, baseada na teoria de desorganização social. De acordo com Anselin *et al.* (2000), os SIGs são cruciais para a mensuração e representação das relações espaciais dos dados. Dentre as técnicas de análise estatística espacial se destacam aquelas ligadas à análise exploratória dos dados e de regressão espacial, propostas por Anselin (1995) e aplicadas por Melo (2017) para o estudo do crime no município de Campinas.

Os dados que medem a criminalidade em Piracicaba/SP são oriundos das informações contidas nos boletins de ocorrência, disponibilizados pela Secretaria de Segurança Pública do Estado de São Paulo (SSP) em planilhas no formato de pasta de trabalho do *Excel* (.xls). As informações foram organizadas em um banco de dados contendo os crimes registrados em Piracicaba entre 2008 e 2012, de acordo com a sua tipologia. O período selecionado teve como objetivo abarcar uma amostra de dados considerável (5 anos), evitando, dessa forma, anos atípicos que poderiam representar picos ou vales de ocorrência de crimes. Além disso, o período selecionado abrange praticamente o mesmo período da série de dados do Censo Demográfico, realizado pelo IBGE em 2010, o qual foi a base para a representação da teoria da desorganização social, conforme será exposto nos parágrafos subsequentes. Dessa forma, a série dados escolhida abrangeu quase a mesma escala temporal dos dados censitários, evitando distorções nos resultados.

Para a espacialização das informações a rotina de processamento foi realizada através das seguintes etapas:

1. Criação de novas planilhas no formato de pasta de trabalho do *Excel* (.xls) contendo cada tipo de crime;
2. Conversão das planilhas (.xls) para tabelas no formato de banco de dados padrão (*geodatabase*) da *Esri*, utilizando a versão 10.7.1 do *software ArcMap*;
3. Exclusão dos registros duplicados por meio da ferramenta “*Delete identical*” do *software ArcMap*, considerando os campos: ano, número dos boletins de ocorrência e nome da delegacia. A indicação desses campos consta na metodologia fornecida pela Secretária de Segurança Pública do Estado de São Paulo junto ao dado original para a exclusão das duplicidades da planilha;
4. Supressão dos registros que não possuem informações para a espacialização (endereço e coordenadas geográficas);
5. Reconhecimento e estruturação manual das inserções textuais dos endereços no formato brasileiro (tipo de endereço, nome do logradouro, número, nome do bairro, código postal, município, estado e país);
6. Geocodificação¹⁰ das tabelas por meio dos endereços para a obtenção das coordenadas geográficas;
7. Comparação manual dos endereços retornados pelo processo de geocodificação com os endereços originais. No caso de divergência os endereços foram corrigidos e submetidos ao processo de geocodificação novamente;
8. Criação das classes de feição no *geodatabase* para cada tipo de crime com base nas coordenadas geográficas.

Entre 2008 e 2012, foram registrados 15.584 boletins de ocorrência em Piracicaba. Desse total, 371 possuíam como rubrica o homicídio simples e qualificado, 281 estupro e estupro de vulnerável, 3.681 roubos e 5.842 furtos de automóveis, 524 roubos e 4.885 furtos residenciais. Do total de homicídios, 190 registros correspondiam a valores exclusivos¹¹ e 135 (71%) apresentavam dados que possibilitaram a espacialização. Para as ocorrências de estupro, foram identificados 141 registros únicos, dos quais 97 (68,8%) possuíam informações que possibilitaram a espacialização. Já os registros de roubo e furto de automóvel, apresentaram, respectivamente, 2.640 e 5.629 registros exclusivos, sendo que 1.431 (54,2%) registros de roubos e 3.404 (60,5%) registros de furtos apresentavam informações que possibilitaram a representação espacial. Ainda, para os registros de roubo residencial não foi identificada nenhuma duplicação e 467 (89,1%) possuíam informações para a espacialização, enquanto para os furtos foram constatados 4.878 (92%) boletins de ocorrência, sendo que deste total, 4.488 foram passíveis de cartografar.

Para a caracterização da teoria da desorganização social os dados utilizados são oriundos das variáveis demográficas e socioeconômicas coletadas durante o Censo Demográfico de 2010 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Tais variáveis são agregadas por setores censitários, sendo esta a menor unidade de análise disponível. As variáveis utilizadas e os vínculos com a Teoria da Desorganização Social constam no Quadro 1.

O município de Piracicaba é composto por 718 setores censitários, sendo 682 urbanos e 36 rurais. Desse total, 115 setores (16%) apresentaram registros de homicídios, 88 (12,3%) de estupros, 457 (63,7%) de roubos e 518 (72,2%) de furtos de automóveis, além de 263 (36,6%) de roubos e 608 (84,7%) de furtos residenciais. Quase a totalidade dos crimes citados ocorreu em setores censitários do tipo urbano que concentraram 97,4% (112) dos homicídios, 96,6% (85) dos

¹⁰ A geocodificação é o processo de conversão do endereço postal em pares de coordenadas geográficas (Davis jr & Alencar, 2011). Para esse procedimento foi desenvolvido um *script* em Python que utiliza uma Interface de Programação de Aplicativos (API) do Google Maps. O endereço composto do tipo e nome do logradouro, número, bairro, cidade, estado e país é enviado para a API que retorna o par de coordenadas do local.

¹¹ Os valores exclusivos foram identificados com base no ano, número e nome da delegacia dos boletins de ocorrência.

estupros, 97,8% (447) de roubos e 99,2% (514) de furtos de automóveis e 97,3% (256) de roubos e 594 (97,7%) de furtos residenciais.

Quadro 1 - Variáveis independentes utilizadas para caracterizar a Teoria da Desorganização Social. Fonte: IBGE (2010). Organizado com base em MELO (2017, p.99)

<i>Mobilidade residencial</i>	<i>Rompimento familiar</i>
1- Domicílios alugados	1- Responsáveis por domicílio que vivem com cônjuge
2- Residentes em domicílios alugados	<i>Heterogeneidade étnica</i>
<i>Carência socioeconômica</i>	1- Índice de Blau para cor de pele
1- Domicílios com rendimento mensal per capita de até 1/2 salário	<i>Baixa participação organizacional</i>
2- Domicílios com banheiro de uso exclusivo dos moradores	1- Domicílios alugados
3- Domicílios com lixo coletado	2- Residentes em domicílios alugados
4- Domicílios com eletricidade	<i>Redes de amizade</i>
5- Domicílios com iluminação pública	1- Residentes em domicílios em aquisição
6- Domicílios com pavimentação	2- Residentes em domicílios próprios
7- Domicílios com esgoto a céu aberto	3- Variância do rendimento mensal das pessoas responsáveis por domicílios
8- Domicílios com lixo acumulado	
9- Pessoas alfabetizadas	

A partir do número de crimes registrados em cada setor e da população inserida neles, calculou-se a taxa bruta para cada um deles. Devido ao número de setores censitários sem ocorrência alguma de homicídios e estupros e a baixa taxa registrada em muitos deles, foram estimadas as taxas bayesianas, conforme descrito em Nery, Peres, Cardia, Vicentin e Adorno (2012), para minimizar o efeito das pequenas taxas ou das taxas nulas na autocorrelação espacial. De acordo com Nery *et. al.* (2012), as taxas bayesianas consideram os dados da própria unidade e das unidades vizinhas para estimar a taxa de determinado setor censitário (taxa bayesiana local). A tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas para a taxa bruta dos crimes registrados em Piracicaba e para as taxas bayesianas estimadas para os homicídios e estupros.

Tabela 1 - Taxa bruta por 1.000 habitantes e Taxa Bayesiana Local por 1.000 habitantes (Setores Censitários). Fonte: Secretária de Segurança Pública do Estado de São Paulo (2020). Elaborado e organizado pelo Autor

Tipo de Crime		Taxa Bruta por 1.000 habitantes /Taxa Bayesiana Local por 1.000 habitantes			
		Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Y1	Homicídios	0 / 0	40 / 18,73	0,47 / 0,4	2,17 / 1
Y2	Estupros	0 / 0	47,62 / 22,5	0,35 / 0,31	2,07 / 0,95
Y3	Furto de Automóvel	0 / -	2.666,7 / -	24,7 / -	153,8 / -
Y4	Roubo de Automóvel	0 / -	1.000 / -	6,67 / -	39,8 / -
Y5	Furto Residencial	0 / -	666,7 / -	16,6 / -	46,6 / -
Y6	Roubo Residencial	0 / -	52,63 / -	1,51 / -	4,17 / -

Número de observações: n=718

A base cartográfica foi compilada a partir Plantas Cadastrais digitais (1:10.000) disponibilizadas pela prefeitura de Piracicaba, através do seu portal de geoprocessamento corporativo (2020).

Essas informações vetoriais foram adquiridas via *internet* no formato *shapefile*, em coordenadas geográficas, no *datum World Geodetic System (WGS) 1984*. Elas abarcam informações importantes para a pesquisa como arruamento e o nome dos logradouros, loteamentos, limite de bairros, hidrografia, dentre outros. Todos os arquivos foram reprojados para o Sistema de Referência para as Américas (SIRGAS 2000), no sistema de coordenadas UTM, Fuso 23S.

A análise espacial exploratória dos dados de criminalidade foi realizada com base nas estatísticas descritivas das variáveis dependentes e independentes, no cálculo de um indicador global e de um indicador local de autocorrelação espacial (Anselin, 1998). O indicador global utilizado foi o índice I de Moran, que avalia o grau de organização espacial de uma variável (Ferreira, 2014). Esse indicador foi utilizado para a caracterização da região de estudo como um todo, fornecendo um valor único como medida de associação espacial. Em conjunto com o indicador global e com o objetivo de refinar a análise exploratória dos dados, foi utilizada a proposta de estatística espacial elaborada por Anselin (1995), denominada indicador local de associação espacial (LISA).

Para a análise de regressão espacial, inicialmente foi aplicado um modelo clássico de regressão dos quadrados mínimos ordinários (OLS). Tal modelo não considera a defasagem espacial das variáveis, porém através dele é possível o acesso ao diagnóstico de dependência espacial. Tal diagnóstico indica a necessidade ou não de modelos de regressão que incorporem a defasagem espacial das variáveis, controlando assim a dependência e heterogeneidade espacial nos dados (Anselin, 1988a; Almeida, 2012).

Com base no diagnóstico de dependência espacial, foi avaliado o resultado da aplicação do teste estatístico multiplicador de Lagrange (LM). Tal teste permite identificar se os dados possuem dependência espacial, tanto na forma de uma variável espacialmente defasada omitida, quanto na autocorrelação espacial no termo do erro; e se possuem heterogeneidade espacial, na forma de heteroscedasticidade (Anselin, 1988b).

A partir do teste LM é possível escolher o melhor modelo de regressão espacial a ser aplicado. De acordo com Almeida (2012), existem diversos modelos que consideram a defasagem espacial, destacando-se o Modelo de Defasagem Espacial (SAR) ou lag espacial (LM-Lag) e o Modelo Autorregressivo Espacial (SEM) ou de erro espacial (LM-Error).

O modelo de LM-Lag considera a defasagem espacial da variável dependente e a sua fórmula geral é apresentada na Equação 1:

$$y = \rho W y + X\beta + \varepsilon, \quad (1)$$

Onde y é a variável com a taxa bayesiana estimada para os homicídios, ρ é o parâmetro espacial autorregressivo, $W y$ é a matriz espacial ponderada dos valores locais de y em áreas vizinhas, X é o conjunto de variáveis explicativas relacionadas com o coeficiente β , e ε é o termo do erro.

Por outro lado, o modelo LM-Error considera o padrão espacial manifestado no termo do erro e sua fórmula é apresentada na Equação 2:

$$\begin{aligned} y &= X\beta + \varepsilon \\ \varepsilon &= \lambda W \varepsilon + u, \end{aligned} \quad (2)$$

Onde λ é o coeficiente de erro espacial, ε é o vetor do termo do erro espacialmente ponderado utilizando a matriz de pesos W , e u é o vetor da porção não correlacionada dos erros e são independentes e identicamente distribuídos.

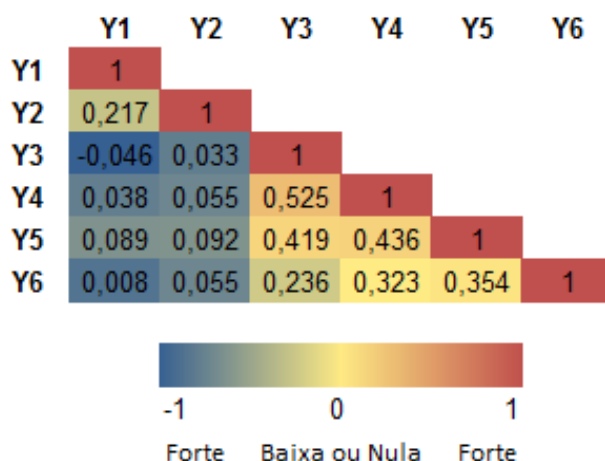
Para a análise exploratória dos dados e para a análise de regressão, foi utilizado o software de SIG gratuito GeoDaSpace versão 1.2, desenvolvido por Luc Anselin.

Resultados e Discussões

Os resultados obtidos nesse estudo evidenciaram a distribuição dos crimes na área urbana de Piracicaba, permitindo-se identificar áreas que demandam o desenvolvimento de políticas públicas visando a redução dos crimes, podendo-se atender o objetivo nº 16 dos ODS.

Desse modo, a tabela 2 apresenta a correlação entre as variáveis dependentes. Os crimes contra o patrimônio (roubos/furtos de automóveis e de residências) apresentam uma correlação maior entre si quando comparados com os crimes contra a pessoa (homicídios e estupros), com valores próximos a 0. Em linhas gerais, não há uma forte correlação entre os crimes na área de estudo, sendo a maior delas a correlação positiva (0,525) entre os furtos e roubos de automóveis. Conforme ressalta Melo (2017), essa análise não é propriamente um teste para verificar a semelhanças espaciais entre os crimes, porém constitui um bom indicativo para a análise individual de cada crime.

Tabela 2 - Correlação das variáveis dependentes. Fonte: Elaborado e organizado pelo Autor



Conforme indicado por Anselin, Cohen, Cook, Gorr e Titta (2000) um conceito importante na análise da autocorrelação espacial e, também, para o cálculo da taxa bayesiana local, é a matriz de pesos espaciais, fundamental para formalizar a noção de similaridade local e essencial nos testes estatísticos que envolvem dados espaciais. Nesse estudo, a matriz de pesos espaciais ou o critério de vizinhança adotado foi *Queen Contiguity* de primeira ordem, que considera as linhas limítrofes entre os polígonos e seus vértices para determinar a vizinhança dos setores censitários. A figura 4 exemplifica a matriz de pesos espaciais selecionada.

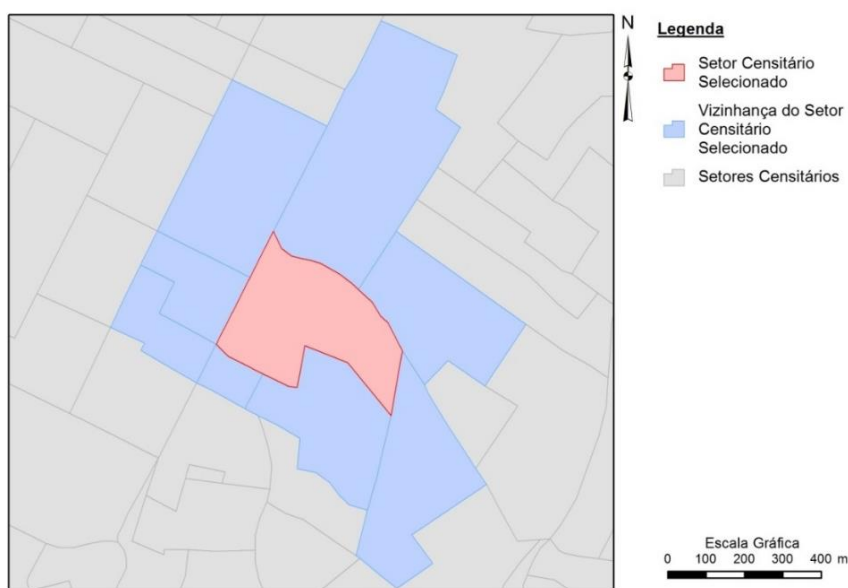


Figura 4 - Matriz de Pesos Espaciais. Fonte: Elaborado e organizado pelo Autor

Com base na taxa bayesiana local para os homicídios e estupros, e na taxa bruta para roubos e furtos de automóveis e residenciais, procedeu-se o cálculo do índice global de Moran's I (Ferreira, 2014).

O valor de autocorrelação espacial obtido para os homicídios ($i = 0,069$, $p=0,026$ com 999 permutações) para as taxas oriundas do estimador bayesiano, indica uma baixa associação espacial, porém positiva e significativa ($p<0,05$). Para os estupros, o valor de autocorrelação espacial é semelhante aos homicídios, com baixa associação espacial, positiva e significativa. Assim como os homicídios e estupros, os furtos de automóveis e roubos residenciais foram estatisticamente significantes, com índice global de Moran's I positivo, indicando associação espacial nos dados. Por outro lado, os roubos de automóveis e furtos residenciais não foram estatisticamente significantes ($p>0,05$), indicando que não houve autocorrelação espacial para esses tipos de crimes.

A aplicação do índice global de Moran's I permitiu indicar a presença da associação espacial positiva e significativa, porém por se tratar de um indicador global o resultado obtido se apresenta resumido, englobando toda a área de estudo. Para refinar esse resultado e com o objetivo de identificar processos subjacentes a esse, procedeu-se a aplicação do indicador local de associação espacial (LISA), utilizando-se para tal a mesma matriz de pesos espaciais. Tal indicador permitiu a identificação de *clusters* (áreas com taxas semelhantes, representadas pelos valores alto-alto e baixo-baixo) e *outliers* (áreas com taxas discrepantes da sua vizinhança, representadas pelos valores alto-baixo e baixo alto) (Anselin, 1995).

Na figura 5, que demonstra o resultado obtido a partir da aplicação do LISA, é possível observar que os homicídios se concentram na região periférica da área urbana de Piracicaba, principalmente ao sul (bairros Campestre, Monte Líbano e Paulicéia), sudoeste (bairros Novo horizonte, Jardim Planalto e Vila Cristina) e noroeste (bairros Vila Sônia e Parque Residencial Piracicaba) da área central. No centro de Piracicaba, predominam áreas com poucos homicídios, exceto a região no entorno da Avenida Carlos Botelho, na divisa dos bairros São Dimas e São Judas, que apresenta um pequeno *cluster* de homicídios.

De forma geral, os estupros ocorrem com maior frequência no sul, sudoeste e noroeste do centro da área urbana. No noroeste, esse tipo de crime é mais frequente nos bairros Ondas, Ondinhas e Vale do Sol, porém a região possui também locais com um baixo registro de estupros, como nos bairros Santa Terezinha e Vila Sônia. No sul, os estupros são comuns em bairros como Chicó e Taquaral, localizados nas franjas da área urbana, além de algumas áreas dos bairros Paulicéia e Monte Líbano, mais próximos a área central. No sudoeste, os bairros Paulista e São Jorge, apresentam tanto áreas com grande frequência de estupros, como locais com poucos registros. Por outro lado, os bairros Jardim Planalto e Novo Horizonte contiveram apenas áreas com alto índice de estupros. Assim como para os homicídios, os estupros não são frequentes na área central de Piracicaba, com alguns agrupamentos desse tipo de crime ocorrendo nos bairros Higienópolis, Centro e Cidade Alta, no entorno das Avenidas José Micheletti e 31 Março, e na Avenida Saldanha Marinho, entre os bairros São Judas e Cidade Alta.

Os roubos de automóveis se concentram predominantemente na área central e nas regiões sul e leste de Piracicaba. Na área central esse tipo de crime é comum nos bairros Vila Rezende e Areião, nas imediações das avenidas Rui Barbosa, Limeira e Rio Claro, e no bairro Centro nas imediações da Avenida José Micheletti e sua ligação com a Avenida 31 de Março. Ao sul, os roubos de automóveis são mais frequentes nos bairros Paulicéia, Verde e Jardim Califórnia, próximos à Avenida 31 de Março e à Rodovia Cornélio Pires, além dos bairros Nova América e Água Branca, nas imediações da Avenida Prof. Alberto Vollet Sachs e da Avenida Antonio Fazanaro, respectivamente. A leste destaca-se o bairro Piracicamirim, nas imediações da Avenida Dois Córregos com a Avenida Rio das Pedras, e os bairros Jardim Abaeté, Unileste e Dois Córregos, junto à Rodovia do Açúcar.

A região central concentra também a maior parte dos furtos de automóveis, abrangendo parte dos bairros Cidade Alta, São Judas, Cidade Jardim, São Dimas e Centro, próximas as Avenidas Armando de Salles Oliveira, Carlos Botelho, dos Operários e Saldanha Marinho. Nas áreas periféricas da cidade e em partes da região central (bairros Nova Piracicaba, Monumento e Nhô Quim) esse tipo de crime é pouco comum.

Os roubos residenciais ocorrem com maior frequência na região central (bairros Nova Piracicaba, São Dimas, Cidade Jardim, Centro e Cidade Alta), sudoeste (bairros Castelinho e São Jorge) e noroeste (bairros Ondas e Ondinhas). Os furtos residenciais estão concentrados em pequenas áreas da região central (bairros São Dimas e Centro), sudoeste (bairro Castelinho), leste de Piracicaba (nos bairros Piracicamirim e Água Branca) e noroeste (bairros Vale do Sol e Vila Industrial).

As estatísticas descritivas das variáveis oriundas do Censo Demográfico de 2010 usadas para representar a teoria da desorganização social são apresentadas na tabela 3. Conforme é possível observar, Piracicaba é um município onde os serviços básicos como coleta de lixo, acesso à energia elétrica e saneamento básico foram praticamente universalizados, com mais de 98% dos domicílios atendidos. Apesar dessa realidade, ainda persistem alguns problemas, de proporções variadas, como residências localizadas em ruas sem iluminação pública (12,75% no total e 8,44% na área urbana), pavimentação (13,7% no total e 9,44% na área urbana), esgoto a céu aberto (2,49% no total e 2,62% nos setores urbanos) ou com lixo acumulado no entorno dos logradouros (0,86% no total e 0,9% nos setores urbanos).

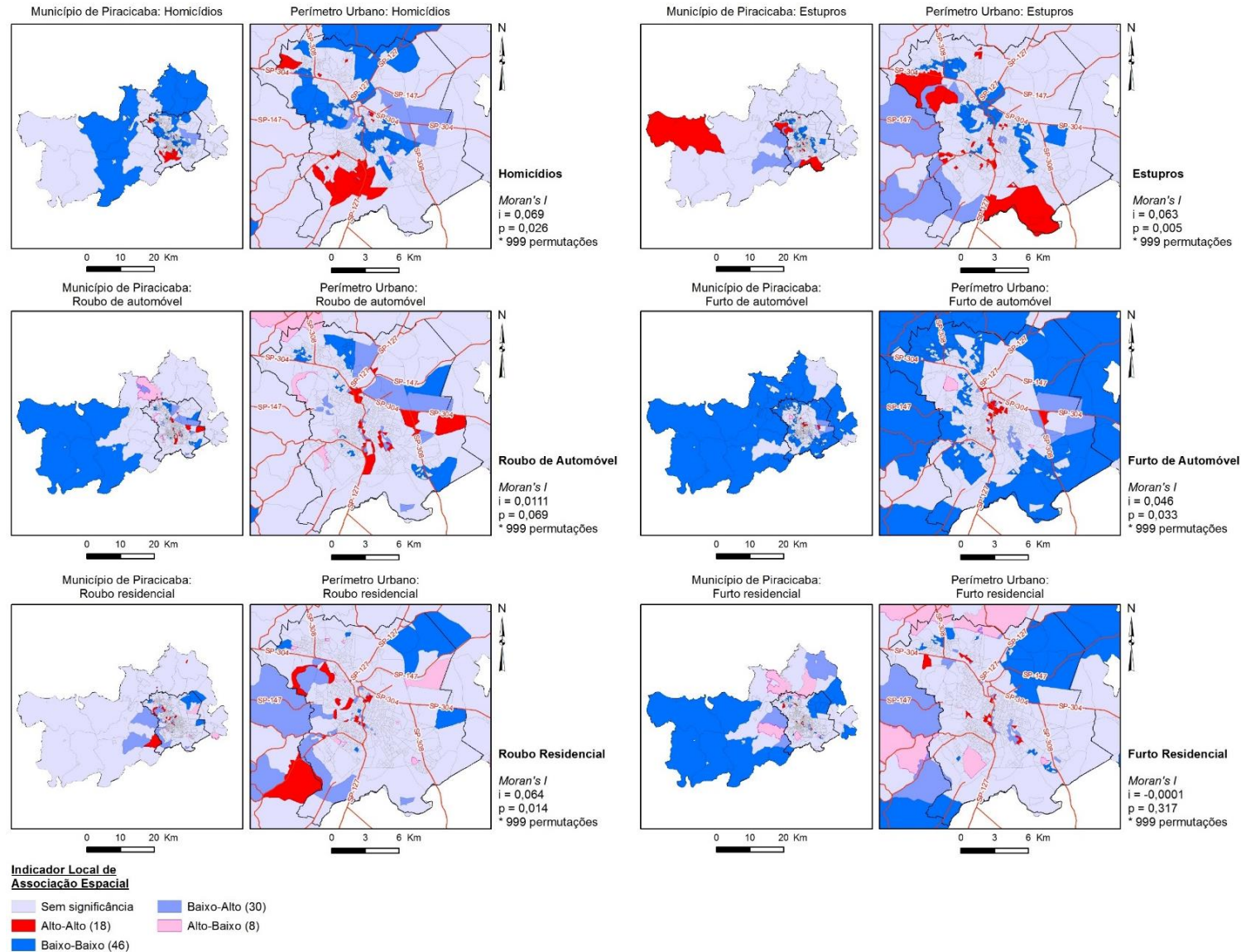


Figura 5: Indicador Global de Autocorrelação Espacial (Moran's I) e indicador Local de Associação Espacial (LISA) dos crimes. Fonte: Elaborado e organizado pelo Autor

Tabela 3 - Estatísticas Descritivas das Variáveis Independentes. Fonte: IBGE (2010). Elaborado e organizado pelo Autor

Variável	Descrição	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Nulos
X01	Domicílios particulares permanentes alugados (%)	0	64,62	22,18	13,02	61
X02	Domicílios particulares permanentes com banheiro de uso exclusivo dos moradores ou sanitário (%)	91,67	100	99,95	0,46	61
X03	Domicílios particulares permanentes com lixo coletado (%)	0	100	98,66	8,08	61
X04	Domicílios particulares permanentes com energia elétrica (%)	94,92	100	99,94	0,32	61
X05	Domicílios particulares permanentes com iluminação pública (%)	0	100	87,25	32,24	61
X06	Domicílios particulares permanentes com pavimentação (%)	0	100	86,30	32,87	61
X07	Domicílios particulares permanentes com esgoto a céu aberto (%)	0	100	2,49	14,46	61
X08	Domicílios particulares permanentes com lixo acumulado nos logradouros (%)	0	64,02	0,86	4,80	61
X09	Domicílios particulares com rendimento nominal mensal domiciliar per capita de até 1/2 salário mínimo (%)	0	83,33	10,54	10,56	61
X10	Variância do rendimento nominal mensal das pessoas responsáveis por domicílios particulares permanentes (com e sem rendimento)	0	4034152693,82	13330195,29	156440462,60	42
X11	Moradores em domicílios particulares permanentes próprios e quitados (%)	0	100	61,38	18,98	61
X12	Moradores em domicílios particulares permanentes próprios e em aquisição (%)	0	98,50	8,02	16,32	61
X13	Moradores em domicílios particulares permanentes alugados (%)	0	73,08	22,59	13,80	61
X14	Pessoas alfabetizadas com 5 ou mais anos de idade (%)	42,86	100	90,30	5,45	41
X15	Índice de blau da cor da pele	0	0,67	0,35	0,17	61
X16	Cônjuges ou companheiros(as) (de sexo diferente e do mesmo sexo da pessoa responsável) em domicílios particulares (%)	0	16,67	67,14	11,35	61

A tabela 4 apresenta a correlação entre as variáveis independentes. Como algumas delas abordam o mesmo tema referente às características dos moradores, dos domicílios e do seu entorno, a correlação entre elas foi muito forte. Como exemplo, é possível citar a porcentagem de domicílios alugados e sua forte correlação com a variável moradores em domicílios alugados (0,983). Renda, educação e o índice de blau para a cor da pele também apresentaram forte correlação, principalmente no que tange aos domicílios com renda inferior a 1/2 salário mínimo. Quanto maior a porcentagem de domicílios nestas condições menor a porcentagem de pessoas com 5 anos ou mais alfabetizadas (-0,646) e maior diversidade para a cor da pele (0,623). Os setores com maior número de pessoas alfabetizadas são aqueles com menor diversidade racial (-0,743). A relação entre pavimentação e iluminação pública também ficou evidente na correlação das variáveis independentes. Quanto maior a porcentagem de vias pavimentadas em determinado setor, maior a porcentagem de iluminação pública (0,850).

Tabela 4 - Correlação para as variáveis independentes. Fonte: Elaborado e organizado pelo Autor

	X01	X02	X03	X04	X05	X06	X07	X08	X09	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16
X01	1															
X02	0,122	1														
X03	0,252	0,109	1													
X04	0,090	0,164	0,236	1												
X05	0,368	0,078	0,483	0,184	1											
X06	0,338	0,049	0,454	0,163	0,850	1										
X07	-0,028	-0,001	0,006	-0,012	0,055	0,023	1									
X08	0,037	-0,049	0,000	0,024	-0,003	-0,034	0,283	1								
X09	-0,369	-0,199	-0,232	-0,190	-0,243	-0,269	0,103	0,060	1							
X10	0,335	0,163	0,101	0,150	0,151	0,176	-0,116	-0,098	-0,679	1						
X11	-0,412	0,011	0,113	0,067	-0,021	-0,010	0,019	-0,018	0,071	0,002	1					
X12	-0,077	-0,059	0,074	-0,114	0,140	0,169	0,038	-0,008	-0,059	-0,004	-0,260	1				
X13	0,983	0,127	0,228	0,094	0,355	0,328	-0,031	0,031	-0,382	0,356	-0,418	-0,097	1			
X14	0,355	0,193	0,225	0,259	0,267	0,308	-0,089	-0,108	-0,646	0,681	0,033	-0,124	0,380	1		
X15	-0,263	-0,170	-0,106	-0,199	-0,123	-0,127	0,098	0,112	0,623	-0,689	-0,072	0,207	-0,288	-0,743	1	
X16	-0,501	-0,014	-0,220	-0,064	-0,290	-0,317	-0,018	-0,023	0,160	-0,137	0,278	0,163	-0,499	-0,288	0,157	1

-1 0 1
Forte Baixa ou Nula Forte

Conforme observado, algumas das variáveis selecionadas possuem forte correlação. Quando esses valores são superiores a 0,8 potenciais problemas de multicolinearidade nos modelos de regressão espacial podem ser observados (Andresen, 2006; Melo, 2017). Considerando-se essa observação, Melo (2017) optou por manter essas variáveis nos modelos de regressão, argumentando a importância delas para a teoria da desorganização social e pelo fato de que, dependendo do modelo adotado, um conjunto de variáveis é mais adequado que outro. Neste estudo, seguimos a mesma linha de raciocínio e optamos por manter todo o conjunto de variáveis, analisando os efeitos das variáveis com forte correlação nos modelos de regressão.

Conforme observado durante a Análise Exploratória dos Dados, alguns crimes registrados em Piracicaba apresentaram autocorrelação espacial, indicando a dependência espacial do fenômeno em análise. Essa constatação empírica, associada ao aporte teórico, conduziu à seleção de modelos de regressão que consideram variáveis defasadas espacialmente. Segundo Almeida (2012), a omissão dessas variáveis e a aplicação de modelos de regressão clássicos que não as consideram, poderia conduzir a graves implicações para a inferência estatística, ocasionando viés e inconsistências das estimativas. Logo, possíveis conclusões com base nesses modelos de regressão, não seriam adequadas para a investigação de um fenômeno tão complexo quanto à criminalidade. Dessa forma, nesse estudo optou-se pela utilização de modelos de regressão clássicos e, também, aqueles que consideram a defasagem espacial.

Para o diagnóstico da dependência espacial e a seleção do modelo de regressão espacial mais adequado aos dados desse estudo, foi utilizado um modelo de regressão dos quadrados mínimos ordinários (OLS), utilizando a variável dependente baseada na estimativa bayesiana local para os homicídios e estupros e as taxas brutas por 1.000 habitantes para roubos e furtos de automóveis e residências. As variáveis independentes oriundas do Censo Demográfico de 2010, conforme já ressaltado, foram utilizadas para caracterizar a teoria da desorganização social.

Cabe lembrar, que para o diagnóstico da dependência espacial oriundo da regressão OLS e para os modelos de regressão espacial, foi utilizada uma matriz de primeira ordem do tipo rainha, que considera tanto os vértices quanto as arestas para a identificação das relações de vizinhança.

Assim, os diagnósticos oriundos da regressão OLS para todos os modelos indicaram a não-normalidade dos dados (Teste *Jarque-Bera*) e rejeitaram a hipótese nula de variância constante dos dados, indicando a sua heterocedasticidade (testes *Breusch-Pagan*, *Koenker-Basset* e teste robusto de *White*). Tais informações são essenciais para a escolha dos métodos adequados

utilizados nos modelos de regressão espacial, a fim de lidar com os problemas da não normalidade e da heterocedasticidade dos dados (Almeida, 2012).

Os resíduos da regressão *OLS* apresentaram indícios de autocorrelação espacial, indicado pelo índice de Moran's I, estatisticamente significativo para os homicídios, estupros, furtos e roubos de automóveis, e roubos residenciais, reforçando a necessidade de um modelo de regressão espacial para esses tipos de crime. Para o furto residencial os resíduos da regressão não apresentaram autocorrelação espacial.

É importante destacar, que o índice de Moran's I indica apenas se há ou não a autocorrelação nos resíduos da regressão, porém não indica qual o modelo de regressão espacial mais adequado para a resolução da dependência espacial. Dessa forma, foi utilizado o teste estatístico multiplicador de Lagrange (LM) para a identificação dos modelos. Tais testes indicaram o modelo de lag espacial (LM-Lag) como mais adequado ($p < 0,05$) para os estupros, roubos de automóveis e residências. Para os homicídios e furtos de automóveis o modelo mais adequado, segundo os testes aplicados, foi o de erro espacial (LM-Error). Para o furto residencial, os testes indicaram a ausência de correlação espacial, revelando a regressão *OLS* como o modelo mais adequado para esse tipo de crime.

A correlação das variáveis independentes realizada durante a análise exploratória dos dados demonstrou que algumas apresentavam alta correlação entre si ($>0,8$), gerando problemas de multicolinearidade nos modelos de regressão. O principal efeito identificado nesses casos foi à sobrevalorização das mesmas, indicando um grau de significância maior do que esperado quando analisadas conjuntamente nos modelos, e a inversão de sinais nos coeficientes. Como exemplo, é possível citar o modelo de regressão elaborado para os furtos de automóveis e as variáveis independentes que representam o número de domicílios alugados e o número de moradores em domicílios alugados (correlação igual a 0,983). Analisadas separadamente, ambas as variáveis apresentaram coeficiente positivo e não significante. Por outro lado, ao considerá-las de forma conjunta no modelo de regressão, ambas apresentaram significância estatística, com o número de moradores em domicílios alugados com coeficiente negativo, enquanto o número de domicílios alugados com coeficiente positivo. Dessa forma, sempre que tais variáveis apresentaram significância estatística, cada uma delas foi analisada individualmente nos modelos de regressão, a fim de certificar que o resultado não estava enviesado pela alta correlação.

O resultado do modelo reduzido é apresentado na tabela 6. O modelo completo considera todas as variáveis em estudo e não difere qualitativamente do modelo reduzido que é composto somente por aquelas que apresentaram significância estatística ($p < 0,1$), excluindo através do método *Stepwise*, variáveis com baixa significância e aquelas com erros oriundos da alta correlação.

Tabela 5 - Resultado dos Modelos de Regressão (2008 - 2012). Fonte: Elaborado e organizado pelo Autor

Variável	Descrição	Homicídios	Estupros	Furto de Automóvel	Roubo de Automóvel	Furto Residencial	Roubo Residencial
X01	Domicílios alugados						
X02	Domicílios com banheiro						
X03	Domicílios com coleta de lixo					0,231678	
X04	Domicílios com energia elétrica						
X05	Domicílios com iluminação pública		-0,00255544*				
X06	Domicílios com pavimentação						
X07	Domicílios com esgoto a céu aberto						
X08	Domicílios com lixo acumulado nos logradouros						
X09	Domicílios com rendimento mensal per capita de até 1/2 salário						-0,0361902**
X10	Variância do rendimento mensal das pessoas responsáveis por domicílios						
X11	Moradores em domicílios próprios		0,00581282*	-1,95717***	-0,0781552**	-0,168735**	
X12	Moradores em domicílios em aquisição		0,00648682*	-1,66732***			
X13	Moradores em domicílios alugados			-2,29865***		0,197559*	
X14	Pessoas alfabetizadas	-0,0276957**		3,11476**	0,2595995*	0,504963*	
X15	Índice de Blau para cor de pele						
X16	Resp. p/ domicílio com cônjuge	-0,0171181***	-0,0101629**	-1,74474***	-0,2085791***		
L		0,2134941*		0,101288			
R			0,191602***		0,3613618		0,1228651*
Anselin-Kelejian					1,4 (0,2367)		
R ²						0,096315	
Pseudo R²		0,0567	0,053924	0,094	0,1485		0,08355
Modelo de Regressão		Lag-Error	Lag-Spatial (ML)	Lag-Error	Lag - Spatial (GMM)	OLS	Lag - Spatial (ML)

Códigos de Significância: '****' p < 0,001; '***' p < 0,01; '**' p < 0,05; '*' p < 0,10.

Número de observações = 657

Conforme já destacado, o conjunto das variáveis que busca qualificar a teoria da desorganização social é agrupado em fatores que medem a mobilidade residencial, as carências socioeconômicas, o rompimento familiar, a heterogeneidade étnica, a baixa participação organizacional e as redes de amizades, que poderiam influenciar a organização comunitária e ter impactos nos índices de criminalidade.

Os resultados demonstram que das 16 variáveis que buscam caracterizar a desorganização social, 8 foram estatisticamente insignificantes ($p < 0,1$). Grande parte dessas variáveis (5) buscam caracterizar as carências socioeconômicas presentes em Piracicaba, como os domicílios com banheiro de uso exclusivo do morador, aqueles com energia elétrica, logradouros com pavimentação, lixo acumulado e com esgoto a céu aberto. Isso não significa que a carência socioeconômica não possua relevância nas discussões sobre a criminalidade em Piracicaba, mas sim que outras variáveis foram mais adequadas para caracterizá-la no contexto do município. Além disso, trata-se do fator com o maior número de variáveis (9) sendo compreensível que nem todas possuam um papel preponderante nos modelos de regressão.

A variável “número de domicílios alugados” também não apresentou significância estatística. Essa, em conjunto com a variável “número de moradores em domicílios alugados”, busca caracterizar tanto a mobilidade residencial, quanto a participação organizacional. Conforme já discutido no presente capítulo, as duas variáveis possuem alta correlação positiva, fato que acarretou problemas de multicolinearidade nos modelos de regressão que não puderam ser desprezados. Dessa forma, sua análise conjunta nesses modelos foi evitada, optando por aquela com maior significância estatística.

As variáveis “variância do rendimento mensal das pessoas responsáveis por domicílios” e “índice de blau para a cor da pele” também não apresentaram significância estatística. A primeira, em conjunto com outras duas variáveis que foram significativas nos modelos de regressão, buscaram caracterizar as redes de amizade, enquanto a segunda a heterogeneidade étnica.

Das variáveis selecionadas para mensurar as carências socioeconômicas no âmbito da teoria da desorganização social, a educação, representada pelo percentual de pessoas acima de 5 anos alfabetizadas, apresentou relação com o maior número de crimes. Para furto residencial e furto/roubo de automóvel a variável foi estatisticamente significativa e com coeficiente positivo. Por outro lado, para os homicídios o coeficiente foi negativo, indicando que áreas com mais analfabetismo possuem taxas maiores desse tipo de crime.

As condições de infraestrutura urbana, inseridas no grupo de variáveis que medem as carências socioeconômicas, não foram tão importantes nesse estudo. Apenas os furtos residenciais e os estupros apresentaram significância estatística com variáveis relacionadas ao tema. O percentual de domicílios com coleta de lixo apresentou coeficiente positivo em relação ao furto residencial. A iluminação pública apresentou coeficiente negativo em relação aos estupros. É importante ressaltar, que para os estupros não houve relação com outras variáveis que buscam caracterizar as carências econômicas. Sua relação significativa e com coeficiente negativo com o número de domicílios pode contribuir para a hipótese de que esse tipo de crime se relaciona de forma mais adequada a fatores situacionais, pois logradouros com poucos domicílios e com ausência de iluminação podem contribuir para o aumento das taxas de estupro.

Os resultados dos modelos de regressão indicaram que os núcleos familiares nos quais há a união estável entre duas pessoas têm um impacto significativo e negativo nos homicídios, estupros, furtos e roubos de automóveis. Sampson e Groves (1989) argumentaram que nas vizinhanças com baixos índices de rompimento familiar o controle social informal é mais forte, influenciando a capacidade dessas comunidades em supervisionar os grupos de jovens.

A mobilidade residencial é apontada como um fator que pode enfraquecer a vida coletiva, pois a criação de laços sociais e a formação da confiança demandam tempo, fato que atua diretamente no conceito de eficácia coletiva (Sampson, 2012). A mobilidade residencial, medida pelas variáveis “moradores em domicílios alugados” e “domicílios alugados” por apresentarem correlação altíssima para a área de estudo, medem o mesmo fenômeno e não foram analisadas, conforme já destacado, de forma conjunta nos modelos, mantendo apenas a mais significativa nos modelos de regressão resumidos. A mobilidade residencial foi estatisticamente significativa para os furtos de automóveis e residenciais com nível igual a 0,1%, com coeficiente negativo no

primeiro caso e positivo no segundo. Isso significa que para os furtos residenciais há suporte teórico em relação à desorganização social, pois o aumento da taxa de moradores em domicílios alugados está associado ao aumento desse tipo de crime. Por outro lado, o aumento percentual dessa variável resulta na redução dos furtos de automóveis, indicando conflito com as teorias para esse tipo de delito.

As redes de amizade, medidas pelo número de moradores em domicílios próprios e em aquisição, foram estatisticamente significativas para os estupros, furtos/roubos de automóveis e roubos residenciais. As duas variáveis que medem as redes de amizade apresentaram um p-valor menor que 0,05 para os estupros e coeficiente positivo. Para os furtos de automóveis, ambas apresentaram coeficiente negativo e p-valor menor que 0,01. Para os roubos de automóveis e furtos residenciais, apenas o número de moradores em domicílios próprios foi significativo ($p < 0,001$) e com coeficiente negativo em ambos os casos.

De acordo com Sampson e Groves (1987), os laços sociais oriundos das redes de amizade são fundamentais para a organização comunitária e, nesse sentido, deveriam influenciar na redução das taxas de criminalidade. Conforme os resultados apresentados, essa associação pode, de fato, ser estabelecida para os crimes contra a propriedade, como o furto/roubo de automóveis e furtos residenciais. Por outro lado, para os estupros esses laços sociais estão associados ao aumento desse tipo de delito. Em Piracicaba/SP, um grande percentual dos estupros ocorre nas residências e envolve pessoas do círculo familiar, amigos e conhecidos. Esse percentual é mais elevado entre crianças, onde cerca de 60% dos abusos ocorreram em casa e foram cometidos por familiares (pai, mãe, padrasto, irmão(a), dentre outros). A hipótese é a de que essa situação se reflete no modelo de regressão espacial para os estupros.

Conclusões

A violência possui um caráter complexo, pois envolve uma séria de práticas sociais que se modificam com o contexto histórico-cultural e que podem ser classificadas como tal, dificultando a construção e aplicação de um conceito universal. Tais práticas podem ser desmembradas segundo sua escala de gravidade e em conceitos menos polissêmicos, como conflito social, controle social, agressão física, dentre outros.

Apesar da dificuldade relacionada ao conceito, a violência é uma preocupação cotidiana na sociedade, presente nas conversas informais, nos noticiários e nas discussões acadêmicas. No Brasil, as crescentes taxas de criminalidade, especialmente os homicídios, acentuaram as preocupações em torno do tema e dos impactos diretos e indiretos causados por esse problema. Um desses impactos ocorre diretamente na qualidade de vida da população, acuada pelo medo e insegurança gerados pela violência. Claro que essa percepção da violência afeta os indivíduos de maneira diferencial, de acordo com a classe social a qual pertencem, o meio pelo qual buscam a informação, e suas condições sócio-espaciais e sócio-históricas (Felix, 2002).

Diante da relevância do tema e da sua importância para a promoção do desenvolvimento sustentável, torna-se fundamental a elaboração de pesquisas nos mais variados campos do conhecimento que busquem compreender a dinâmica da violência. Tal dinâmica, por conter uma dimensão espacial descrita e analisada em diversas pesquisas (Shaw & Mackay's, 1942; Sampson & Groves, 1989; Sampson, 2012; Andressen, 2014; Melo, 2017), possibilita também a análise da violência a partir da perspectiva geográfica, conforme demonstrado neste capítulo, com o estudo da distribuição espacial da criminalidade no município de Piracicaba, na perspectiva da teoria da desorganização social.

A identificação e investigação dos padrões espaciais do crime em Piracicaba revelaram nuances que fogem de uma simples análise visual dos mapas. A investigação da autocorrelação espacial dos homicídios, estupros, furtos/roubos de automóveis e furtos/roubos residenciais empreendida nesse estudo demonstrou o potencial do uso das geotecnologias na investigação criminal. Os padrões espaciais exibem as particularidades de cada tipo de crime em relação à sua distribuição geográfica, porém é possível observar uma clara distinção entre os crimes contra a pessoa (homicídios e estupros) localizados, predominantemente, na periferia de Piracicaba e os crimes

contra o patrimônio (roubo/furto de automóvel e roubo/furto residencial), concentrados na área central do município.

Embora nem todos os pressupostos da teoria da desorganização social, testados através da análise de regressão espacial, sejam compatíveis com estudos realizados em outras áreas, como no caso das cidades norte-americanas, sua aplicação demonstrou ser valiosa para explicar os crimes contra a pessoa, principalmente em relação às carências socioeconômicas e a estrutura familiar. Um exemplo claro ocorre no caso dos estupros. A teoria preconiza que locais com fortes laços de amizade e parentesco favorecem a redução dos crimes, porém nossos resultados indicaram o contrário, reforçando a necessidade de análise de cada tipo de crime separadamente.

Os resultados obtidos nesse estudo demonstraram a importância de análises mais detalhadas dos crimes, permitindo-se definir áreas que demandam o desenvolvimento de políticas públicas visando a redução dos crimes, podendo-se atender o objetivo nº 16 dos ODS. Contudo, Veloso e Costa (2018) salientam que os objetivos dos ODS não podem ser alcançados sem a participação do governo municipal, pois são nas cidades, desde as de pequeno porte, até as metrópoles, que se estabelecem e se integram não apenas o crescimento econômico, mas também desigualdades sociais, criminalidade, entre outros problemas.

Referências bibliográficas

- Almeida, E. (2012). *Econometria Espacial Aplicada*. Campinas, SP: Alínea.
- Andresen, M. A. (2006). Crime measures and the spatial analysis of criminal activity. *British Journal of Criminology*, 46, 258-285.
- Andresen, M. A. (2014). *Environmental Criminology: Evolution, theory, and practice*. Abingdon e New York: Routledge, 1.ed.
- Anselin, L. (1988a). *Spatial Econometrics: Methods and Models*. Dordrecht: Kluwer Academic.
- Anselin, L. (1988b). Lagrange multiplier test diagnostics for spatial dependence and spatial heterogeneity. *Geographical Analysis*, 20, 1-17.
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 27 (2), 93-115.
- Anselin, L. (1998). *Exploratory spatial data analysis in a geocomputational environment. Geocomputation, a primer*. Wiley, New York, 77-94.
- Anselin, L.; Cohen, J.; Cook, D.; Gorr, W. e Tita, G. (2000). Spatial analyses of crime. In: DUFFEE, D (org.). *Measurement and Analysis of Crime and Justice*. Washington, DC: National Institute of Justice, 213 – 262.
- Bruinsma, G. J. N., & Johson, S. D. (2018). *Environmental Criminology: Scope, History, and State of the Art*. In G. J. N. Bruinsma & S. D. Johson (Eds.), *The Oxford Handbook of Environmental Criminology* (pp. 6-49). Oxford University Press.
- Câmara, G., & Monteiro, A.M. (2001). Conceitos básicos em ciência da Geoinformação. In: Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A.M.; D'alge, J.C. *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos, INPE (2a. edição, revista e ampliada). Recuperado de www.dpi.inpe.br/gilberto/livro.
- Cubas, M. G., & Taveira, B. D. A. (2020). *Geoprocessamento: Fundamentos e Técnicas*. Curitiba: InterSaberes.
- Davis JR, C. A. & Alencar, R. O. (2011). Evaluation of the quality of an online geocoding resource in the context of a large Brazilian city. *Transactions in GIS*, 15 (6), 851-868.
- Felix, S. A. (2002). *Geografia do Crime: Interdisciplinaridade e Relevâncias*. Marília: Marília-UNESP-Publicações.

- Ferreira, M. C. (2014). Iniciação à análise geoespacial: Teoria, Técnicas e Exemplos para Geoprocessamento. São Paulo: Editora Unesp, 1 ed.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010a). Censo Demográfico de 2010. Recuperado de <https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010b). Produto Interno Bruto de Piracicaba de 2010. Recuperado de <https://sidra.ibge.gov.br/acervo#/S/Q>.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2018). Regiões de Influência das Cidades de 2018. Recuperado de <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/redes-e-fluxos-geograficos/15798-regioes-de-influencia-das-cidades.html?=&t=acesso-ao-produto>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2020). Estimativas da População de 2020. Recuperado de <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?edicao=28674&t=resultados>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Recuperado de <https://odsbrasil.gov.br/objetivo/objetivo?n=16>.
- Melo, S. N. (2017). Geografia do Crime: Análise espacial da criminalidade no município de Campinas-SP. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.
- Ministério do Trabalho. (2021). Microdados RAIS e CAGED. Recuperado de <http://pdet.mte.gov.br/microdados-rais-e-caged>.
- Moura, A. C. (2014). Geoprocessamento na Gestão e Planejamento Urbano. 3ª ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência.
- Nery, M. B.; Peres, M. F. T.; Cardia, N.; Vicentin, D.; Adorno, S. (2012). Regimes espaciais: dinâmica dos homicídios dolosos na cidade de São Paulo entre 2000 e 2008. Revista Panamericana de Salud Pública, 32 (6), 405-412.
- Organização das Nações Unidas (2015). Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Recuperado de <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>
- Sampson, R. J.; Groves, W. B. (1989). Community structure and crime: Testing Social-Disorganization theory. American Journal of Sociology, 94 (4), 774-802. Recuperado de <http://nrs.harvard.edu/urn-3:HUL.InstRepos:3226955>.
- Sampson, R. J. (2012). Great American City – Chicago and the enduring neighborhood effect. Chicago: The University of Chicago Press, 1.ed.
- Shaw, C. R. & Mackay. (1942). Juvenile delinquency and urban areas: A study of Rates of Delinquents in Relation to Differential Characteristics of Local Communities in American Cities. Chicago: University of Chicago.
- Veloso, R.C & Costa, M.J. (2018). AS LIÇÕES DE MEDELLÍN: intervenções urbanísticas versus qualidade de vida versus redução da criminalidade. Revista Direito Mackenzie, 12 (2), 1-23.

FENOTIPADO DE ALTAS PRESTACIONES BASADO EN SENSORES A BORDO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANTs)

Néstor Di Leo

*Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario, Zavalla, Argentina
CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina)
ndileo@unr.edu.ar*

Resumen

Los 17 objetivos y 169 metas que sirven de orientación los países para erradicar la pobreza, afianzar la paz, cuidar el planeta y lograr prosperidad para las personas, entre otros, que han sido establecidas por la ONU en 2015, no serán alcanzables sin una agricultura que alcance a satisfacer las demandas de comida, vestimenta, combustible, etc., de una población creciente, pero con indispensables premisas de sustentabilidad social y ambiental.

Las técnicas incluidas en lo que se conoce como fenotipado juegan un papel importante en la investigación científica vinculada al mejoramiento y/o al manejo de cultivos. La adquisición rápida y precisa de información fenotípica de plantas en diferentes entornos es útil para explorar los patrones de la herencia y expresión del genoma en el fenotipo de los cultivos agrícolas. Los métodos tradicionales para relevar rasgos fenotípicos de interés, como altura de planta, color de hojas, índice de área foliar (LAI), contenido de clorofila, biomasa y rendimiento, se basan en el muestreo manual, el cual insume mucho tiempo, y es laborioso y generalmente destructivo. Los vehículos aéreos no tripulados (VANTs o *drones*), equipadas con diferentes cámaras y/o sensores se han convertido recientemente en una alternativa importante para el fenotipado de altas prestaciones por su rapidez y por el carácter no destructivo, flexible y conveniente de su operación, acceso a los datos bajo demanda y alta resolución espacial.

Este capítulo presenta una breve revisión sobre la medición de parámetros que implica el fenotipado. Se introducen y discuten las alternativas técnicas que están disponibles. Además, se presentan casos de estudio de variables de interés como altura de la planta, los condición y morfología foliares. Los obstáculos y desafíos que todavía existen también son abordados. El empleo de cámaras multiespectrales a bordo de VANTs se muestra como la tecnología base que permite discriminar distintos rasgos fenotipos a partir de la combinación de índices espectrales y el análisis multivariado. En base a esto es posible la formulación de modelos que permiten pronosticar condiciones de rendimiento, biomasa, contenido de clorofila, comportamiento frente a adversidades bióticas y/o abióticas, entre otros. Pero también son muy promisorias las herramientas activas como el LiDAR, o los enfoques múltiples que posibilita la fotogrametría tridimensional.

Palabras clave: *vehículos aéreos no tripulados, fenotipado de plantas, mejoramiento vegetal*

Los Objetivos del Desarrollo Sostenible y el rol de la agricultura

La Agenda 2030 de Naciones Unidas sobre Desarrollo Sostenible tiene 17 objetivos y 169 metas que sirven de orientación los países para erradicar la pobreza, afianzar la paz, cuidar el planeta y lograr prosperidad para las personas, entre otros desafíos a alcanzar. Fue establecida el 25 de septiembre de 2015 por la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

De los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) estipulados en el pacto, ocho están directamente relacionados con la agricultura:

- ODS#1 Fin de la pobreza
- ODS #2 Hambre cero
- ODS #6 Agua limpia y saneamiento
- ODS#7 Energía asequible y no contaminante
- ODS# 12 Producción y consumo responsables
- ODS #13 Acción por el clima
- ODS #14 Vida submarina
- ODS #15 Vida de ecosistemas terrestres

El total de los 193 países miembros de las Naciones Unidas -entre ellos los que integran la Asociación de Universidades Grupo Montevideo (AUGM), se comprometieron a cumplirlos teniendo como fecha límite el 2030. Dado el impacto que tienen las actividades agrícolas en la región, se convierte en una tarea fundamental adaptar e incorporar a las cadenas productivas la visión de la Agenda 2030.

Si bien los ODS son de carácter global, tienen su principal foco en regiones que se encuentran en vía de desarrollo como es el caso de América Latina y el Caribe. Precisamente el rol de la agricultura en estas regiones es proporcionalmente mayor que en otras, de aquí la importancia central de ésta para con el cumplimiento efectivo de los ODS en plazos y formas. En este sentido, de los ocho ODS relacionados con la agricultura, claramente el N° 2 “Hambre Cero” es el de principal relación directa.



Figura 1: Isologo oficial del ODS N° 2 “Hambre Cero”, y extremos de la animación que grafica los subindicadores de desempeño: la idea no solamente es que el logro de este ODS debe ser sustentable. Fuente: FAO (2022).

El indicador N° 2 mide los avances en el logro de una agricultura más productiva y sostenible. Está compuesto por subindicadores pertinentes que ofrecerán a los gobiernos información estratégica para la formulación de políticas basadas en datos objetivos (FAO 2022). Queda claro que para poder cumplir con este ODS y varios de los demás, es requerida una agricultura mucho más productiva y sustentable a nivel global.

El crecimiento y desarrollo de las plantas, que involucran sus procesos de fotosíntesis, transpiración, floración y fructificación, son la base de la vida en la tierra y sustentan al resto de los encadenamientos bióticos, incluidos los seres humanos. Desafortunadamente, la agricultura ahora enfrenta tres grandes desafíos a la vez: el cambio climático, el agotamiento de los recursos y el crecimiento de la población (Kim, 2020). En el marco de la actual coyuntura, donde la población mundial actual que supera los 7.600 millones de habitantes alcanzará los 8.600 millones en 2030 y hasta 10.000 millones para 2050 según varios los expertos (Hickey et al., 2019), se debe sumar que en el presente existe algo más del 10% de la población mundial padece algún grado de hambre o subnutrición (de Román 2020).

Claramente, los problemas actuales para suplir a la población con alimentos, ropa, combustible, etc., se van a ver incrementados con las proyecciones demográficas futuras. Alcanzar estos objetivos va a suponer un importante reto para los productores, que precisarán aumentar el rendimiento de los cultivos a razón de un 2-4 % al año, actualmente es de un 1-3 %.

Una agricultura más eficaz para suplir una demanda creciente

En la actualidad, el 37% de las tierras mundiales son tierras agrícolas, y tan solo un 11% son cultivables y la habilitación de nuevas tierras solo es posible en desmedro de la superficie de bosques y otras áreas naturales, con lo cual la expansión horizontal se presenta muy limitada. Por otra parte, y debido a la degradación de los suelos en conjunto con el cambio climático, en algunas áreas del planeta se estiman reducciones del rendimiento físico promedio de los cultivos del orden del 8% para el 2050 (Knox et al. 2012), por lo que el desarrollo de germoplasma 'climáticamente inteligente' sería una prioridad para abordar los desafíos del cambio climático (Leakey et al, 2009) Queda entonces solamente la posibilidad de incrementar la productividad por unidad de área, pero esto debe hacerse bajo premisas estrictas de la sustentabilidad socioeconómica y socioambiental. La agricultura denominada 4.0 y todos los avances tecnológicos y el alto caudal innovativo del presente serán clave para la toma de decisiones estratégicas correctas para poder producir mayor cantidad de alimentos con un menor costo energético, climático, de forma sostenible, y reduciendo al máximo los recursos e insumos empleados (de Román 2020).

En este contexto, el mejoramiento vegetal posee un rol central y la evaluación fenotípica por lo tanto es un componente inescindible. Desde mucho tiempo antes de que se descubriese la existencia del ADN, los agricultores ya practicaban la mejora genética, inicialmente sin saberlo, basada en la selección fenotípica. El desarrollo de variedades mejoradas, dependía de la habilidad para identificar la mejor variación genética a través de los caracteres deseados según ambientes o condiciones de crecimiento y desarrollo.

Así como la selección natural siempre da muestras de buscar en las especies los genotipos más adaptados al ambiente detectando su variabilidad, el mejorador vegetal busca nueva información genética para lograr crear genotipos con mayores rendimientos, mayor tolerancia a diversos grados de estrés y/o mejores niveles de eficiencia productiva (Picardi, 2018). El desarrollo de cultivares superiores depende de la capacidad de diseñar cruces entre genotipos parentales con características complementarias y seleccionar la mejor descendencia. En la última década, los métodos de secuenciación más baratos y rápidos han generado un enorme aumento en los datos genómicos de las plantas. Los costos de la secuenciación se han reducido drásticamente, de US\$ 0,52 por Mb de secuencia de ADN en 2010 a solo US\$ 0,010 en 2019, mientras que el costo de secuenciar un genoma de tamaño humano ha disminuido de US\$ 46.774 a solo US\$ 942 (Li et al, 2021)

Fenotipado de plantas de altas prestaciones

Aunque la genotipificación de alto rendimiento se está expandiendo exponencialmente, la recolección y el procesamiento de los datos fenotípicos de plantas restringen capacidades de

análisis de la genética de los rasgos cuantitativos, constituyendo un cuello de botella importante (McCouch et al., 2013). El fenotipado de caracteres agronómicos valiosos, como el rendimiento físico, la tolerancia al estrés abiótico y la calidad nutricional, es ampliamente reconocido como el más laborioso y técnicamente desafiante porque se necesitan ensayos replicados en múltiples entornos o sitios durante varias temporadas. En este sentido, el uso de métodos de fenotipado de plantas que incorporan alta tecnología, como parte de los programas de mejoramiento, se ha convertido en una poderosa herramienta de investigación para ayudar a los mejoradores a generar cultivares que sean más adaptables a escenarios ambientales diversos y desafiantes (Lobos et al, 2017), y con tiempos de desarrollo relativamente cortos. En este sentido, ha existido una evolución paralela entre la fenómica directa y la inversa; esto es ayudar a identificar al genotipo que tenga las mejores características deseables; o bien, dado un fenotipo superior identificar los mecanismos y los genes que lo provocan (Figura 2).



Figura 2: Fenómica moderna, directa e inversa, para el mejoramiento genético en plantas cultivadas. Fuente: adaptado de Kumar et al. (2015).

La adquisición tradicional de datos a través de técnicas manuales o con herramientas mecánicas y/o eléctricas de bajo rendimiento, son costosas en lo económico y comparativamente lentas, en varios casos son de tipo destructivas, además de estar propensas algunas de ellas a errores humanos. Si bien los costos de la secuenciación del ADN y el genotipado se han reducido drásticamente en la última década, un componente fundamental para acelerar el desarrollo de cultivares nuevos y mejorados es la evaluación fenotípica rápida y precisa de miles de líneas de mejoramiento, clones o poblaciones a lo largo del tiempo (Fu, 2015) y/o en ambientes contrastantes. El fenotipo se puede definir como las características de un organismo resultantes de la interacción entre el genotipo, el medio ambiente y el manejo agronómico del cultivo, y su esencia es la expresión temporal del mapa genético de las plantas en ambientes o regiones geográficas características (Zhao, 2019), o bajo situaciones de manejo cultural distintivas.

El término fenotipado comenzó a utilizarse en los años 60s, para referirse al conjunto de metodologías y protocolos empleados en determinar el crecimiento y arquitectura del organismo, así como su composición, con la mayor exactitud y precisión posibles. Esta caracterización puede llevarse a cabo a diferentes escalas, desde un órgano hasta una población completa. El fenotipado aplica métodos y protocolos específicos para medir rasgos estructurales morfológicos, aspectos funcionales fisiológicos y tenores de contenido de componentes, a diferentes escalas: células, tejidos, órganos, dosel, plantas completas o incluso poblaciones (Guo & Zhu, 2014).

En los últimos años, las innovaciones en electrónica, informática y tecnologías de sensores han promovido un intenso desarrollo del fenotipado, ya que se han propuesto nuevos métodos específicos para la medición de parámetros fenotípicos (espectroscopia de imágenes, visión computacional, termografía infrarroja, entre muchos otros). La fenómica o fenotipado implica la recopilación de datos fenotípicos apropiados de múltiples características que sean a la postre indicadores del comportamiento fenotípico generado por un genoma particular o un conjunto de genomas (Dhondt et al., 2013). El fenotipado de plantas puede operar a diferentes niveles de resolución y dimensionalidad, desde el molecular hasta el de toda la planta o el canopeo, y en diferentes ambientes, desde condiciones controladas hasta de campo.

Surgen así las denominadas Plataformas de Fenotipado de Plantas de Alto Rendimiento (HT3P, acrónimo de *High-Throughput Plant Phenotyping Platform*). Estas estructuras pueden asumir distintas configuraciones, tamaños e integrar distintos instrumentos según los objetivos específicos que posean, pero cumplen con dos premisas básicas: relevar con alta resolución y de forma no destructiva datos fenotípicos de manera generalmente indirecta a partir de sensores (mayormente de tipo remotos), y poseer altos grados de automatización (Li et al., 2014), (Figura 3). Pueden así recopilar cantidades masivas de datos fenotípicos en formato digital de cientos de plantas todos los días, los que luego servirán para lograr el mejoramiento asistido por genómica (GAB, *genomics-assisted breeding*) a través de enfoques genómicos de mapeo de loci de rasgos cuantitativos (QTL, *quantitative trait loci*), selección asistida por marcadores (MAS, *marker assisted selection*), selección genómica (GS, *genomic selection*) y estudios de asociación de todo el genoma (GWAS, *genome-wide association studies*), lo que ayuda a los fitomejoradores y a los productores de semillas de cultivos a que su oferta pueda adaptarse a las condiciones climáticas cambiantes, y las demandas del mercado de incrementos en los rendimientos actuales o en la eficiencia agronómica (Li et al, 2021).

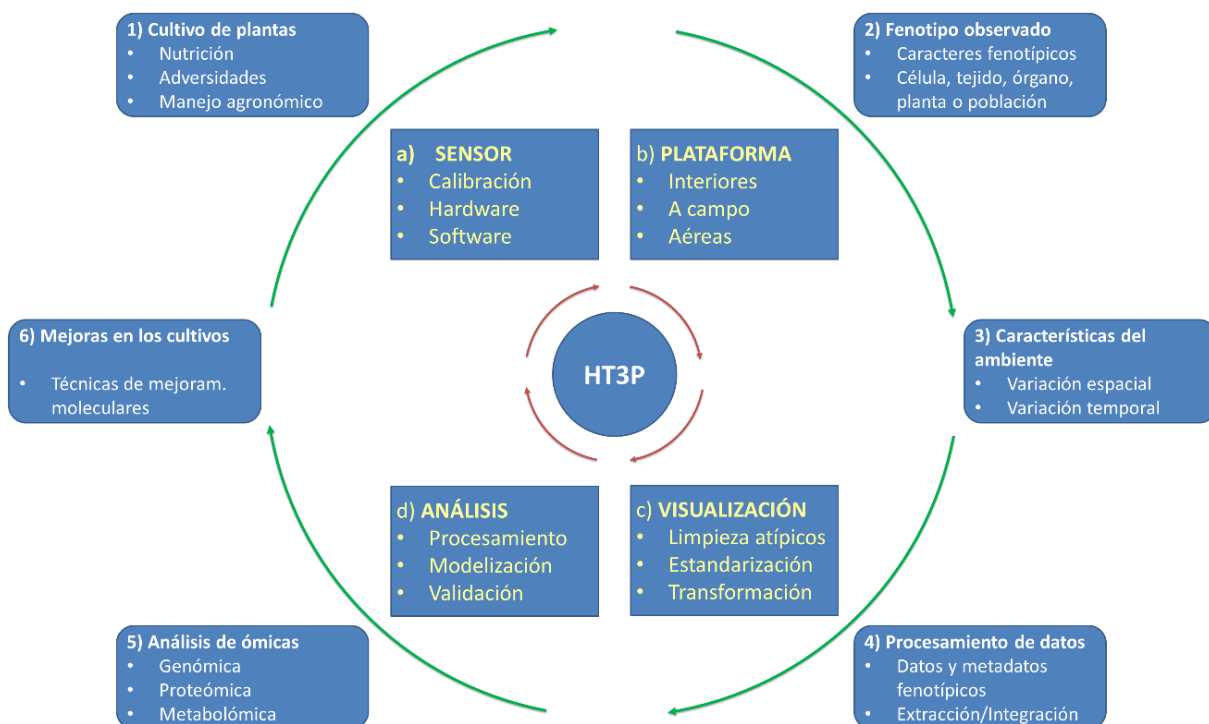


Figura3: Componentes típicos que integran una HT3P: (a) sensor, (b) plataforma, (c) análisis, (d) visualización; HT3P realiza todo el flujo de trabajo de fenotipado: (1) cultivo de plantas, (2) extracción de rasgos fenotípicos, (3) adquisición de parámetros ambientales, (4) procesamiento de datos, (5) análisis multiómico y, en última instancia, (6) ayudar en la mejora de cultivos. Fuente: adaptado de Li et al, 2021.

HT3Ps para cubrir las necesidades del mejoramiento vegetal moderno

Existen muchas configuraciones y tipologías de HT3Ps, esto es esperable debido a que los diversos programas de mejoramiento vegetal deben ajustar distintos aspectos, con la finalidad de satisfacer necesidades de investigación específicas, por lo que la gama de opciones y de desarrollos puede ser bastante amplia. Aun así, las diversas opciones se suelen clasificar según tres escenarios habituales: (1) invernaderos y cámaras de crecimiento en condiciones estrictamente controladas (*indoor*); (2) fenotipado a campo basado en sensores remotos proximales, y; (3) teledetección aérea y satelital. La figura 4, tomada de Li et al (2021), da cuenta de los diversos tipos de HT3Ps, junto con algunos subtipos y/o variantes. Comúnmente, estos esquemas operativamente se implementan integrando a dos o más de ellos, o con variantes adaptadas localmente en función de objetivos específicos.

El fenotipado en entornos *indoor*, de invernaderos y/o cámaras de crecimiento, generalmente implica el control más o menos preciso de los factores ambientales (temperatura, humedad, concentración de gases, volumen de aire, velocidad del viento, intensidad de la luz, rango espectral, fotoperíodo y contenido de nutrientes), en donde crecen y se desarrollan los distintos genotipos de interés. La multiplicidad de configuraciones de este tipo de HT3P es muy amplia, aunque la generalidad es que el fenotipado implementado en condiciones *indoor* apunta a estudiar la respuesta de las plantas a condiciones de crecimiento específicas y capturar con precisión los indicadores fenotípicos morfológicos estructurales, fisiológicos funcionales o de contenido de componentes.

Las HT3Ps que se instalan a campo, generalmente en entornos de predios experimentales que poseen una infraestructura adecuada de tipo permanente, han ido ganando preeminencia en los últimos tiempos, ya que se ha incrementado fuertemente la oferta de soluciones basadas en vehículos robóticos terrestres. Junto con esto, existen estructuras estáticas basadas en postes o torres de observación permanente; y móviles, instrumentadas en pórticos o puentes con carriles, y suspendidas por cable.

Las soluciones basadas en sensoramiento remoto proximal con base en soportes o plataformas terrestres (incluso manuales), en los últimos tiempos han concitado un importante interés. Sin poner en duda la potencialidad que poseen las soluciones robóticas terrestres y el resto de las tecnologías asociadas, esta tipología de fenotipado no abarca todos los estadios fenológicos de las plantas (el movimiento del personal o del vehículo robótico puede generar daños a las plantas), y su velocidad puede ser todavía limitante, por lo que al momento presentan limitaciones en el uso a gran escala. Por otro lado, las imágenes satelitales dependen de las condiciones climáticas (nubosidad), y su resolución espacial es relativamente baja respecto de la escala de trabajo habitual en fenotipado de plantas (Jannoura et al., 2015). Como se abordará más adelante, el empleo de sensores remotos montados en vehículos aéreos no tripulados (UAV), no presenta tales limitaciones, e implica costos comparativamente bajos.

Sensoramiento remoto en el fenotipado de altas prestaciones

El sensoramiento remoto o teledetección, es una herramienta que permite el fenotipado de plantas en condiciones multiescalares y con una gran eficacia en cuanto a la adquisición de datos, ofreciendo un solución rápida y no destructiva para el seguimiento y la evaluación de las características de las plantas. Los avances recientes en las tecnologías de sensores, cámaras y en el geoprocesamiento de los datos han aumentado las aplicaciones que buscan registrar características de las plantas en condiciones de laboratorio, invernadero o cultivo a campo, siendo entonces muy asequibles como insumo informativo para el mejoramiento vegetal. Es decir, las imágenes de sensores remotos pueden sustituir parcialmente el fenotipado manual con alta eficiencia en cuanto a la cantidad y calidad de los datos relevados, y a un costo comparativamente bajo, o incluso incluir características adicionales de la planta que no es posible recopilar mediante fenotipado manual (Chen & Zhang, 2020). Independientemente de la distancia de observación (medida de espacio entre la cámara o sensor y la planta objetivo), claramente el sensoramiento

remoto en general ocupa una altísima proporción entre los instrumentos que se integran en las HT3P.



























Distancia de fenotipado 	Outdoor / Campo: SISTEMAS AEROSPACIALES	3º Nivel Satélites (100-1400 km)	 
		2º Nivel Aeronaves tripuladas (100-500m)	 
		1º Nivel Aeronaves no tripuladas (UAVs-drones) (5-200m)	 
	Outdoor / Campo: SISTEMAS TERRESTRES	4º Nivel Suspendidas por cable (Spider-cam)	 
		3º Nivel Unidad de desplazamiento cartesiano o pórtico móvil	  
		2º Nivel Terrestre móvil / robóticos	 
		1º Nivel Pedestal o torre de observación fija o semifija	  
		Indoor / Cámara de cría / Invernadero	2º Nivel Tipo cinta transportadora
	1º Nivel Tipo banco o cama		 

Figura 4: Diversos tipos de HT3Ps mencionados en este capítulo, agrupados en: HT3Ps para interiores operando en cámaras de cultivo o invernaderos: HT3Ps para ensayos a campo, de instalación terrestre; y HT3P aeroespaciales. Fuente: tomado de Li et al, (2021).

El cuadro 1 reseña algunos de los tipos de sensores remotos que se pueden emplear en las HT3P. Como se verá, muchas de estas opciones son instalables en plataformas con configuraciones diversas, tanto en entornos operativos *indoor* como a campo, desde camas de medición, postes fijos o cintas transportadoras, hasta robots terrestres o aéreos (*drones*). También se muestran algunas de las aplicaciones posibles de llevar a cabo con los sensores remotos listados, junto con un marco de referencia en cuanto a las ventajas y desventajas de cada tipo de sensor, con base en múltiples experiencias recabadas en la bibliografía. Cabe aclarar que todos estos aspectos son altamente dinámicos, por lo que la incorporación de nuevas posibilidades científicas y técnicas sucede casi diariamente.

Caracteres fenotípicos	Caracteres morfológicos estructurales				Caracteres fisiológicos funcionales				Contenido de componentes			VENTAJAS según sensor	DESVENTAJAS según sensor
	Altura de plantas	Biomasa	Cobertura del canopy	Vuelco	fAPAR	Senescencia	Eficiencia uso de luz	Enfermedades / plagas	Contenido de clorofila	Contenido de nutrientes	Contenido agua		
 Cámara RGB												Bajo costo Alta resolución Adecuado para UAV	Computación pesada Sensible a luz ambiental Sujeto a textura uniforme
 Cámara multi/hiperespectral												Abundante información espectral Remueve interferencia de fondo Adecuado para UAV	Alto costo Datos grandes de imagen y computación pesada Sensible a condiciones ambientales
 Cámara térmica												Medición de gran región Remueve interferencia de fondo Adecuado para UAV	Sensible a condiciones ambientales Requiere extensivas calibraciones
 Sensor espectrométrico												Amplias aplicaciones comerciales Madurez tecnológica	Región de medición pequeña Interferencia de fondo Calibración dificultosa
 Sensor de fluorescencia												Sensible a clorofila Sensible a estrés hídrico	Pequeño campo de visión Requiere iluminación más intensiva
 Cámara estéreo / de rango												Provee imágenes de profundidad para procesar	Baja resolución Sensible a luz ambiente Rango de medición corto
 LiDAR												Rango de medición largo Adecuado para clasificación espacial Información espectral creciente Adecuado para UAV	Alto costo Computación pesada Información limitada en oclusiones y sombras

Cuadro 1: Algunos de los sensores disponibles actualmente para monitorear, cuantificar y estimar caracteres de tipo estructurales morfológicos, funcionales fisiológicos, y asociados al contenido de elementos componentes y/o nutrientes. Fuente: adaptado de Qiu et al (2018) y Li et al, (2021).

HT3P aeroespaciales

Consisten en el empleo de vehículos aéreos o satelitales como plataformas de transporte de los sensores remotos que realizan la tarea de fenotipado (tabla 3). El tipo de vehículo condiciona un aspecto clave en la captura de las imágenes o datos de fenotipado, ya que es lo que mayormente determina la resolución espacial: la altitud sobre las plantas o parcelas objetivo.

Entre las plataformas de sensoramiento remoto, los vehículos aéreos no tripulados (UAVs - drones), se han mostrado como las de mayor precisión y eficiencia en el fenotipado aplicado al mejoramiento vegetal a gran escala, ya que logra una resolución centimétrica a nivel de parcela o microparcela, pudiendo abarcar varios cientos de parcelas en una misión a través de imágenes multiespectrales de alta resolución o térmicas, tomadas desde altitudes de 30 a 100 m (Tattaris et al., 2016).

Comparado con las plataformas satelitales, el UAV tiene las siguientes ventajas: bajo costo, vuelo seguro y fácil de operar, tiempo de vuelo y altitud flexibles y suficientes para la escala de fenotipado, imágenes de alta calidad, alta resolución espacial y temporal, escaso condicionamiento por condiciones climáticas, acceso inmediato a los datos y recopilación de datos con la frecuencia necesaria (Vega et al. al., 2015). Comparado con aeronaves tripuladas, el UAV claramente las aventaja por seguridad y facilidad de operación, y sobre todo por menores costos. Esto hace que tanto los satélites como los helicópteros o aviones tripulados sean raramente integrados en las HT3Ps.

Sistemas aéreos no tripulados

Existe en el medio algún nivel de confusión respecto a la terminología que se emplea para mencionar a un *drone*. Para la autoridad que regula la aeronavegación civil en Argentina (ANAC, 2019), se emplea el término VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado), cuya definición formal es: "Vehículo aéreo destinado a volar sin piloto a bordo y pilotado desde una estación de pilotaje a distancia".

La definición más abarcativa y actualizada es la de Sistemas Aéreos No Tripulados (UAS - Unmanned aerial systems). En esta acepción, la aeronave propiamente dicha (UAV o *drone*), es solo una parte integrante del sistema, junto con un controlador de vuelo, gimbal, sensores de distinto tipo (generalmente conformando su carga útil), el sistema global de navegación por satélites y unidad de medición inercial (GNSS/IMU), una computadora de vuelo con enlace radial a la aeronave, etc. (Di Leo, 2015).

Existen diferentes tipos de UAVs o *drones* que se integran en HT3P, tales como helicópteros de motor de combustión interna, aeronaves de ala rotatoria múltiples (multirrotores), y aeronaves de ala fija (Figura 4 a-c).

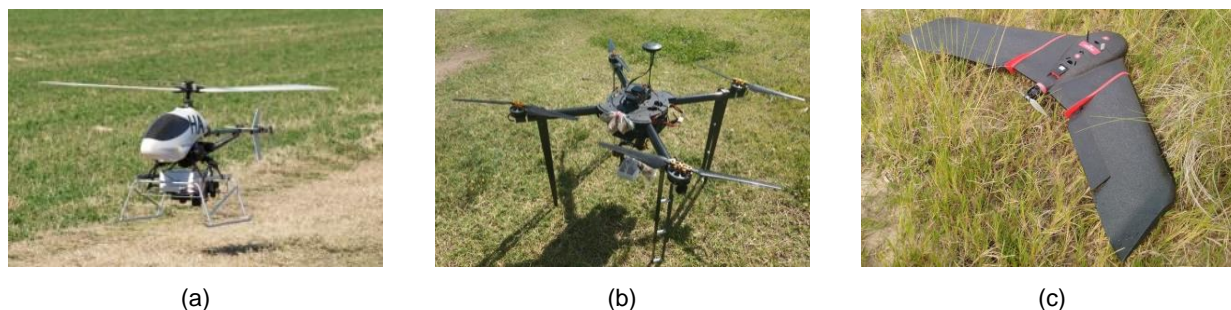


Figura 4: Tipos de UAVs/drones empleado en HT3Ps: a) Helicóptero con motor de combustión interna; b) Multicóptero de propulsión eléctrica, c) Ala fija de propulsión eléctrica. Fuentes: (a) CSIRO-Australia; (b) y (c) el autor.

La recopilación de datos fenotípicos se basa comúnmente en los *drones* de ala rotatoria tipo multirrotores (mayormente), y en los drones de ala fija, ambos de propulsión eléctrica. El

helicóptero no tripulado marcó un antecedente importante, ya que fue la primera solución tecnológica disponible para el mejoramiento vegetal de manera concreta, el australiano Pheno-Copter (Chapman et al, 2014).

La selección del tipo de *drone*, de acuerdo a sus características, capacidades, ventajas y/o limitaciones, tiene que ver obviamente con la tipología de la tarea a realizar en el fenotipado de plantas. Por ejemplo, un ensayo que está integrado por pocas unidades experimentales cubriendo menos de una o pocas hectáreas de terreno, se adapta mejor a drones multirrotores, mientras que esquemas más complejos y/o integrados por macroparcels que requieren de varias decenas de hectáreas sean más afines a drones de ala fija. En definitiva las aplicaciones a realizar tanto en agricultura extensiva como en fenotipado de plantas dependen de dos conjuntos de factores. El primero son las características de la propia aeronave (por ej., tiempo de vuelo o autonomía, altitud de vuelo, estabilidad, seguridad, confiabilidad, posicionamiento, autonomía, controlador y costo); el segundo son las características del sensor remoto a bordo (por ej., bandas espectrales, resolución de los fotogramas individuales, procesamiento, campo de visión, peso y costo) (Di Leo, 2015).

Secuencia de acciones que implica el fenotipado de plantas mediante VANTs

La aplicación de UAS en la experimentación agrícola tiene dos etapas principales: primeramente, todo lo que implica la recopilación de información empleando UAVs; y, por otro lado, todo lo que tiene que ver con el procesamiento y análisis de datos y la integración de estos con otras estructuras, a efectos de generar información sobre el fenotipo de los vegetales con rapidez, en grandes caudales, con precisión, a esto se hace referencia con el término “altas prestaciones”. Según los datos recopilados por los UAVs/*drones*, se puede detectar el rendimiento del cultivo, su biomasa, la altura, el LAI, el contenido de clorofila, entre otros. Se pueden generar mapas de visualización que muestren la diversidad de características de los cultivos en situaciones ambientales y con manejos agronómicos específicos pero propios de los sistemas de producción agrícolas. Finalmente, en estos espacios luego se pueden seleccionar los genotipos con buen desempeño, como alto rendimiento, fuerte resistencia al estrés, etc., y luego incluirlos en esquemas experimentales formales.

Más allá de su alcance geográfico y de los objetivos específicos, se pueden reconocer cinco etapas clásicas que comprenden al fenotipado de plantas con sensores montados en UAVs/*drones* (Figura 5):

1) Aspectos preliminares

- Pre-vuelo: implica la selección del *drone* y de las cámaras o sensores según el cultivo, la etapa fenológica y los caracteres de interés a relevar.
- Instalación de puntos de control en el terreno (GCP – Ground control points): son estructuras fijas instaladas en el entorno del ensayo a relevar, visibles tanto en capturas individuales como en los ortomosaicos ulteriores, a las que se les calculan las coordenadas tridimensionales precisas de sus posiciones. Su empleo es altamente deseable, ya que garantizan un adecuado ajuste geométrico en los resultados finales
- Software de planificación del vuelo: permite la planificación de la misión de tele-relevamiento sobre el área del ensayo. El software que planifica la misión idealmente debe optimizar la altura del vuelo con la configuración de la cámara, las coordenadas de cada captura (con corrección diferencial o no), la superposición de imágenes, la autonomía de la batería en relación a la magnitud de la misión, el diagnóstico de la capacidad de memoria para almacenar los fotogramas capturados y otros parámetros relevantes antes del despegue.

2) Vuelo del drone y captura de datos

- Despegue y aterrizaje: Los drones de ala fija o multirrotores poseen distintas necesidades de espacio para poder despegar y aterrizar, ya que los primeros requieren de cierto recorrido lineal para poder proceder en la aproximación final para aterrizar. Similar en el despegue, pero con recorridos más cortos. Lo anterior aplica a los drones de ala fija de como el mostrado en la figura 3-c; si se tratare de drones de mayor tamaño o envergadura probablemente sea requerido una pista o al menos un camino recto y parejo para poder despegar y aterrizar.
- Vuelo en misión: el *drone* cumplirá con la misión que fue planificada por el software de planificación de vuelo, con algunas lógicas alteraciones en las coordenadas de los puntos de captura de los fotogramas individuales por cambios en la velocidad del viento. En esta etapa, obviamente se debe tener en cuenta la cercanía a obstáculos o las características del espacio aéreo sobre el ensayo experimental a relevar, que ha sido definido por la autoridad aeronáutica local (por ejemplo, si se halla cerca de aeropuertos o helipuertos, etc.). En este punto, merece una mención el hecho de que la ubicación de los ensayos y/o el diseño de los experimentos tiene que tener en cuenta la operación de los drones sobre ellos; por ejemplo, prever que las primeras unidades experimentales no queden cerca de árboles o de columnas altas, etc.
- Todo esto debe ser tenido en cuenta en la etapa de planificación de la misión, pero el piloto debe estar entrenado como para poder dar respuesta en caso de ocurrir alguna contingencia imprevista.

3) Generación de ortomosaicos, modelos digitales de superficie o elevación

- Luego del aterrizaje del UAV, la cadena de procesamiento prosigue con la descarga de los fotogramas capturados, para con ellos poder elaborar productos informativos útiles y compatibles con etapas posteriores.
- Estos geoprocесamientos son computacionalmente costosos, por lo que los software que se emplean en general poseen opciones de procesamiento basados en la nube, o el procesamiento desktop tradicional.
- Los algoritmos en los que se basan los software que intervienen en esta etapa son del tipo SfM (Structure from Motion), ampliamente empleados en todo lo que se fotogrametría digital.
- En esta etapa es clave tomar todos los recaudos necesarios para proceder a una correcta calibración geométrica (por ejemplo, a través de GCP) y radiométrica (a través de sensores de luminosidad a bordo del drone o con placas de calibración en tierra en el prevuelo), a los efectos de que los ortomosaicos y nubes de puntos 3D generados posean la mayor calidad posibles dentro de lo que el tipo y nivel de la cámara permita (Di Leo y Giampaoli, 2021).
- Las resultantes de esta etapa son los ortomosaicos por cada banda espectral de la cámara del *drone*, con los cuales se podrán obtener diversos índices espectrales, o las nubes de puntos 3D de las cuales se derivan los modelos digitales de superficie (DSM), o de terreno (DEM), entre otros.

4) Productos de aplicación específica y extracción de la información

- Los ortomosaicos, DSMs y/o DEMs pueden se integran en bases de datos geoespaciales en entorno de Sistemas de Información Geográfica a efectos de gneerar productos de aplicación específica, para luego poder extraer información cuantittativa de estos a nivel de cada unidad experimental que posea el ensayo; sea una microparcela, un surco o plantas individuales.
- Estos productos pueden ser índices de vegetación de diverso tipo que sean capaces de estimar situaciones sanitarias, nutricionales o el impacto de estreses bióticos o abióticos en el cultivo, en general en el comportamiento fotosintético o en la acumulación de biomasa en el cultivo o las plantas.
- La extracción de valores numéricos de estos productos informativos se realiza con algoritmos de superposición espacial (interactuación entre formatos de capas ráster y vectoriales de polígonos), consulta de atributos numéricos sobrepuestos y cálculo de estadísticas básicas en entono de SIGs.

- El producto resultante de esta etapa en tabla más o menos extensa conteniendo datos numéricos, con la información de identificación (genotipos y/o tratamientos aplicados), y ubicación en el diseño experimental (bloques, repeticiones), junto con los valores extraídos de las capas ráster ordenados en columnas, y la totalidad de las unidades experimentales listadas en las filas de esta tabla.

5) Análisis estadístico, ciencia de datos e integración con otras etapas.

- Como se mencionó en los párrafos introductorios, los caracteres de interés a cuantificar más simples pueden incluir altura y conteo de plantas, cobertura del suelo, porcentaje de floración, etc. Los más complejos consisten en correlaciones entre índices espectrales específicos y concentraciones de nutrientes, productos metabólicos, signos de estrés, entre muchos otros.

- Los volúmenes de datos pueden ser muy importantes, por lo que es probable que no solo se requiera de los análisis estadísticos clásicos de los mismos, sino que se deba implementar un enfoque basado en ciencia de datos que permita incorporar algoritmos de clasificación, de agrupamiento (clustering), y análisis de correlaciones más avanzados, multivariados, multitemporales, modelos mixtos, etc. Esto dará lugar a la interpretación fenotípica propiamente dicha, la cual puede programarse para que arroje resultados de modo más o menos automático.

- En este sentido son posibles la consustanciación de integraciones con otros eslabones que se presentan en el marco del mejoramiento vegetal y de la producción de semillas. Por ejemplo, a través de la exportación de datos en formatos compatibles, reporte de anomalías emitiendo alertas, monitoreo de condiciones ambientales a nivel zonal, entre otros), tanto en actividades que se organizan a campo como en la gestión interna de la empresa (*backend*), o a nivel de *frontend* de cara a consumidores o clientes.

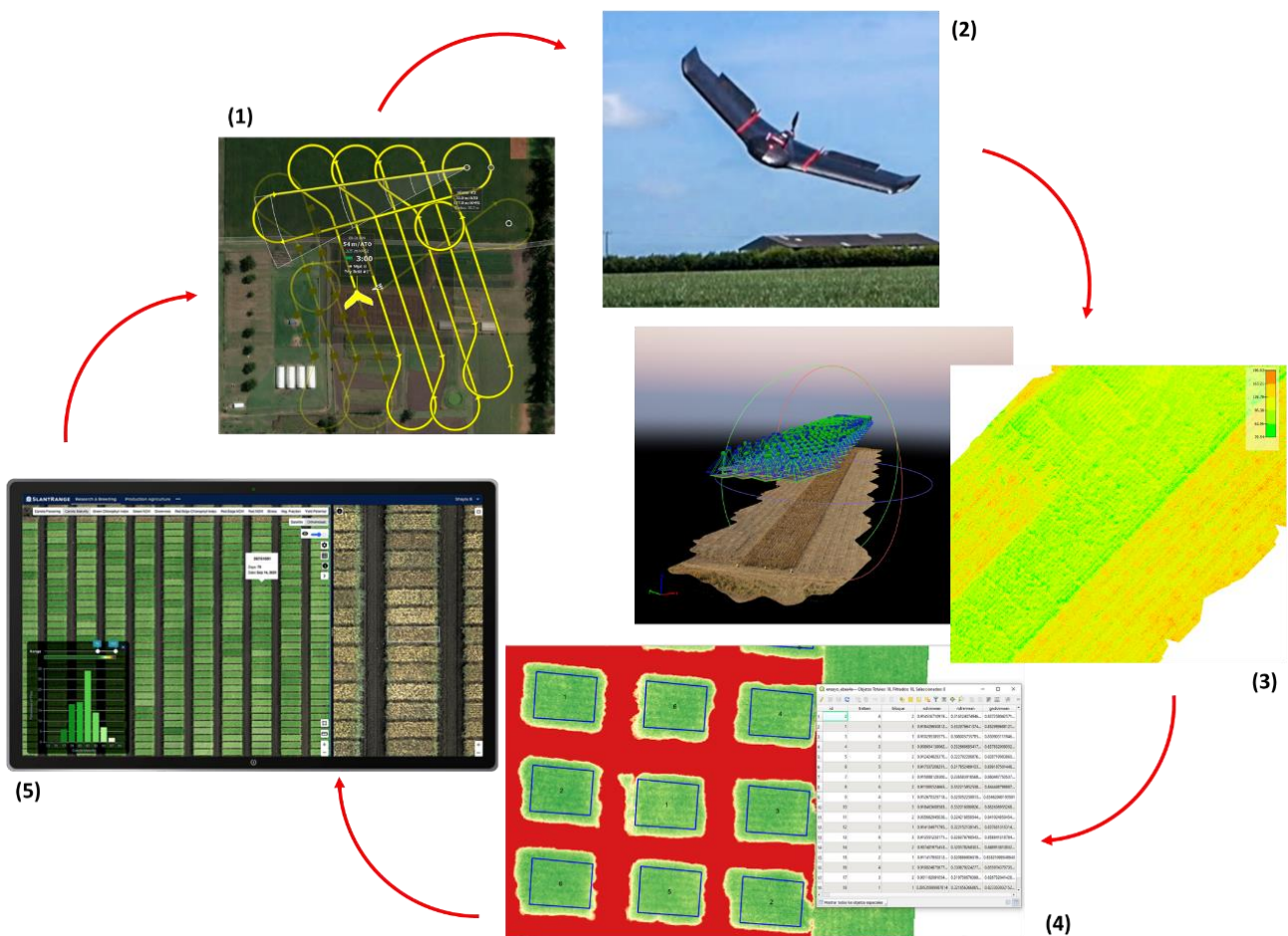


Figura 5: Etapas en el fenotipado de plantas empleando UAVs/drones. Fuente: el autor.

Algunos casos aplicados de fenotipado de altas prestaciones de plantas y/o cultivos basado en sensores a bordo de vehículos aéreos no tripulados

- **Estimación de altura en parcelas de trigo con lidar y fotogrametría 3d a bordo de UAV (Di Leo et al, 2022)**

Introducción: El carácter altura de la planta es uno de los parámetros más importantes para la selección de distintos materiales genéticos en el marco de un programa de mejoramiento. Para el cultivo de trigo, la altura está asociada con el rendimiento de grano, la biomasa total del cultivo, la susceptibilidad al vuelco o quiebre del tallo, la resistencia a ciertas enfermedades, entre otras. La metodología tradicional para la medición de altura en ensayos de trigo implica el empleo de varas o cintas con una escala métrica, que el observador debe ir aproximando o insertando en las unidades experimentales para luego registrar las lecturas en algún soporte analógico o digital. Este método es bastante exigente en cuanto a tiempo y/o cantidad de mano de obra abocada a esta tarea, y propenso a la comisión de errores de lectura y/o registro. Por lo tanto, la posibilidad de automatizar el registro de esta variable resulta relevante (Yuan et al, 2018).

El fenotipado de plantas ha ido ganando popularidad en los últimos años debido a su capacidad para detectar diversas características de las plantas individuales o los cultivos de manera no destructiva y con alto rendimiento operativo. Los sensores LiDAR a bordo de UAVs son métodos relativamente novedosos para estimar diversas características de las plantas, como la altura, la biomasa y la cobertura del suelo. Es considerada una tecnología promisoría que posibilita la reconstrucción 3D del canopeo debido a su alta resolución espacial, baja divergencia de haz y versatilidad, independientemente de las condiciones de luz ambiental. Por otra parte, las técnicas fotogramétricas 3D (F3D), a partir de cámaras georreferenciadas y orientadas instaladas a bordo de UAVs hace alrededor de una década que se vienen testeando y empleando para la determinación de altura de plantas en el fenotipado de ensayos de cultivos. La bibliografía especializada da cuenta de errores cuadráticos medios (RMSE) consistentemente bajos, y coeficientes de determinación (R^2), de entre 0,44 y 0,99 para ambas técnicas en distintas condiciones y cultivos, con una leve ventaja para el LiDAR por sobre la F3D (Madec et al, 2017; Yuan et al, 2018).

El objetivo de este trabajo es realizar una comparación preliminar entre los productos surgidos de ambos sensores en la determinación de altura de plantas en parcelas de trigo, en el marco de las tareas de fenotipado de plantas mediante sensores remotos aerotransportados.



Figura 6. Momento previo al comienzo de la misión de relevamiento del UAV donde se aprecian la totalidad de sus componentes de control y geoposicionamiento de precisión. Nótese el avanzado estado de madurez del trigo. Fuente: los autores.

Materiales y Métodos: La prueba experimental se realizó durante la temporada de crecimiento del invierno 2021 en el campo experimental de la empresa Don Mario, ubicado en Chacabuco, provincia de Buenos Aires, Argentina (34°34'36" S; 60°21'36" O). El ensayo estaba compuesto por 90 parcelas de trigo en un diseño en bloques completamente aleatorizados con tres repeticiones. Los materiales genéticos a evaluar consistían en 30 genotipos experimentales pertenecientes al programa de mejoramiento de la empresa. La siembra del ensayo se realizó el 10 de junio de 2021, y las parcelas del mismo se cosecharon entre el 4 y el 8 de diciembre del mismo año.

La recolección de los datos se realizó el 1 de diciembre de 2021, con condiciones meteorológicas óptimas (escaso viento y día despejado), sobre el primero bloque del ensayo. En éste, tres días antes del vuelo se midió la altura de las plantas desde la superficie del suelo hasta la parte superior de la espiga, excluyendo las aristas. Para cada parcela se tomaron tres mediciones al azar y se promediaron, constituyendo la altura de referencia de la parcela. El vuelo del UAV portando a bordo tanto al sensor LiDAR como a la cámara fotogramétrica se efectuó a las 13:00 horas. La altura de vuelo de la aeronave fue de 60 m desde el sitio de despegue (ATO). El hardware consiste en una plataforma aérea DJI Matrice 210 con geoposicionamiento por GNSS y corrección diferencial RTK (DJI, Shenzhen, China) (Figura 6). Sobre ésta, va montado el sistema LiDAR de estado sólido modelo LiAir V70, el cual es diseñado y producido por GreenValley International.



Figura 7. Disposición del sensor integrado LiAir V70 en la parte ventral del UAV DJI Matrice 210 (izq.). Detalle de la cámara Sony 5100 integrada en la carcasa del sensor (der.). Fuente: los autores.

Este conjunto incorpora e integra una cámara digital de alta definición marca Sony, modelo A5100, que se puede utilizar para generar productos de fotogrametría (fotomosaicos y nubes de puntos 3D), en la misma misión de telerrelevamiento sobre los sitios u objetos de interés. Las dimensiones de este sistema sensor son 178 * 81.6 * 140.2 mm y su peso es de 1.1 kg (Figura 7). El sensor LiDAR presenta una tasa de escaneo máxima de 240.000 puntos/seg, lo que en modo triple retorno posibilita el registro de 720.000 pts/s en total; su campo de visión instantáneo es de 70,4° (horizontal) y 4,5° (vertical), y su distancia máxima de detección oscila entre 180 m (10% de reflectividad) a 450 m cuando la reflectividad del objeto/sitio de interés es del 80%, en estas condiciones la precisión en alcance es de ± 2 cm. La cámara RGB incorporada presenta una resolución efectiva de 6000 x 3376 píxeles, y se basa en un sensor de captura CMOS Exmor APS-C (23,5 x 15,6 mm) de 24,3 megapíxeles. Se configuró el modo de captura en automático y el balance de blancos para día soleado. A la altura de vuelo empleada en la misión, se generaron fotogramas de aproximadamente 1,44 cm/píxel.

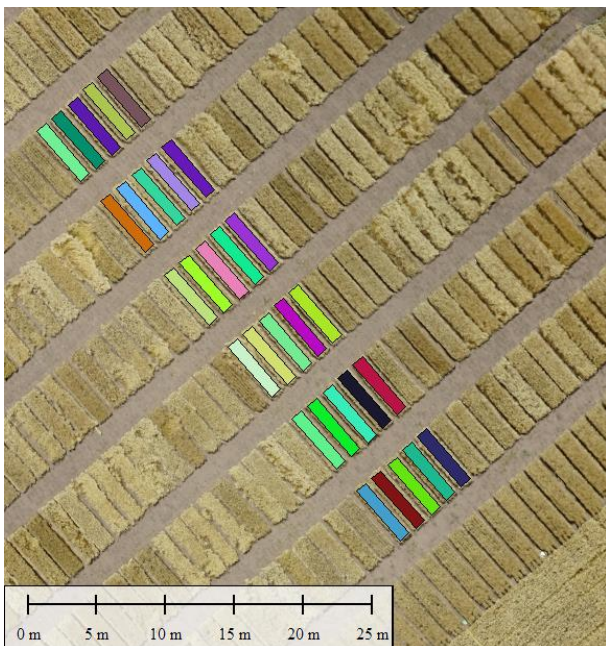


Figura 8: Parcelas correspondientes al primer bloque evaluado. Fuente: los autores.

El software que lleva a cabo el procesamiento y la gestión de la nube de puntos se denomina LiDAR 360 versión 5.0, desarrollado por el mismo fabricante del sensor LiDAR, cuyas funciones incluyen la gestión de datos y comprobaciones de calidad, alineación automática de bandas, clasificación de nubes de puntos, etc. A partir de la nube de puntos lograda, se suceden algunos filtrados adicionales y finalmente se interpola el DSM. Las imágenes RGB se procesaron utilizando el software Pix4Dmapper (Pix4D, Lausana, Suiza) para generar un modelo digital de superficie (DSM).

La carga de los fotogramas individuales debe ser acompañada por la adición de un archivo de geolocalización que genera el autopiloto del drone, que contiene las tres coordenadas (longitud, latitud y altura), junto con los tres ángulos de inclinación (rolido, alabeo y cabeceo). Luego el geoprocesamiento prosigue

en tres pasos, en el último de los cuales se empleó la triangulación de Delaunay para interpolar entre puntos de enlace para generar el DSM, cuya salida queda guardada bajo un archivo GeoTIFF.

Resultados y discusión: En la figura 8 se muestra la disposición de las 30 parcelas relevadas, superpuestas al fotomosaico surgido del relevamiento. En las figuras 9 (a) y (b) se observan las vistas 3D de la nube de puntos generadas por el sensor LiDAR y la nube de puntos densificada surgida del procesamiento fotogramétrico de las capturas de la cámara RGB. La primera de estas claramente presenta mayor densidad de puntos (a razón de 2037 pts/m²) que la segunda (con 502 pts/m²).

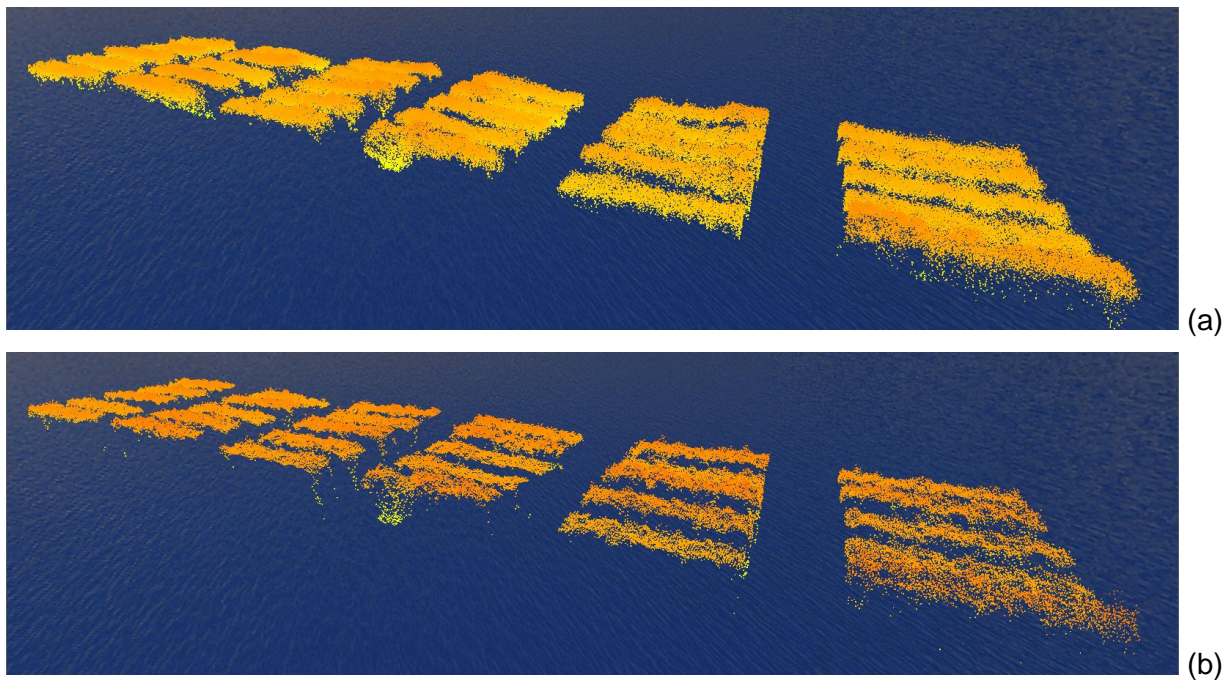


Figura 9: Nube de puntos proveniente del sensor LiDAR LiAir V70 (a), y nube de puntos densa surgida del geoprocesamiento fotogramétrico de las imágenes RGB captadas por la cámara Sony 5100 (b). Fuente: los autores.

En la figura 10 se muestra la regresión entre las alturas del canopeo de las variedades de trigo en cada parcela registradas en la nube de puntos obtenida a partir del LiDAR, respecto de F3D; la similitud fue a lo sumo intermedia entre ambos sensores. La ordenada al origen se presume que obedece a alguna configuración errónea de la posición focal de la cámara respecto del LiDAR, ya que el controlador de vuelo del UAV, junto con su geoposicionador GNSS con corrección diferencial RTK se halla configurado respecto de este último sensor. En pruebas sucesivas se podrán ajustar estos aspectos.

Las parcelas que presentaron menor similitud entre ambos sensores, fueron las que verificaron alguna condición de vuelco parcial, situaciones en las cuales se observó que la fotogrametría tiende a acentuar diferencias de altura, mientras que el LiDAR ofrece una caracterización más suave y realista del límite superior del canopeo. Mayormente en estos casos, pero también a nivel general, la relativamente escasa resolución espacial del relevamiento fotogramétrico (1,44 cm/píxel) y la menor densidad de puntos por unidad de superficie, respecto de la del sensor LiDAR (ésta 4 veces mayor), es probable que haya conspirado contra la fotogrametría en la comparación. En los casos de estudios 3D en fenotipado de plantas realizados exclusivamente con fotogrametría, se seleccionan tamaños de píxeles de algunos pocos milímetros, generalmente no más de un centímetro (Guo et al, 2021).

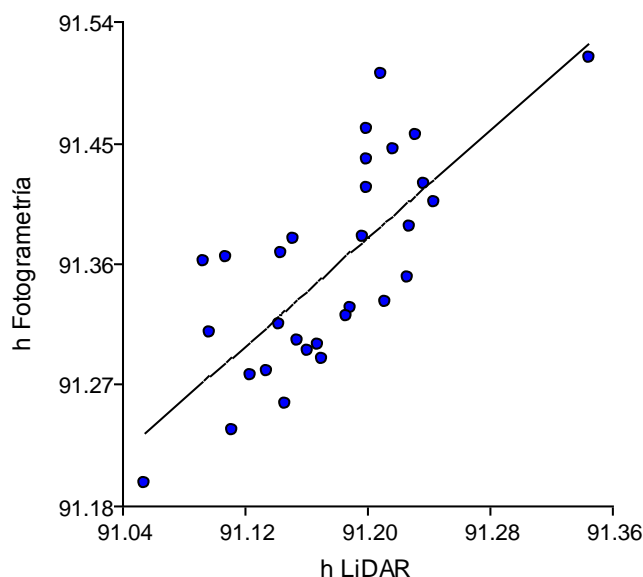


Figura 10: Regresión entre las alturas promedio de las parcelas (n = 30), según la nube de puntos del LiDAR (h LiDAR), versus las estimadas por la nube de puntos densificada obtenida por fotogrametría (h Fotogrametría). $r^2 = 0,55$; r Pearson = 0,70. Fuente: los autores.

La comparación de ambas estrategias de sensoramiento de la variable altura respecto de la medición real a campo, arrojó ajustes bastante bajos ($r^2 = 0,54$ para LiDAR y $r^2 = 0,25$ para fotogrametría). Es probable que la causa de esto sea la medición al azar de la altura en tres sitios para luego promediar. Se deberá probar con un número mayor de muestras al azar por cada parcela, o sistematizar esta determinación según distancias fijas.

Conclusiones: Tanto el relevamiento activo por LiDAR como la F3D se muestran como eficaces en la determinación de altura en fenotipado de trigo, aunque la para la última se deben emplear resoluciones espaciales más altas. También, el registro de alturas a campo para las validaciones debe ajustarse y poseer una densidad mucho mayor para poder representar adecuadamente los datos 3D de ambos sensores. En futuros trabajos se deben comparar en etapas fenológicas distintas y ajustando todos los parámetros.

- **Comparación de índices espectrales normalizados captados por drones en la discriminación de rasgos fenotípicos en soja (*Glycine max L. Merr.*) (Di Leo & Forbice, 2021)**

Introducción: Desde los albores del sensoramiento remoto digital a fines de la década de los 60s y principios de los 70s, se han desarrollado varios índices de vegetación (IV), a partir de datos recopilados por diversas plataformas de percepción remota, cuyo objetivo era la cuantificación de biomasa, la estimación de rendimientos, la detección de condiciones de estrés causados por factores bióticos o abióticos, entre otros. En tiempos más recientes, el desarrollo y la mayor disponibilidad de vehículos aéreos no tripulados (*drones*), junto con sensores multiespectrales adaptados a estos, ha impulsado su empleo en el fenotipado de plantas, que es la actividad o proceso que tiene por objetivo determinar, analizar o predecir todo o parte del fenotipo de un organismo.

Un índice de vegetación representa una combinación o un proceso de filtrado de múltiples conjuntos de datos espectrales, que genera un valor único para cada píxel en una imagen que originalmente posee más de un canal espectral, generado por un modelo matemático y utilizado para desarrollar un rango continuo que resalta determinados aspectos temáticos de interés. El índice de vegetación más utilizado y estudiado es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI – Rouse et al., 1974), el cual se ha empleado en un sinnúmero de aplicaciones diversas. Básicamente, se basa en el comportamiento espectral diferencial de la vegetación entre los canales infrarrojo cercano y rojo, el cual que resalta la dinámica fotosintética de la vegetación, ya que cuando mayor sea ésta (mayor absorción y por ende menor reflectancia en el rojo), mayor será el NDVI. La simpleza de su formulación matemática, y la normalización de sus resultados (valores en un rango de -1 a $+1$), son ventajas adicionales destacables. Se calcula mediante la fórmula $[(\text{Infrarrojo cercano} - \text{Rojo})/(\text{Infrarrojo cercano} + \text{Rojo})]$. Esta estructura matemática ha sido emulada para evaluar otras combinaciones espectrales, que apuntaban a resaltar componentes diversos de la fisiología vegetal.

El objetivo de este estudio es evaluar la capacidad discriminante de diversos índices espectrales basados en el NDVI, pero intercambiando la banda espectral que representa idealmente a los

procesos fisiológicos que absorben diferencialmente la energía lumínica, es decir el segundo término del numerador y del denominador de la fórmula.

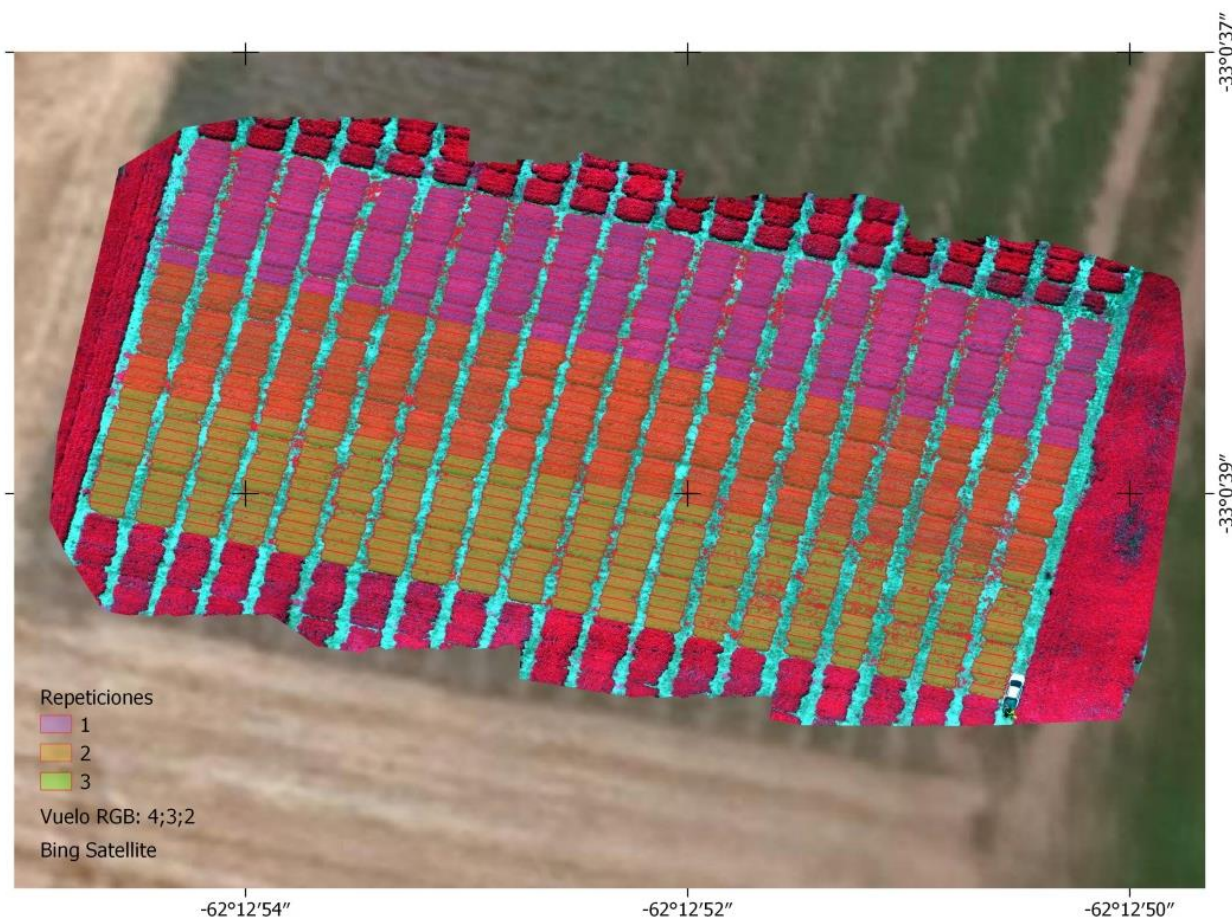


Figura 11: Diseño experimental evaluado

Materiales y métodos: Se empleó un set de datos captados por un *drone* DJI Phantom 4 – MSP (multiespectral, con canales en el azul, verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano), compuesto por 398 capturas las cuales se realizaron el 5 de febrero de 2021 sobre un área de 4.800 m² que integra un ensayo resistencia a enfermedades de cultivares de soja (240 tratamientos con tres repeticiones) (Figura 11). Esta área de trabajo se ubica en Inriville, provincia de Córdoba, Argentina (33°00'38"S; 62°12'52"O). El software Pix4D Mapper (Versión 4.6, PIX4d, Suiza) (<https://pix4d.com/>) se utilizó para la generación de fotomosaicos por cada banda espectral, obteniéndose una resolución espacial de 9 milímetros por píxel. Se calcularon los índices NDRE [(Infrarrojo cercano – Borde rojo)/(Infrarrojo cercano + Borde Rojo)], GNDVI [(Infrarrojo cercano – Verde)/(Infrarrojo cercano + Verde)]; BNDVI [(Infrarrojo cercano – Azul)/(Infrarrojo cercano + Azul)], además del mismo NDVI. Mediante el software Infostat se analizaron correlaciones y las varianzas entre repeticiones y tratamientos para cada índice espectral (Test: LSD de Fisher, con Alfa = 0,10).

Resultados y discusión: Bajo las condiciones fisiológicas y fenológicas de la soja en el ensayo relevado (estado fenológico de R4 a R5 en la escala de Fehr y Caviness), los índices analizados presentan medias elevadas y altas correlaciones entre todos ellos. El que menos se correlaciona con los restantes es el NDRE.

El análisis de la varianza aplicado a las 240 variedades analizadas indicó que el índice espectral más capaz de detectar diferencias fue el NDRE (47 niveles), GNDVI (46), BNDVI (43) y NDVI (37).

El análisis de la varianza muestra que ninguno de los cuatro índices espectrales analizados logró detectar diferencias entre más de dos de las tres repeticiones. NDVI y GNDVI separaron la 1ra y la 3ra repetición, mientras que el NDRE diferenció la 1ra de las dos siguientes. A través de BNDVI no se detectaron diferencias en el comportamiento reflectivo promedio de las repeticiones (Figura 12).

Tabla 1: Coeficientes de correlación de Pearson entre los índices espectrales evaluados.

		NDVI	NDRE	GNDVI
Coeficientes de correlación de Pearson:	NDRE	0,89		
	GNDVI	0,98	0,95	
	BNDVI	0,97	0,84	0,94

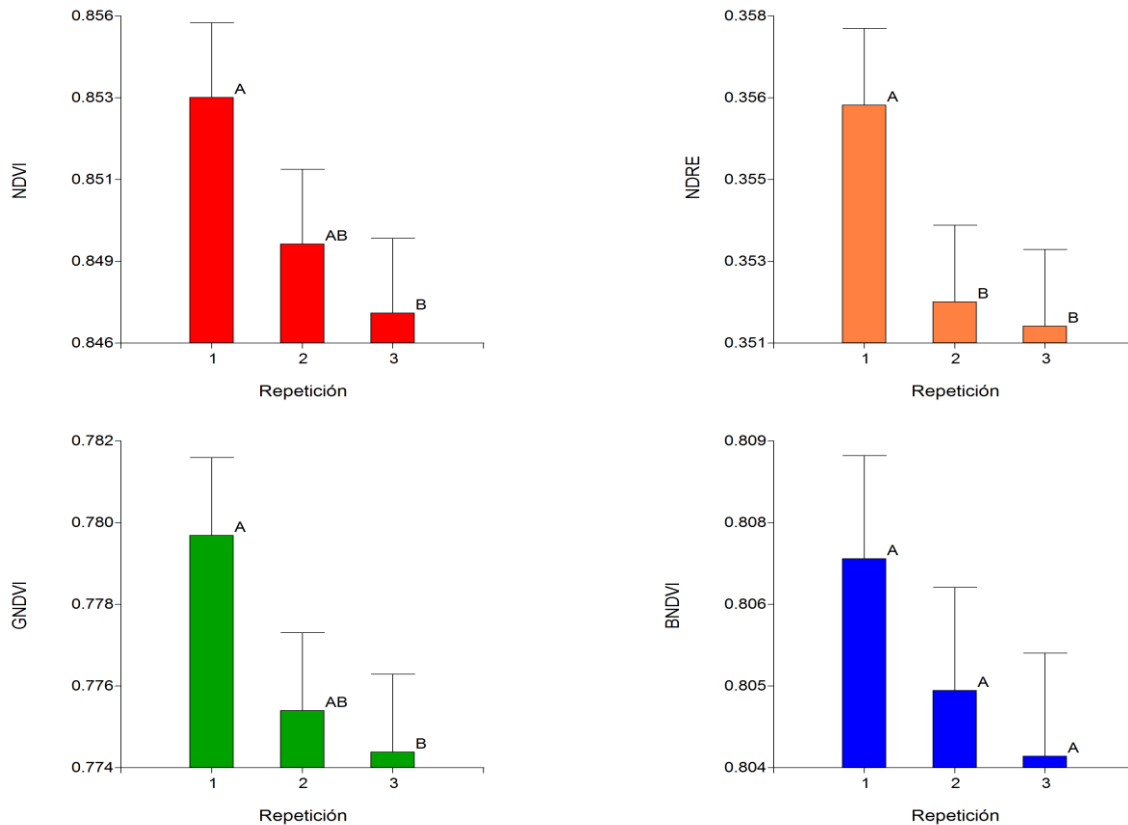


Figura 12: Capacidad de los índices de vegetación evaluados en la discriminación de diferencias en las repeticiones. Medias con misma letra no son significativamente diferentes ($p > 0.10$)

Conclusión: Es conveniente emplear varias combinaciones de índices de vegetación (no solo el NDVI), según lo permita la resolución espectral de la cámara a bordo del *drone*, ya que el comportamiento reflectivo de los distintos tratamientos podría ser mejor diferenciado con otros.

- **Implementación de herramientas de fenotipado de alto rendimiento para evaluar el marchitamiento por *Verticillium dahliae* en girasol (Domínguez et al, 2022)**

Introducción: El hongo *Verticillium dahliae* infecta la planta a través de las raíces y coloniza su sistema vascular, bloqueando el flujo de agua e induciendo finalmente los síntomas de marchitez (Van Alfen, 1989). Este daño da lugar a una reducción significativa de la tasa de transpiración de las hojas, lo que finalmente conduce a la clorosis y defoliación de las mismas, provocando un cambio de reflectancia espectral (Hillnhütter et al. 2010). El contenido de clorofila tiende a disminuir en las plantas infectadas, mostrando una menor reflectancia en las regiones visibles verde (550 nm) y roja (650-720 nm). Las plantas estresadas también muestran una reducción en

la densidad del canopy y en el área foliar que lleva a una disminución de la reflectancia espectral en el rango infrarrojo cercano (680-800 nm). Además, la región del infrarrojo térmico (8000-15.000 nm) es muy adecuada para la detección de la infección por *V. dahliae* debido a la disminución de la tasa de transpiración que induce el cierre de los estomas, reduciendo el enfriamiento por evaporación y aumentando la temperatura del canopy. Teniendo en cuenta estos cambios en el espectro de las plantas infectadas, los síntomas de la enfermedad podrían detectarse a distancia en las regiones del espectro visible, del rojo lejano, el infrarrojo cercano y la región del infrarrojo térmico (Calderón et al., 2015).

Las plataformas de teledetección de vehículos aéreos no tripulados (UAV- RSP de sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing Platforms) conocidos popularmente como "drones" se caracterizan por su flexibilidad, bajo costo y su baja altura de vuelo y los convierte en una herramienta de gran importancia y versatilidad para el fenotipado de cultivos (Liebisch et al., 2015) y la agricultura de precisión (Zhang & Kovacs, 2012). Estas plataformas permiten combinar sensores, registrar imágenes de alta resolución, son flexibles para monitorear varios ensayos con regularidad y un gran número de parcelas simultáneamente.

En este trabajo se presenta la implementación de índices de vegetación obtenidos a partir de una cámara multispectral para el fenotipado de MV en una población multiparental de mapeo genético de girasol.

Materiales y métodos: Una selección de 349 familias F2 de la MAGIC2 de girasol de INTA y sus 8 líneas parentales fueron caracterizadas fenotípicamente para su respuesta frente a MV en el infectario natural de la EEA INTA Balcarce (37° 50' O" S, 58° 15' 33" O, Buenos Aires, Argentina). El diseño experimental fue de tipo Alpha Lattice en dos repeticiones y se utilizó un control interno susceptible para poder relevar la carga patogénica del infectario. La fecha de siembra fue el 9 de noviembre de 2020. La siembra se realizó de forma manual sobre los surcos previamente marcados a 0.7 m con una sembradora, mediante el uso de "escopeta" y golpes de 2 semillas cada 20 cm para alcanzar una densidad de 5 plantas por metro lineal. Las unidades experimentales consistieron en un surco de 5 m de largo.

La evaluación de la MV se realizó a nivel de planta individual, registrándose dos variables fitopatológicas, la Incidencia (INC) y la Severidad (SEV). La INC representa la sumatoria de plantas sintomáticas sobre el total de plantas por parcela. La SEV se estimó usando una escala ordinal de 6 niveles de (0 a 5) siendo el valor "0" = Planta sana, "1" = Estrato basal sintomático (-20% de la parte aérea), "2" = Síntomas hasta por debajo del estrato medio de la planta (40-60%), "4" = Síntomas en estratos superiores y el "5" = Planta marchita o con síntomas en todos sus estratos.

Para la captura de las imágenes se realizó un vuelo el día 28 de enero de 2021 (coincidente con la evaluación manual). a las 12:00 hs. AM para minimizar la variación en la iluminación y en el ángulo cenital solar (Gu et al., 1992). Las condiciones climáticas fueron de cielo despejado con una velocidad de viento menor a 10 km/h y una temperatura de 30, 8° C, las cuales permitieron no tener distorsión en las imágenes. Se utilizó un vehículo aéreo no tripulado Drone Parrot Disco-Pro AQ. La altura de vuelo fue de 50 m. Las imágenes fueron capturadas con un sensor multispectral Parrot Sequoia con 4 bandas espectrales, en el Verde (550 nm:40 nm), Rojo (660 nm:40 nm), Borde rojo (735nm ± 10 nm) e Infrarrojo cercano (790nm± 40nm). Los espectros medios de reflectancia calculados para las cuatro bandas espectrales obtenidas se utilizaron para calcularlos índices espectrales NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NWVI (Normalized Water Vegetation Index), OSAVI (Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index) y LCI (Leaf Chlorophyll Index) con la implementación del software Pix4D Mapper. La extracción de la información obtenida a nivel de parcela fue realizada con el software QGIS versión 3.16. Fueron desarrollados cinco modelos predictivos de Machine Learning (ML): Extreme Gradient Boosting (XGB), Linear Discriminant Analysis (LDA), Support Vector Machine (SVM), árboles de clasificación (CART) y Random Forest (RM), con el propósito de poder clasificar parcelas de girasol como tolerantes o susceptibles en función de la información espectral. Para la elaboración de los modelos predictivos se implementaron los cuatro índices de vegetación mencionados anteriormente. La evaluación y comparación de los modelos fue realizada a partir de la precisión alcanzada por cada uno de estos, definiéndose como el número de predicciones correctas sobre el número total de predicciones.

Resultados: El fenotipado manual realizado sobre el experimento permitió clasificar a las parcelas en dos grandes grupos de acuerdo a su respuesta frente a MV. Fueron definidas como tolerantes, aquellas parcelas que tuvieran un valor de severidad media menor a 3, y como susceptibles las que tuvieran un valor de severidad media mayor a 3. El 45,18 % de las parcelas fueron clasificadas como susceptibles y el 54,82 % fueron clasificadas como tolerantes.

La comparación del desempeño alcanzado por los 5 modelos evaluados fue realizada implementando la metodología de validación cruzada (particionando los datos en dos conjuntos, de entrenamiento y de prueba) y utilizando los datos obtenidos de la evaluación fenotípica manual se estimó la precisión en la predicción de la clase fenotípica obtenida de cada uno de los modelos propuestos. En la figura 13 se muestra la precisión media y la dispersión obtenida para cada uno de los modelos entrenados.

El modelo XGB fue el que obtuvo una precisión media más alta y el que menor varianza presentó durante el proceso de validación. En orden de precisión, en segundo lugar se ubicó el modelo LOA y el de menor valor fue el modelo fue el RF. Asimismo, la precisión fue estimada en los conjuntos de entrenamiento y de prueba para tener una medida del sobreajuste (overfitting) de los modelos. Los resultados se muestran en la tabla 2.

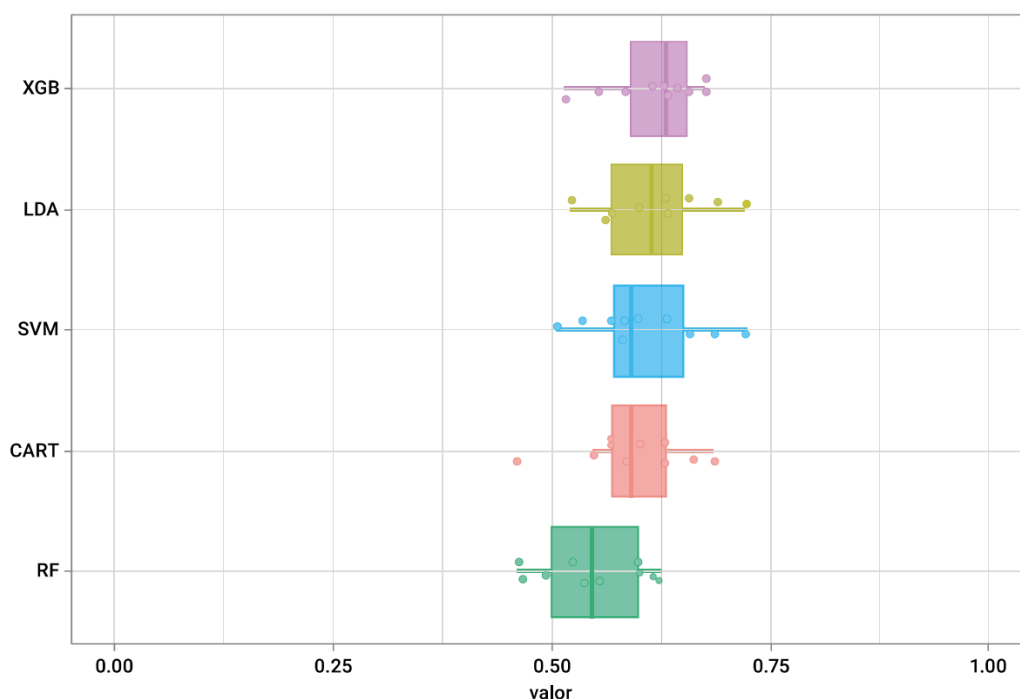


Figura 13. Precisión obtenida en el entrenamiento de los distintos modelos por el método de validación cruzada.

Los modelos XGB y CART alcanzaron los valores más altos en la matriz de prueba, y no mostraron diferencias con respecto a la precisión obtenida en la matriz de entrenamiento. En tanto que el modelo RF mostró una amplia diferencia en la precisión obtenida para los dos conjuntos de datos, evidenciando un claro sobreajuste de este modelo. En relación a la precisión obtenida dentro de las clases, esta fue del 70% para los genotipos tolerantes y del 55% para los genotipos susceptibles. Los valores de predicción obtenidos resultan muy interesantes para esta primera evaluación de la técnica y con su puesta a punto en próximos ensayos podrá ser considerada como una herramienta que complemente al fenotipado manual y de soporte al programa de mejoramiento.

Tabla 2. Precisión alcanzada por los 4 modelos predictivos evaluados

Modelo	Precisión en el conjunto de entrenamiento (%)	Precisión en el conjunto de prueba (%)
CART	63,90	62,30
RF	100	59,26
SVM	65,18	53,70
LDA	62,54	62,02
XGB	63,27	63,12

Conclusión: Los resultados obtenidos en este trabajo mostraron el potencial que tiene la implementación de índices de vegetación para el fenotipado automático de la Marchitez prematura por *V. dahliae* en girasol y la utilización de modelos que permiten en base a la información aportada por los índices espectrales, poder clasificar genotipos de girasol como tolerantes o susceptibles a la enfermedad. La implementación de una plataforma de fenotipado de alto caudal por medio de drones para la caracterización de poblaciones de gran tamaño con menor demanda de recursos y tiempo resulta promisorio e incentivador en relación a los resultados alcanzados. La mayor ventaja que presenta esta tecnología, es la rápida adquisición de datos para un elevado número de parcelas. Un análisis profundo de los costos de esta metodología y su comparación con el fenotipado manual resulta fundamental para que sea posible su adopción por los programas de mejoramiento, en proyectos de investigación y también a nivel productivo para el diagnóstico de epifitias. Se continuará con las evaluaciones en los próximos años, para poder generar un mayor volumen de datos que permita evaluar otras técnicas y otras variables, con el objetivo de obtener mayores valores de precisión por los modelos generados y poder incorporar esta tecnología como una práctica rutinaria en el programa de mejoramiento de girasol de INTA.

Conclusiones generales del capítulo

Resulta claro que para lidiar con los desafíos del presente y del futuro que amenazan con alterar la vida sobre la Tierra, es necesario dar cabal cumplimiento a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, sin demoras y con firmes decisiones. En esto, la problemática del hambre, tanto en la actualidad como en el futuro según el intenso incremento demográfico que se prevé, solo podrá ser resuelto a partir de una agricultura que sea capaz de producir más cantidades, con más calidad, empleando menos insumos y recursos, y en equilibrio sustentable con el resto de los componentes ecosistémicos. El mejoramiento vegetal fue, es y será un protagonista principal en esta tarea.

Las HT3Ps son herramientas novedosas y con altas potencialidades para obtener datos sobre los fenotipos de las plantas (estructura morfológica, función fisiológica, contenido de componentes), incluso en condiciones a campo y en entornos complejos con alta eficiencia y precisión, y bajos costos, lo que no se puede lograr con los enfoques tradicionales de fenotipado.

Las técnicas basadas en *drones* para detectar caracteres fenotípicos en cultivos y monitorear su evolución fenológica han avanzado sustancialmente en los últimos años, siendo una alternativa preferida frente a otras opciones, debido a que no son destructivas, son rápidas y con amplios rangos de operación, y poseen bajo costo con alta calidad en los datos recabados.

Por lo tanto, los UAS son cada vez más importantes tanto en el manejo agronómico de cultivos en general, como en el mejoramiento vegetal y la producción de semillas. Es de esperar que los organismos educativos de nivel superior, junto con los abogados a la investigación científica y tecnológica tomen nota de estos aspectos, de manera de darle su merecido espacio entre las opciones tecnológicas vigentes.

Referencias bibliográficas

- Administración Nacional de Aviación Civil, Argentina - ANAC (2019). Reglamento de vehículos aéreos no tripulados (VANT) y de sistemas de vehículos aéreos no tripulados (SVANT). Online: <https://www.anac.gob.ar/anac/web/uploads/upcg/resoluciones-dnaypi/seguridad-operacional/if-2019-reglamento-vant-rs-885.pdf>
- Calderón, R., Navas-Cortés, J., & Zarco-Tejada, P. (2015). Early detection and quantification of verticillium wilt in olive using hyperspectral and thermal imagery over large areas. *Remote Sensing*, 7(5), 5584-5610. <https://doi.org/10.3390/rs70505584>.
- Chapman SC, Merz T, Chan A, Jackway P, Hrabar S, Dreccer MF, Holland E, Zheng B, Ling TJ, Jimenez-Berni J.(2014). Pheno-Copter: A Low-Altitude, Autonomous Remote-Sensing Robotic Helicopter for High-Throughput Field-Based Phenotyping. *Agronomy*; 4(2):279-301. <https://doi.org/10.3390/agronomy4020279>
- Chen, C. J., & Zhang, Z. (2020). GRID: A Python Package for Field Plot Phenotyping Using Aerial Images. *Remote Sensing*, 12(11), 1697. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/rs12111697>
- de Román, S. (2020). El papel de la agricultura en los objetivos de la agenda 2030. *iAgua Magazine – Blog*: 09/09/2020. Online: <https://www.iagua.es/blogs/sergio-roman/papel-agricultura-objetivos-agenda-2030>
- Dhondt, S., Wuyts, N., and Inzé, D. (2013). Cell to whole-plant phenotyping: the best is yet to come. *Trends Plant Sci.* 18, 428–439. doi: 10.1016/j.tplants.2013.04.008
- Di Leo, N. (2015) Drones: Agricultura de Precisión y Agronomía. *Agrovisión Profesional*, N° 85, p. 29-32. Online: https://issuu.com/ciasfe/docs/agrovision_87_-_noviembre_2016
- Di Leo, Néstor; Giampaoli, Javier. 2021. Evaluación de rutinas de geoprocesamiento de fotogramas captados por drones para la obtención de fotomosaicos de Índices espectrales. En: Libro de Resúmenes de las VI Jornadas de Ciencia y Tecnología de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario. *Ciencias Agronómicas* 37 (21), pp. 122-124. ISSN On-Line: 2250-8872.
- Di Leo, N.; Forbice, A. (2021). Comparación de índices espectrales normalizados captados por drones en la discriminación de rasgos fenotípicos en soja (*Glycine max* L. Merr.). En: Libro de Resúmenes de las VI Jornadas de Ciencia y Tecnología de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario. *Ciencias Agronómicas* 37 (21), pp. 119-121. ISSN On-Line: 2250-8872.
- Di Leo, N.; Legleize, A.; Skobalsky, J.C. (2022). Estimación de altura en parcelas de trigo con LIDAR y fotogrametría 3D a bordo de UAV. En: Libro de resúmenes del 2do Congreso Latinoamericano de Agricultura de Precisión. Manfredi, Argentina. 30 de marzo al 01 de abril de 2022. ISBN: en trámite.
- Dominguez, M.; Montecchia, J.; Nicosia, S.; Fernandez, P.; Troglia, C.; Gonzalez, J.; Paniego, N. (2022). Implementación de herramientas de fenotipado de alto rendimiento para evaluar el marchitamiento por *Verticillium dahliae* en girasol. *Revista de Tecnología Agropecuaria - RTA* 10 (41), p. 39-43.
- Fu, Y.B. (2015). Understanding crop genetic diversity under modern plant breeding. *Theor. Appl. Genet.* 128, 2131–2142. doi: 10.1007/s00122-015-2585-y
- Guo, W.; Carroll, M. E.; Singh, A.; Swetnam, T. L.; Merchant, N.; Sarkar, S.; Singh, A. K.; Ganapathysubramanian, B. (2021). UAS-Based Plant Phenotyping for Research and Breeding Applications, *Plant Phenomics* 2021, (ID 9840192), 21 p. <https://doi.org/10.34133/2021/9840192>
- Guo, Q.; Zhu, Z. (2014). Phenotyping of Plants. In *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, 1–15. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.

- Hickey, L. T. N., Hafeez, A., Robinson, H., Jackson, S. A., Leal-Bertioli, S. C. M., et al. (2019). Breeding crops to feed 10 billion. *Nat. Biotechnol.* 37, 744–754. doi: 10.1038/s41587-019-0152-9
- Hillnhütter, C., Schweizer, A., Kühnhold, V. & Sikora, R. (2010). Remote sensing for the detection of soil-borne plant parasitic nematodes and fungal pathogens. En E. Oerke, C. Gerhards, & R. Menz (Eds.), *Precision Crop Protection - The Challenge and Use of Heterogeneity* (pp. 151-165). Springer.
- Jannoura, R., Brinkmann, K., Uteau, D., Bruns, C., Joergensen, R.G. (2015). Monitoring of crop biomass using true colour aerial photographs taken from a remote controlled hexacopter *Biosystems Engineering* 129, pp. 341-351
- Kim, J. Y. (2020). Roadmap to high throughput phenotyping for plant breeding. *J. Biosyst. Eng.* 45, 43–55. doi: 10.1007/s42853-020-00043-0
- Knox J, Hess T, Daccache A, Wheeler T (2012). Climate change impacts on crop productivity in Africa and South Asia. *Environ Res Lett* 7:034032
- Leakey ADB, Ainsworth EA, Bernacchi CJ, Rogers A, Long SP, Ort DR (2009). Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, relations: six important lessons from FACE. *J Exp Bot* 60:2859–2876.
- Li L., Zhang Q., Huang D. (2014). A review of imaging techniques for plant phenotyping. *Sensors*;14:20078–20111. doi: 10.3390/s141120078.
- Li D, Quan C, Song Z, Li X, Yu G, Li C and Muhammad A (2021). High-Throughput Plant Phenotyping Platform (HT3P) as a Novel Tool for Estimating Agronomic Traits From the Lab to the Field. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 8:623705. doi: 10.3389/fbioe.2020.623705
- Liebig, F., Kirchgessner, N., Schneider, D., Walter, A., & Hund, A. (2015). Remote, aerial phenotyping of maize traits with a mobile multi-sensor approach. *Plant Methods*, 11(1), 1-20. <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0048-8>.
- Lobos GA, Camargo AV, del Pozo A, Araus JL, Ortiz R and Doonan JH (2017). Editorial: Plant Phenotyping and Phenomics for Plant Breeding. *Front. Plant Sci.* 8:2181. doi: 10.3389/fpls.2017.02181
- Madec, S.; Baret, F.; de Solan, B.; Thomas, S.; Dutartre, D.; Jezequel, S.; Hemmerlé, M.; Colombeau, G.; Comar, A. (2017). High-Throughput Phenotyping of Plant Height: Comparing Unmanned Aerial Vehicles and Ground LiDAR Estimates. *Frontiers in Plant Science* 8, p. 1–14.
- Mccouch, S., Baute, G. J., Bradeen, J., Bramel, P., Bretting, P. K., Buckler, E., et al. (2013). Feeding the future. *Nature* 499, 23–24. doi: 10.1038/499023a
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO. (2022). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Online: <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/indicators/241/es/>
- Picardi, Liliana A. (2018). El mejoramiento vegetal en nuestros días. *BAG. Journal of Basic and Applied Genetics*, vol.29 , supl.1: 31.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Scheel, y Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium* 1, 48–62.
- Tattaris M, Reynolds MP and Chapman SC (2016). A Direct Comparison of Remote Sensing Approaches for High-Throughput Phenotyping in Plant Breeding. *Front. Plant Sci.* 7:1131. doi: 10.3389/fpls.2016.01131
- Van Alfen, N. (1989). Reassessment of plant wilt toxins. *Ann. Rev. Phytopathol.*, 27,533-550.
- Vega, F.A., Ramírez, F.C., Saiz, M.P., Rosúa, F.O. (2015). Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop. *Biosyst. Eng.*, 132, pp. 19-27

- Yuan, W.; Li, J.; Bhatta, M.; Shi, Y.; Baenziger, P.S.; Ge, Y. (2018). Wheat Height Estimation Using LiDAR in Comparison to Ultrasonic Sensor and UAS. *Sensors* 18(11), 3731. <https://doi.org/10.3390/s18113731>
- Zhang, C., & Kovacs, J. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. In *Precision Agriculture* (Vol. 13, Issue 6, pp. 693-712). Springer. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>.

GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À OCEANOGRAFIA: EXPERIÊNCIAS NO INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE

Fernanda Giannini; Fabrício Sanguinetti Cruz de Oliveira; Salette Amaral de Figueiredo, Ana Piazza Forgiarini; Jorge Arigony Neto

Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Brasil

fe.cgiannini@gmail.com

Resumo

Garantir a preservação e o desenvolvimento sustentável dos oceanos e recursos marinhos faz parte do cumprimento da Agenda 2030 das Nações Unidas. O Brasil, em particular, é um país com mais de 7000 km de linha de costa, com aproximadamente 25% da população residente na zona litorânea. Esse contexto, associado à sensibilidade das regiões costeiras aos efeitos das mudanças climáticas, evidenciam a importância do monitoramento de recursos vivos e não vivos na zona costeira e zona econômica exclusiva. As geotecnologias se apresentam como ferramentas imprescindíveis para permitir o registro da variabilidade espacial e temporal desses fenômenos, principalmente com o avanço dos sistemas sensores a bordo de satélites ou veículos aéreos não-tripulados. No Brasil, aplicações geotecnológicas vêm sendo amplamente utilizadas nas pesquisas oceanográficas. Dentre estas, o presente capítulo apresenta um pouco da atuação do Instituto de Oceanografia da Universidade Federal do Rio Grande neste cenário. Estudos de caso são focados no: (1) uso de modelos digitais de terreno em alta resolução, obtidos a partir de levantamentos com veículos aéreos não-tripulados, aplicados a simulações dos efeitos da elevação do nível do mar; (2) aplicação de dados de radares orbitais na observação de vórtices de meso e submesoescala; e (3) uso de dados satelitais da cor dos oceanos na descrição de padrões oceanográficos no Atlântico Sul.

Palavras-chave: *VANT, mudança do nível do mar, SAR, radar altímetro, cor do oceano*

Introdução

Garantir a preservação e o desenvolvimento sustentável dos oceanos e recursos marinhos faz parte do cumprimento da Agenda 2030 e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, propostos em 2015. Em especial, os objetivos 13 (Ação contra a mudança global do clima) e 14 (Vida na água) demandam que modernos métodos de monitoramento dos oceanos e zonas costeiras sejam implementados, para que os mesmos possam ser atingidos. Além disso, o objetivo 7 (Energia limpa e acessível) também possui uma forte relação com o

potencial dos oceanos como fonte de energia renovável que pode ser produzida nas proximidades de grandes centros urbanos localizados nas zonas costeiras do planeta. No contexto das atividades da Agenda 2030, as Nações Unidas concluíram em 2016 a primeira Avaliação Mundial dos Oceanos, que apontou a urgência de gerenciar com sustentabilidade as atividades nos ambientes marinhos. Com isso, em 2017 foi proclamada a Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável, implementada no ano de 2021 e com duração prevista até 2030, para focar no cumprimento dos compromissos da Agenda 2030.

O Brasil, em particular, é um país com mais de 7000 km de linha de costa, com aproximadamente 25% da população residente na zona litorânea, muitas vezes dependendo de recursos marinhos para sobreviver. O novo relatório do IPCC (IPCC, 2021) apresenta a clara relação entre o aumento da temperatura causado pela ação antrópica e o acréscimo na frequência e intensidade de eventos meteorológicos extremos em ambientes marinhos e costeiros. O relatório também inclui uma estimativa de aumento do nível dos oceanos entre 0,53 e 1,01 m até o ano de 2100, sendo as regiões tropicais e subtropicais mais afetadas por esse aumento, em função de serem relativamente afastadas das regiões cobertas por massas de gelo e conseqüentemente não sofrerem o ajuste isostático pós-glacial. Além disso, é estimado que o derretimento das geleiras e mantos de gelo do planeta contribui tanto para alterações nas condições de formação das águas de fundo, necessárias para o equilíbrio da circulação termohalina global, como para 50% do aumento do nível do mar ao longo da costa Brasileira durante o período 2002-2014 (Rietbroek et al., 2016).

Esse contexto, associado à sensibilidade natural das regiões costeiras aos efeitos das mudanças climáticas, evidenciam a importância do monitoramento de recursos vivos e não vivos na zona costeira e ZEE (Zona Econômica Exclusiva), como: alterações de linha de costa (erosão), extensão e intensidade de ocupação das zonas costeiras, produtividade primária, alterações de temperatura do oceano e do ar, variabilidade na concentração de sedimentos, clima de ondas e fenômenos e feições da dinâmica oceanográfica costeira e marinha, etc. As geotecnologias se apresentam como ferramentas imprescindíveis para permitir o registro da variabilidade espacial e temporal desses fenômenos, principalmente com o avanço dos sistemas sensores a bordo de satélites ou veículos aéreos não-tripulados. Além disso, os novos sistemas de processamento e armazenamento de dados em nuvem habilitam o avanço futuro de sistemas integrados de monitoramento, com processamentos automático de dados satelitais e integração com resultados de modelos climáticos e de dinâmica dos oceanos, dados in situ, etc., oferecendo poderosas ferramentas para que os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 possam ser atingidos.

No Brasil, aplicações geotecnológicas vêm sendo amplamente utilizadas nas pesquisas oceanográficas e atividades de gerenciamento costeiro. Dentre estas, o presente capítulo apresenta um pouco da atuação do Instituto de Oceanografia da Universidade Federal do Rio Grande neste cenário. Estudos de caso são focados no: (1) uso de modelos digitais de terreno em alta resolução, obtidos a partir de levantamentos com veículos aéreos não-tripulados, aplicados a simulações dos efeitos da elevação do nível do mar; (2) aplicação de dados de radares orbitais na observação de vórtices de meso e submesoescala; e (3) uso de dados satelitais da cor dos oceanos na descrição de padrões oceanográficos no Atlântico Sul.

1. Modelos digitais de terreno em alta resolução a partir de veículos aéreos não-tripulados e suas aplicações na zona costeira em cenários de elevação do nível do mar

Zona costeira e mudanças climáticas

A zona costeira como área de interface entre água, ar e mar se destaca por ser um local altamente dinâmico e detentor de uma grande importância social, ecológica e econômica. Mundialmente, estima-se que 680 milhões de pessoas habitam a zona costeira (IPCC, 2019), enquanto no Brasil a porcentagem da população residente nessa área chega a ultrapassar os 26,6% (IBGE, 2010), sendo esperado seu aumento. Luijendijk et al. (2018) estimam que 24% de todas as praias arenosas globais sofrem com as intempéries naturais e com a degradação que a

antropização das áreas litorâneas carrega consigo. A inegável ocorrência das mudanças climáticas (IPCC, 2019), ainda, traz à zona costeira os impactos relacionados às consequências da intensificação de ventos, a maior frequência de eventos extremos, as modificações nos padrões de precipitação e o aumento do nível do mar (Fitzgerald et al., 2008). Apesar dessas consequências ocorrerem em escala global, os efeitos regionais e locais das mudanças climáticas na costa, dependem de características meteo-oceanográficas e morfológicas específicas, e portanto necessitam de uma maior atenção nesta escala (Nicholls e Cazenave, 2010). Sendo assim, devemos também considerar que a resposta costeira será diferenciada para cada região devido às configurações inerentes de cada local (Figueiredo et al., 2018; Forgiarini et al., 2019). Segundo Bio et al. (2015) é necessário compreender o sistema costeiro em todas suas facetas e interrelações para que se possa ter um gerenciamento responsável e efetivo, quantificando e monitorando sua dinâmica e morfologia, avaliando constantemente o risco erosivo considerando as ameaças presentes e futuras.

Métodos tradicionais e contemporâneos de monitoramento costeiro

Estudos geomorfológicos dependem fortemente de dados topográficos tridimensionais em alta resolução, que permitam caracterizar as mudanças topográficas no tempo e espaço, através da detecção da geometria (comprimento, elevação, área, volume) do local em estudo (Eltner e Sofia 2020, Grottoli et al., 2021). Diferentes técnicas podem ser aplicadas no monitoramento costeiro, porém como definido por Bio et al. (2015) os custos elevados, sejam econômicos ou devido ao exaustivo trabalho que necessita a execução de algumas metodologias, as mesmas podem não compensar a falta de detalhe e cobertura, espacial e temporal, que o estudo da morfologia costeira requer para a identificação de padrões de evolução, seja de curta quanto de média e longa duração e escala.

Considerando a necessidade de amostragem costeira e a limitação econômica dos países em desenvolvimento, podemos citar alguns métodos, como o de Emery (1961), Birkemeier (1981) e Martinez et al. (1987), que se destacam por sua simplicidade e baixo custo, mas que carregam consigo uma série de incertezas e limitações, tais como o recobrimento espacial pontual das amostragens (Delgado e Lloyd 2004; Andrade e Ferreira, 2006). Com o avanço tecnológico, novas metodologias de amostragem costeira surgiram, dentre as quais podemos destacar a utilização de teodolitos e estações totais. Esses métodos, apesar de otimizarem a precisão dos levantamentos costeiros, ainda representam perfis praias lineares e restritos espacialmente, geralmente vinculados à localização de um marco geodésico na costa (Figura 1).

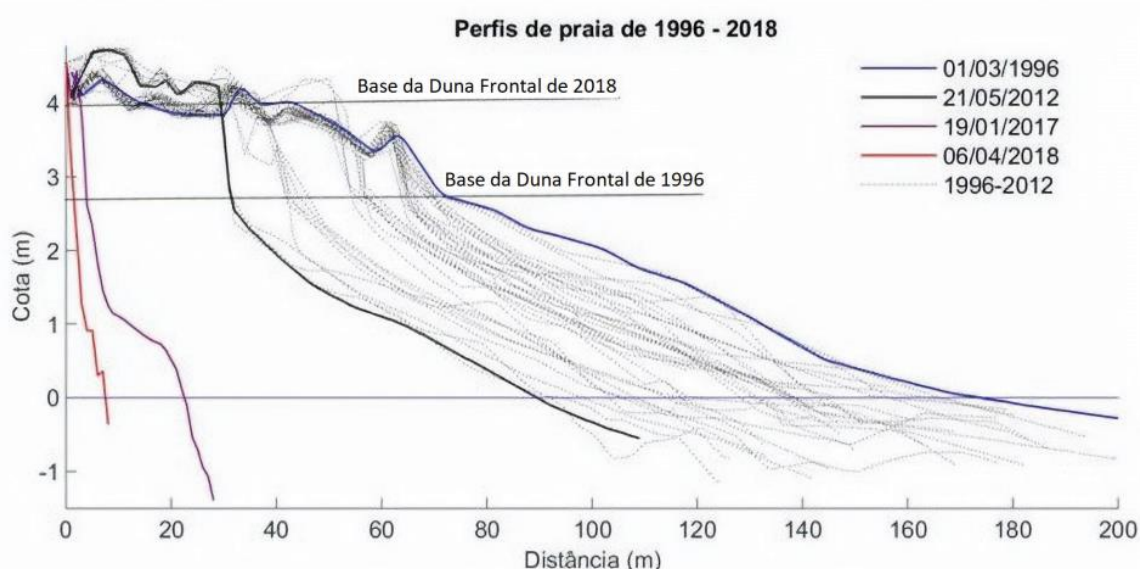


Figura 1. Perfis praias coletados entre 1996 e 2012 pelo Laboratório de Oceanografia Geológica (LOG) do Instituto de Oceanografia da FURG. Fonte: Bose et al., 2019.

Ademais, a utilização mais recente de sistemas GNSS-RTK (Real Time Kinematic) ainda permite a alocação de um sistema de referência altamente preciso a bordo de veículos, diminuindo a limitação dada pelo recobrimento espacial e aumentando a velocidade de obtenção de dados, porém a um custo ainda relativamente alto (Harley et al., 2011; Lee et al., 2013; Gonçalves e Henriques, 2015).

Os recentes avanços e investimentos em plataformas de sensoriamento remoto permitiram a substituição de técnicas altamente custosas como o LIDAR (Light Detection and Ranging) e a obtenção de dados satelitais de altíssima resolução, ou ainda técnicas limitadas espacialmente como o sistema ARGUS (Woolard e Colby, 2002; Sallenger et al., 2003; Haala e Rothermel, 2012; Gonçalves e Henriques, 2015; Guo et al., 2020). Unindo o melhor de cada método, a um custo intermediário, os levantamentos de VANT (Veículos Aéreos Não Tripulados - Drummond et al., 2015; Gonçalves e Henriques, 2015; Papakonstantinou et al., 2015; Turner et al., 2016; Gutierrez e Gonçalves, 2020) permitem a obtenção de dados topográficos com um recobrimento maior que a de perfis praias e monitoramento por câmeras fixas, também possibilitando uma alta periodicidade no monitoramento (apenas limitados por chuva e ventos fortes) e resolução espacial (< 10 cm).

O processamento fotogramétrico mais tradicional, então, se alia a técnicas mais contemporâneas e menos trabalhosas através do algoritmo conhecido como Structure from Motion (SfM - Eltner e Sofia (2020)), que permite o alinhamento de inúmeras imagens sequenciais sobrepostas, obtidas no aerolevanteamento ao longo da área de interesse, e a reconstrução automatizada de cada cena imageada a partir de diferentes perspectivas e identificação de objetos homólogos entre as imagens. Os principais produtos obtidos através desse processamento são Modelos Digitais de Elevação (MDEs) e ortomosaicos, que permitem análises qualitativas e quantitativas da zona costeira, como por exemplo, a classificação de áreas, cálculos volumétricos, evolução da linha de costa entre outras (Figura 2a e 2b). O MDE é um produto cartográfico que disponibiliza para cada pixel amostrado seu posicionamento horizontal e vertical (latitude, longitude e elevação), enquanto os ortomosaicos digitais, baseados no mesmo modelo matemático dos MDEs, agregam informações qualitativas da área amostrada, permitindo a visualização de uma composição das imagens capturadas. Esse produto é útil principalmente na visualização de feições do terreno que podem ser usadas, por exemplo, na classificação de áreas e cálculo de porcentagens (e.g., porcentagem de área vegetada), como também na classificação de texturas associadas ao terreno (sedimento, pavimentação).

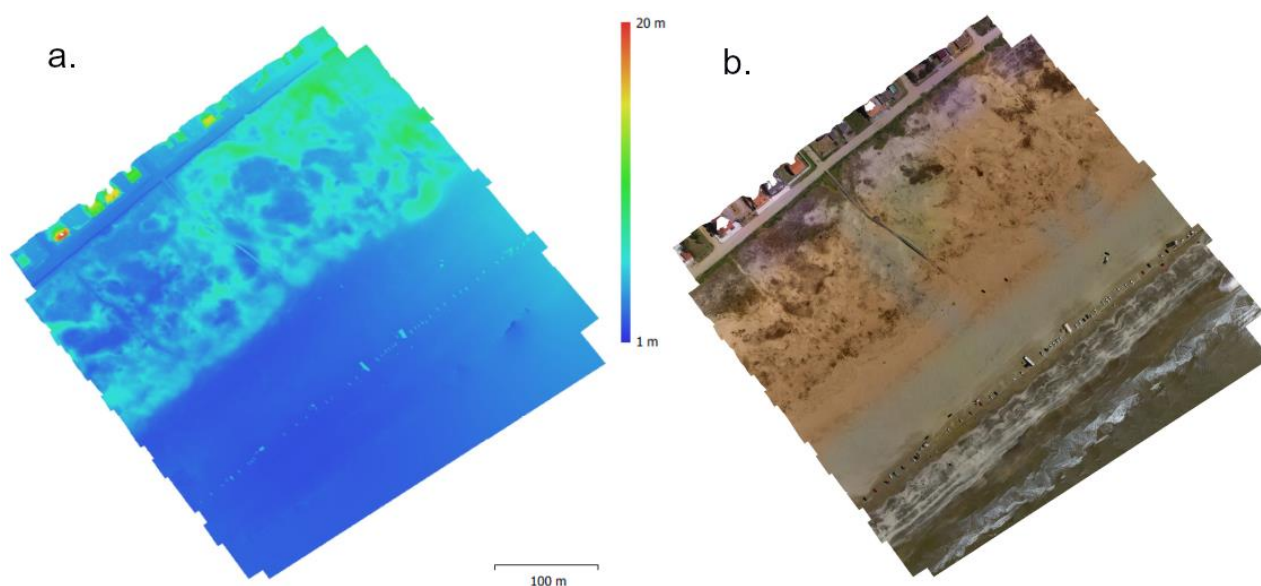


Figura 2. a) MDE de um trecho da praia do Cassino, RS, próximo à passarela de acesso à praia. b). Ortomosaico correspondente ao MDE anterior. Fonte: Pias (2019).

Para a obtenção desses produtos cartográficos digitais com alta precisão, durante o sobrevoo é fundamental que as imagens amostradas apresentem um alto nível de sobreposição entre si, para possibilitar a identificação do maior número possível de feições similares nessas áreas de sobreposição. Como detalhado por Eltner e Sofia (2020), essa identificação vai permitir ao algoritmo estimar o posicionamento e perspectiva da câmera e reconstruir a geometria de cada imagem, o que resultará no alinhamento e posicionamento das imagens e o ajuste do modelo como um todo. Nuvens de pontos são construídas, criando um plano de coordenadas relativas entre os elementos homólogos identificados. Ainda, dados de coordenadas geográficas de cada imagem, disponibilizados pelo sistema de posicionamento da aeronave, são utilizados na transformação das coordenadas estimadas para coordenadas atreladas a um sistema global. Durante o processamento é possível inserir informações de coordenadas referentes a feições do terreno das quais se tem posicionamento conhecido (pontos de controle). Quando esse posicionamento é obtido utilizando um sistema GNSS-RTK, o modelo resultante poderá ter uma altíssima precisão.

Diversas aplicações de dados obtidos a partir de drone podem ser descritas no litoral do Rio Grande do Sul (RS) com variadas finalidades, como por exemplo, descrições metodológicas da obtenção e processamento de imagens (Simões et al., 2019), análise de erosão costeira (Oliveira et al., 2019) e análise de evolução costeira de médio e longo prazo (Bose et al., 2019; Forgiarini et al., 2019). Em trabalhos como os de Forgiarini et al. (2019) e Bose et al. (2019), ambos realizados na costa do RS, os produtos cartográficos deixam de ser o objetivo final e se tornam intermediários entre análises. MDEs e ortomosaicos são utilizados como *input* para caracterização da porção emersa da costa na modelagem da resposta costeira e a projeção probabilística das futuras linhas de costa, considerando estimativas de aumento do nível do mar e variações de balanço sedimentar. Em ambos os trabalhos, os produtos digitais foram utilizados para preencher os parâmetros morfológicos de entrada necessários à projeção de futuras linhas de costa obtidas através da versão estocástica do modelo Shoreface Translation Model (STM) de Cowell et al. (1992; 1995; 2006), o DRanSTM (Dilating Random Shoreface Translation Model), em dois setores da costa do RS que já apresentam altas taxas de erosão (Balneário Hermenegildo e Farol da Conceição).

Nos estudos, os MDEs (Figura 2a) foram utilizados como fonte para parâmetros referentes à geometria do pós-praia e do campo de dunas, enquanto os ortomosaicos permitiram a Forgiarini et al. (2019) atribuir certamente a textura sedimentar ou de pavimentação para cada perfil analisado no trabalho, podendo separar nesse contexto a influência antrópica do sistema de dunas original no local. Os principais resultados estão expostos em forma de mapas de risco de recessão da linha de costa, que podem ser utilizados como subsídio ao gerenciamento costeiro nas regiões estudadas. Os mapas mostram claramente o estado atual da linha de costa e projetam as futuras linhas de costa associadas a uma porcentagem da probabilidade de ocorrência, permitindo se antecipar aos efeitos trazidos pelas mudanças climáticas, o que é especialmente relevante em regiões que já apresentam uma grande retração natural da linha de costa.

É notável a diferença dos levantamentos com VANT (Figura 2) em relação aos levantamentos de perfil praial (Figura 1) em termos de cobertura espacial. A velocidade de coleta de imagens relativa à cobertura espacial também demonstra uma grande vantagem em relação aos perfis praias, uma vez que também é possível automatizar e programar o sobrevoo antes mesmo da chegada ao local de estudo. Em ambos os trabalhos, pontos de controle em campo foram amostrados com GNSS-RTK (Figura 3) para proporcionar aos modelos um incremento na precisão de posicionamento, sendo assim possível reduzir erros horizontais e verticais à ordem de poucos centímetros, inferiores à resolução espacial do levantamento, colocando a metodologia como uma excelente ferramenta para análise da geomorfologia costeira a médio e longo prazo.

Poucas são as limitações impostas pelo clima sobre os VANTS, as mais influentes sendo o vento e chuva fortes. Ainda assim, em estudos como o de Oliveira et al. (2019), ainda é possível perceber como a versatilidade e robustez desses equipamentos permite que seja possível registrar e analisar até mesmo as imediatas consequências da passagem de um evento altamente energético na costa, servindo como base para estudos de curto prazo, e análise isolada de eventos. A inovação trazida pelos VANTS, sua facilidade de utilização, a precisão dos dados

coletados e a possibilidade de monitoramento da linha de costa com alta periodicidade, vem suprir a enorme necessidade de obtenção de dados de alta precisão relacionados às mudanças costeiras. A possibilidade de análise imediata da ocorrência de eventos energéticos, bem como a modelagem a médio e longo prazo da região costeira contribuem fortemente ao relato, antecipação e remediação das consequências trazidas pelos efeitos das mudanças climáticas.

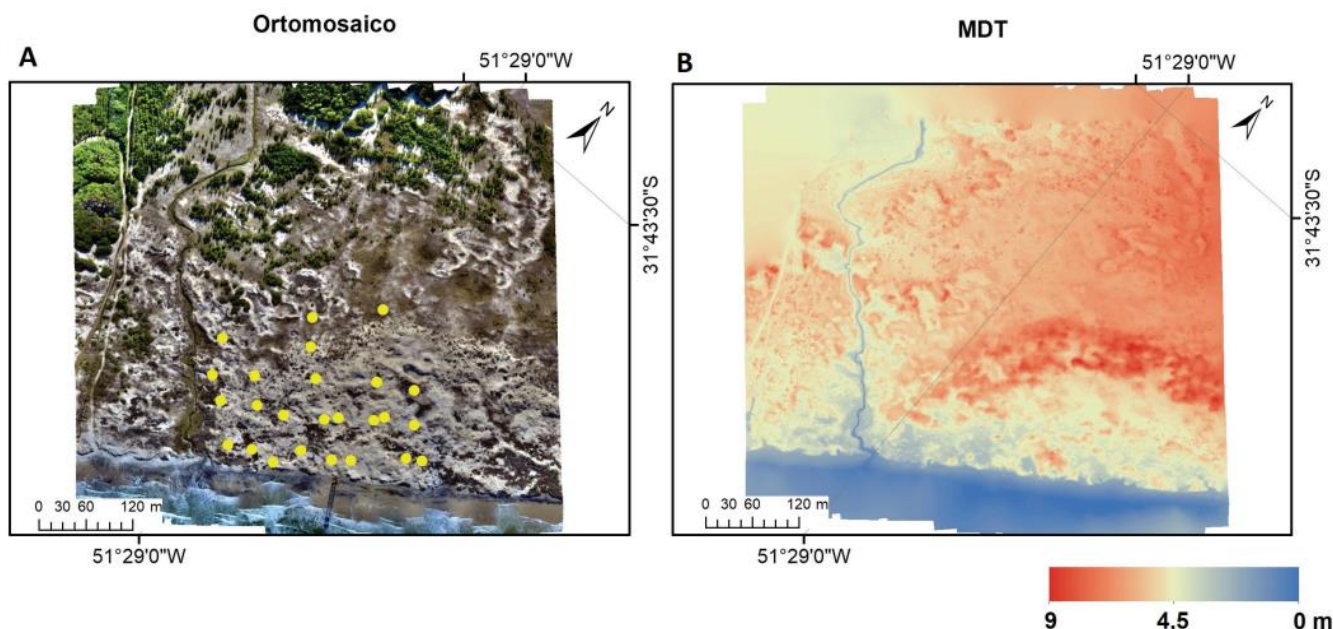


Figura 3. Ortomosaico (A) e MDT (B) utilizado no trabalho de Bose et al. (2019). Em amarelo: pontos de controle com coordenadas obtidas através de RTK. Os pontos de controle foram adicionados à nuvem de pontos durante o processamento para incremento da precisão do modelo.

2. Aplicações de radares na observação de vórtices oceânicos em meso e submeso escalas no Atlântico Sul

A dinâmica oceânica compreende um amplo espectro de movimentos distribuídos em escalas de centímetros a milhares de quilômetros, no espaço, e de segundos a décadas, no tempo. Dentre esta gama de movimentos estão os vórtices, que são feições caracterizadas por fluxos em rotação, aproximadamente circulares, e responsáveis pelo importante papel de transportar momento, calor, sal e demais propriedades das águas além da sua região de formação (Robinson, 1983; Chaigneau et al., 2011). Os vórtices podem ser classificados quanto a suas dimensões em superfície e tempo de vida em mesoescala e submesoescala. Os vórtices de mesoescala possuem escalas de várias dezenas a centenas de quilômetros e tempo de vida de meses a anos. Já os vórtices de submesoescala não ultrapassam poucas dezenas de quilômetros e tempo de vida de alguns dias. É importante lembrar que estas feições também se estendem ao longo das profundidades, formando uma espécie de cone desde a superfície.

Em razão das suas escalas espaciais e temporais, são difíceis de serem acompanhados e amostrados por métodos convencionais a bordo de embarcações (Oliveira e Polito, 2013). Neste contexto, sensores a bordo de satélites se destacam como uma importante ferramenta na observação e monitoramento de vórtices e demais feições oceânicas, em virtude da sua escala sinótica de observação e de uma elevada taxa de revisita de uma região oceânica ao longo do tempo. Os primeiros sensores a bordo de satélites a observar a dinâmica oceânica utilizavam imagens do infravermelho termal, e localizavam os vórtices de mesoescala a partir de gradientes de temperatura formados na superfície do oceano. Dada a natureza propagante dos vórtices e o fato de preservarem as propriedades das águas da sua região de origem, estes geralmente se apresentam como piscinas de águas quentes ou frias que se diferenciam das águas do seu

entorno. Em regiões de temperaturas homogêneas em superfície esta metodologia tende a ser ineficiente, pois a ausência de um contraste térmico irá mascarar os vórtices (Auer, 1987). Além deste fato, observações de vórtices através do infravermelho estão susceptíveis a interferências devido a cobertura de nuvens, tornando as nuvens opacas a radiação solar nesta região do espectro eletromagnético e inviabilizando a observação dos vórtices.

Radares altímetros foram inseridos no estudo da variabilidade oceânica de mesoescala, com a capacidade de eliminar o efeito da cobertura de nuvens nas suas observações, uma vez que utilizam o espectro das microondas para obter medidas precisas da variação da altura do nível do mar. O lançamento de uma nova geração de altímetros de alta precisão a partir da década de 90, tais como TOPEX/Poseidon e ERS-1/2, fez destes a ferramenta de sensoriamento remoto mais utilizada no estudo da dinâmica oceânica de mesoescala. Os vórtices por possuírem uma circulação própria, que causa diferenças na altura do nível do mar, são detectadas por estes sensores devido a acurácia de 2 a 5cm relativas as suas medidas. Diversos estudos têm documentado vórtices de mesoescala no Atlântico Sul a partir de dados altimétricos (Fu, 2006; Oliveira e Polito, 2013; Oliveira e Polito, 2018; Souza et al., 2020; dentre outros). Ferramentas estatísticas associadas a dados altimétricos, passaram a ser utilizadas na determinação das propriedades dos vórtices, tais como: escalas espaciais e temporais, e velocidades de propagação (Kuragano e Kamachi, 2000; Jacobs et al., 2001; Brachet et al., 2004; Oliveira e Polito 2013).

Análises detalhadas dos dados altimétricos relevaram que parte considerável da dinâmica oceânica de mesoescala está associada a sinais propagantes para oeste, que incluem ondas de Rossby e vórtices (Robinson, 1983; Chelton et al., 2007). O estudo de Chelton et al. (2011) alerta inclusive que variabilidades previamente identificadas como ondas tratam-se na verdade de vórtices. Essa discussão foi levantada no estudo de Oliveira e Polito (2013) que caracterizaram o sinal propagante para oeste no Atlântico Sul a partir de altímetros e radiômetros. Os autores sugerem que um dos principais fatores de confusão na distinção entre as duas feições é a similaridade entre a velocidades de fase das ondas de Rossby e as velocidades de propagação dos vórtices (Figura 4).

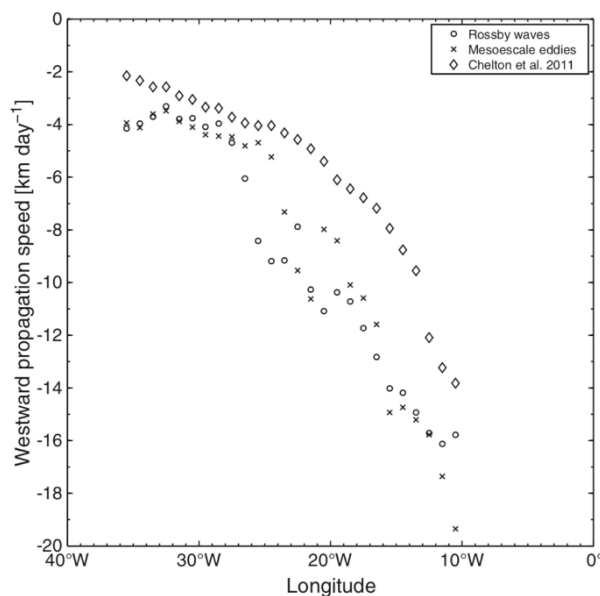


Figura 4. Comparação entre as velocidades de fase para oeste das ondas de Rossby e as velocidades de propagação para oeste dos vórtices de meso escala entre 10 e 35S no Atlântico Sul (Oliveira e Polito, 2013).

Em razão da dificuldade na separação entre ondas e vórtices, métodos elaborados vêm sendo aplicados aos dados de satélites, usualmente aos dados de altímetros, para a identificação de vórtices oceânicos. Os referidos métodos são classificados de acordo com um critério físico ou geométrico do fluxo. O critério físico exige o conhecimento prévio e o cálculo de propriedades

dinâmicas do fluxo, a partir das medidas da anomalia da altura da superfície do mar, como por exemplo as suas velocidades geostróficas e vorticidade associadas. Muitos estudos de identificação de vórtices baseados no critério físico utiliza o método de Okubo-Weiss (Okubo, 1970; Weiss, 1991; Chelton et al., 2007; Matsuoka et al., 2016). O método geométrico baseia-se na forma aproximadamente circular e de contorno fechado dos vórtices. O destaque aqui é dado ao método winding-angle (Sadarjoen e Post, 2000), que identifica os vórtices através de linhas de correntes instantâneas fechadas.

Oliveira e Polito (2018) desenvolveram um método inédito de identificação de vórtices baseado na ferramenta matemática transformada de Radon, que pode ser aplicado a qualquer variável oceanográfica obtida por satélite, ou até mesmo em saídas de modelos numéricos. Tal método se baseia na circularidade do vórtice, e não depende da amplitude ou de gradientes prévios associados as variáveis oceanográficas. Existem apenas dois parâmetros de ajuste no método. O primeiro delimita o intervalo de diâmetros dos vórtices que serão identificados, e segundo limita o grau de circularidade que uma feição pode ter para ainda ser considerada um vórtice. Este método foi aplicado em campos bidimensionais sintéticos e em três diferentes variáveis oceanográficas derivadas de satélites no Atlântico Sul (Figura 5), e apresentou resultados satisfatórios quando comparados a métodos já consagrados como o desenvolvido por Chelton et al. (2011). Souza et al. (2020) utilizaram o referido método e dados da anomalia da altura da superfície do mar para identificar e rastrear dois vórtices, um de núcleo quente e outro frio, na região da Confluência Brazil-Malvinas durante uma campanha oceanográfica do Programa Antártico Brasileiro (Figura 6). Foram inferidas as trajetórias de ambas feições durante o período que estas se mantiveram detectáveis, e suas respectivas escalas espaciais.

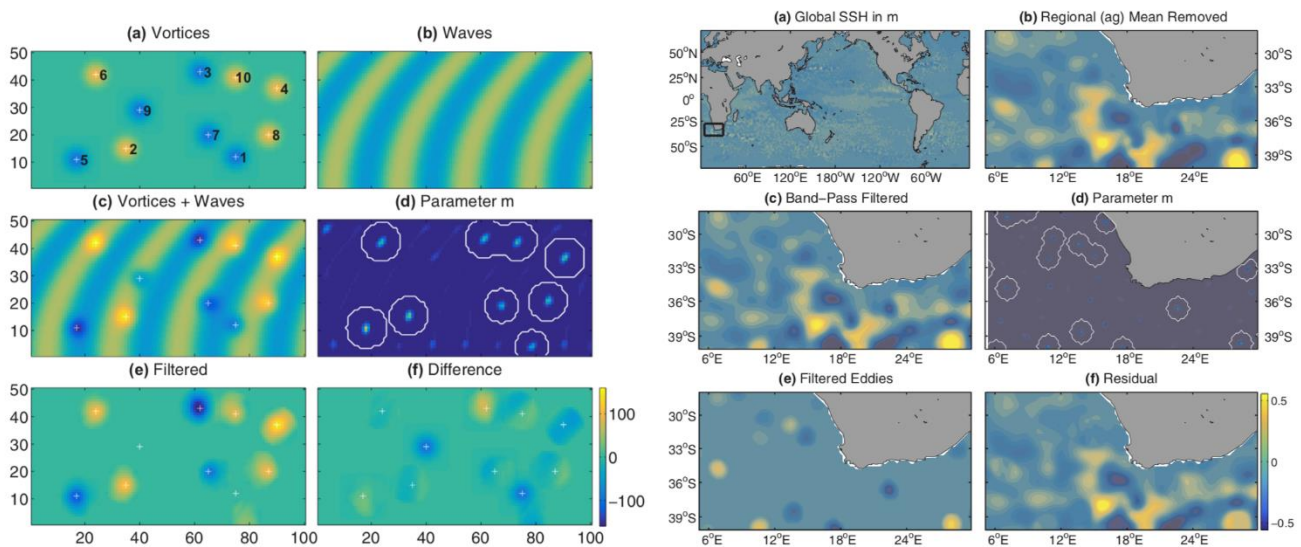


Figura 5. (esquerda) aplicação do método de identificação de vórtices em um dado sintético composto por uma combinação de sinal vórtices (a) e ondas (b), (c) é a somatória dos sinais de ambas feições, (d) o parâmetro m que representa o contorno dos vórtices identificados pelo método, (e) o campo de vórtices previamente identificados em (d) e (f) é a diferença (e – a). (direita) método é aplicado a dados da altura da superfície do mar (a) na região da Retroflexão da Agulhas (b) no Atlântico Sul, (c) filtragem passa-banda para a remoção das feições fora dos limites do pré-ajuste do método, (d) o parâmetro m , (e) o campo de vórtices identificados e (f) o resíduo (e – c) (Oliveira e Polito 2018).

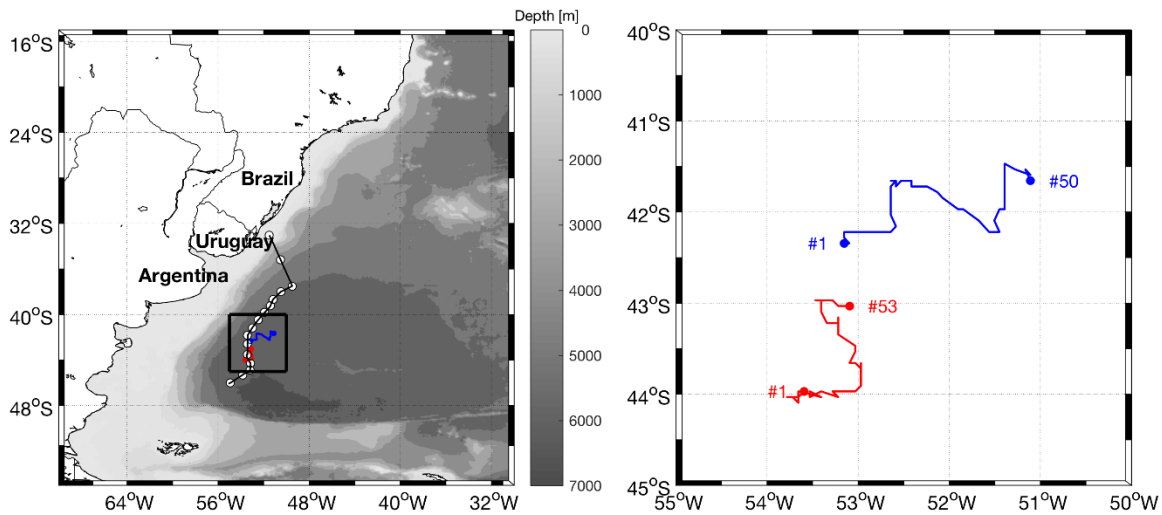


Figura 6. (esquerda) Vórtices rastreados na região da Confluência Brasil-Malvinas durante uma campanha oceanográfica do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR) utilizando a metodologia de (Oliveira e Polito, 2018). (direita) Zoom das trajetórias dos respectivos vórtices, com a indicação do primeiro e último dia que os mesmos foram identificados nos dados de anomalia da altura da superfície do mar (Souza et al. 2020).

Os vórtices de mesoescala são encontrados ao longo de todo o oceano global, porém de forma heterogênea e intermitentes (Robinson, 1983), usualmente associados a regiões oceânicas altamente energéticas. Tais feições são amplamente documentadas em dados satelitais, conforme apresentado nos estudos supracitados. Já os vórtices de submesoescala, apesar de serem feições sabidamente recorrentes nos oceanos (Munk et al., 2000), ainda são pouco estudados. Os radares altímetros utilizados nas observações de mesoescala são ineficientes na observação da submesoescala (Morrow e Le Traon, 2012), em razão da sua relativa baixa resolução espacial (Alpers et al., 2013). Radares de abertura sintética, Synthetic Aperture Radar (SAR), entram em cena como as ferramentas ideais na observação da dinâmica de submesoescala (Xu et al., 2015). Semelhante aos altímetros, os SARs adquirem informações do oceano sem ser afetado pela cobertura de nuvens, porém em uma alta resolução espacial.

O SAR mede a rugosidade da superfície do mar, logo suas medidas são influenciadas pelo vento em superfície. Para velocidades de vento moderadas ($< 6 \text{ ms}^{-1}$), os vórtices geralmente tornam-se visíveis devido à presença de biofilmes na superfície do oceano. Biofilmes se apresentam na forma de filamentos que atenuam a rugosidade em superfície, reduzindo o retroespalhamento de radar e gerando um contraste entre as linhas escuras destes filamentos e as mais claras das regiões livres de biofilmes (Gade et al., 2013). Os vórtices detectados através destes contrastes são conhecidos como vórtices pretos (Figura 7A), em decorrência dos biofilmes (Romeiser, 2013). Em ventos mais intensos ($> 6 \text{ ms}^{-1}$), as linhas escuras de biofilme desaparecem, e os vórtices são usualmente detectados nas imagens SAR devido as interações entre onda e corrente ou devido a frentes térmicas, resultando em linhas mais claras de retroespalhamento relativamente alto (Karimova, 2017). Estes são conhecidos como vórtices brancos (Figura 7B), devido ao alto brilho nas imagens SAR (Romeiser, 2013).

Em estudo pioneiro, Pinho (2021) utilizou imagens SAR da missão Sentinel-1 para detectar vórtices de submesoescala na região do Embaiamento Sul Brasileiro (ESB), preferencialmente associados à Corrente do Brasil. As imagens utilizadas correspondem ao modo IW (Interferometric Wide Swath Mode), cuja largura da faixa de imageamento é de 250 km com uma resolução espacial de $5 \cdot 20 \text{ m}$. O método de identificação dos vórtices utilizou um critério visual já utilizado em outras regiões do oceano global (Xu et al., 2015; Karimova et al., 2017; Gade et al., 2018). O método consiste da prévia identificação dos centros dos vórtices, definidos como a região de convergência dos biofilmes (vórtices pretos) ou das linhas brilhantes (vórtices brancos) (Figura 8). O diâmetro é obtido a partir da definição de dois pontos nas bordas opostas dos vórtices, desde

que a reta que une esses pontos intercepte os seus respectivos centros. O autor também classificou os vórtices quanto ao tipo (branco ou preto) e polaridade (ciclônico ou anticiclônico).

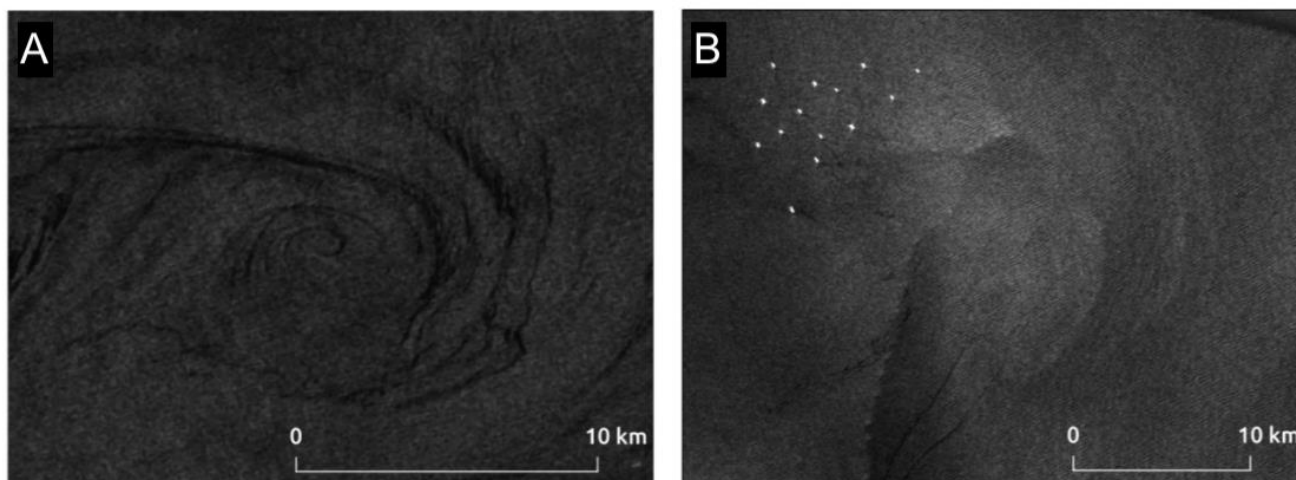


Figura 7. Ilustrações de vórtices de submesoescala branco (esquerda) e preto (direita) registrados a partir de imagens SAR (Pinho, 2021).

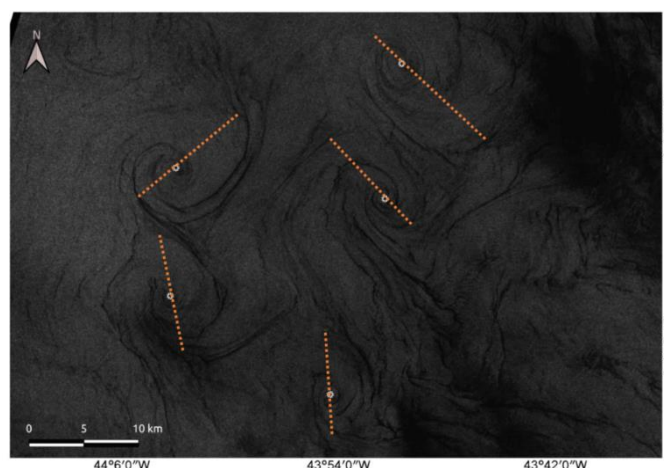


Figura 8. Vórtices de submesoescala identificados através do critério visual em uma imagem SAR. Os asteriscos brancos indicam o centro dos vórtices e os pontos laranjas o maior diâmetro dos vórtices (Pinho, 2021).

3. Sensoriamento remoto da cor dos oceanos na região Sul-Sudeste do Brasil

O uso de sensores a bordo de satélites tem aumentado nas últimas décadas e dentre as diversas aplicações, são utilizados para o gerenciamento de recursos naturais, incluindo o monitoramento dos oceanos e áreas costeiras. Sensores satelitais possibilitam a aquisição de dados da superfície dos oceanos em alta resolução temporal e espacial se comparado às coletas de campo, as quais são limitadas, envolvendo altos custos (Groom et al., 2019). Dentre os inúmeros tipos de dados ambientais obtidos remotamente, dados da cor do oceano são de especial interesse na oceanografia, uma vez que são utilizados para mapear componentes opticamente ativos na água, ou seja, que alteram a reflectância da superfície. A partir da estimativa desses componentes, parâmetros biogeoquímicos e de qualidade da água podem ser obtidos, incluindo a concentração de clorofila-a (proxy para biomassa fitoplanctônica; O'Reilly et al., 1998), taxas de produção primária (Saba et al., 2011), distribuição de diferentes grupos fitoplanctônicos, incluindo algas nocivas (Bracher et al., 2017), aporte de matéria orgânica (Mannino et al., 2014), e níveis de

turbidez e transporte de sedimentos (Dogliotti et al., 2015). Muitos desses parâmetros fazem parte do conjunto de variáveis essenciais necessárias para o monitoramento da saúde dos oceanos e suas respostas às mudanças climáticas e eventos extremos (Pearlman et al., 2019). Além disso, ferramentas de sensoriamento remoto em conjunto com o avanço na tecnologia computacional e estatística, serão fundamentais para que os objetivos de um oceano previsível, limpo, sustentável, acessível e seguro sejam alcançados na próxima década (<http://decada.ciencianomar.mctic.gov.br/>).

Inúmeros trabalhos utilizaram dados satelitais para descrever padrões oceanográficos e parâmetros biogeoquímicos no Atlântico Sul Ocidental (e.g. Garcia et al., 2004; Gonzales-Silvera et al., 2004; Saraceno et al., 2005; Ciotti et al., 2010; Lemos et al., 2019). Porém, para que dados satelitais da cor do oceano sejam utilizados de forma sistemática na quantificação de produtos biogeoquímicos, são necessários estudos de validação radiométrica e bio-ótica, uma vez que o processamento das imagens de satélite envolve procedimentos complexos de correção atmosférica e modelagem matemática. Além disso, são necessários estudos voltados ao aprimoramento ou desenvolvimento de modelos regionais para que os dados radiométricos (ou reflectância) sejam relacionados às concentrações ou taxas de interesse. Há aproximadamente 15 anos, grupos de pesquisadores da FURG, em colaboração com outras universidades do Brasil, vem atuando na área do sensoriamento remoto da cor do oceano, principalmente nas regiões Sul e Sudeste do país (e.g. Garcia et al., 2005; Garcia et al., 2006; Giannini et al., 2013, 2017; Rodrigues, 2014). Além das características ambientais, o alto grau de desenvolvimento econômico e industrial dessas regiões, e a presença de dois dos principais portos do Brasil (Santos, SP e Rio Grande, RS), fazem com que essas regiões recebam destaque ao longo da Década da Ciência Oceânica estabelecida pela ONU, como parte do cumprimento dos objetivos da Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável.

Dados de campo necessários para validação e calibração de sensores remotos ainda são escassos, porém estudos realizados nas regiões Sul e Sudeste do Brasil apresentam caracterizações radiométricas e bio-óticas, dados essenciais para se conhecer o comportamento e a variabilidade da cor do oceano relacionados às diversas massas de água e feições costeiras (Ferreira et al., 2014; Carvalho et al., 2014). No geral, esses estudos apresentaram a distribuição e dinâmica da absorção de luz pelo material particulado total, fitoplâncton e matéria orgânica dissolvida, além de dados da concentração de clorofila-a e particulados totais. O comportamento espectral da absorção de luz pelos diversos componentes presentes na água impacta na reflectância da superfície e na performance dos modelos aplicados ao sensoriamento remoto da cor do mar. Rodrigues et al. (2012) demonstraram que espectros de absorção (e medidas bio-óticas de forma geral) auxiliam na interpretação das concentrações relativas de parâmetros biogeoquímicos e de feições oceanográficas importantes na plataforma Sul do Brasil e no estuário da Lagoa dos Patos. Entretanto, estudos futuros são necessários para estabelecer relações robustas entre propriedades óticas (ex. reflectância espectral) e constituintes opticamente ativos das águas estuarinas, permitindo assim o monitoramento destes por sensoriamento remoto do espaço (Soto et al., 2015). Além da caracterização ótica, esforços vêm sendo aplicados na validação de diferentes métodos de correção atmosférica em regiões costeiras do Brasil. Recentemente, diferentes esquemas de correção atmosférica (NIR, NIR-SWIR e MUMM) aplicadas aos sensores MODIS e VIIRS foram analisados para a região Sul do Brasil, sob influência da desembocadura da Lagoa dos Patos (Sartorato, 2020). Entretanto, dados radiométricos para esse tipo de análise ainda são escassos.

Concentração de clorofila-a - proxy da biomassa fitoplanctônica

O mapeamento da biomassa fitoplanctônica na superfície dos oceanos é comumente realizado por sensoriamento remoto, a qual é representada pela concentração do principal pigmento presente nesse grupo de organismos, a clorofila-a. A presença do pigmento fitoplanctônico na coluna d'água altera o espectro de reflectância da água e a partir de modelos empíricos gerados por dados *in situ*, ou modelos teóricos analíticos, essas informações de reflectância são convertidas em dados de concentração de clorofila-a (O'Reilly et al., 1998; Maritorena et al., 2002). Porém, em zonas costeiras, o uso de sensoriamento remoto é mais complexo, uma vez que requer maior resolução temporal e espacial devido à dinâmica e geomorfologia dessas

regiões, e a presença de diversos componentes opticamente ativos na água influenciam no espectro de reflectância obtido pelo satélite (IOCCG, 2000). Além disso, o procedimento para correção atmosférica é mais complicado em águas turvas do que em águas oceânicas (Goyens et al., 2013). Opticamente, águas costeiras diferem das oceânicas devido à presença de partículas não-algais (orgânicas e inorgânicas) e material dissolvido que, assim como o pigmento fitoplanctônico, interagem com (i.e. absorvem e espalham) a luz incidente na água (Babin et al., 2003; Siegel et al., 2005). Assim, em águas costeiras, o desenvolvimento de modelos bio-óticos regionais, assim como a validação e aperfeiçoamento de modelos já existentes, tem sido realizado por diversos grupos de pesquisa em todo o mundo (e.g., Nechad et al., 2010; Tilstone et al., 2017).

Na região Sul do Brasil, assim como na maior parte das regiões costeiras, o principal limitante para estimar a concentração de clorofila-a a partir de satélites da cor do oceano é a baixa performance dos algoritmos operacionais globais da NASA (Garcia et al., 2006; Giannini et al., 2013). Nessa região, a influência da pluma turva da Lagoa dos Patos e do Rio La Plata, os quais carregam grandes proporções de material particulado inorgânico e CDOM, impede que algoritmos empíricos globais sejam aplicados com acurácia e acabam por superestimar a concentração de clorofila-a (Garcia et al., 2006). O desenvolvimento de algoritmos regionais, os quais levam em conta os diversos componentes óticos na água, é fundamental e atualmente existem diversos modelos especificamente projetados para águas opticamente complexas.

Os modelos empíricos globais são baseados em relações polinomiais entre a razão de bandas de reflectância do sensoriamento remoto (R_{rs}) (azul/verde) e a concentração de clorofila-a. A partir de um banco de dados regional, Garcia et al. (2006) apresentaram novos coeficientes a serem aplicados em formulações empíricas para estimativas da concentração de clorofila-a na região Sul do Brasil, nomeado OC2-LP. Posteriormente, utilizando-se de um banco de dados ainda mais completo, Giannini et al. (2013) atualizaram o algoritmo, o OC2-LPv2 (Figura 9), cuja formulação é apresentada na equação 1, onde Clo = concentração de clorofila-a e $R = \log_{10}(R_{rs}(490)/R_{rs}(555))$. A Figura 10 apresenta uma imagem do satélite MODIS-Aqua processada com um algoritmo global (OC3-M) e com o algoritmo regional (OC2-LPv2).

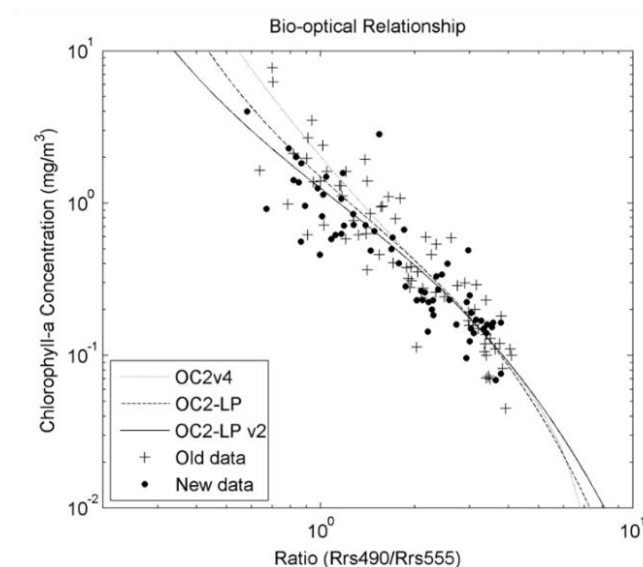


Figura 9. Formulação empírica dos modelos regionais (OC2-LP) para a região Sul do Brasil, comparada ao modelo empírico global (OC2v4) (Giannini et al, 2013)

$$Clo = 10^{0.0949 - 1.6329R + 0.1551R^2 - 0.9824R^3} \quad \text{Eq (1)}$$

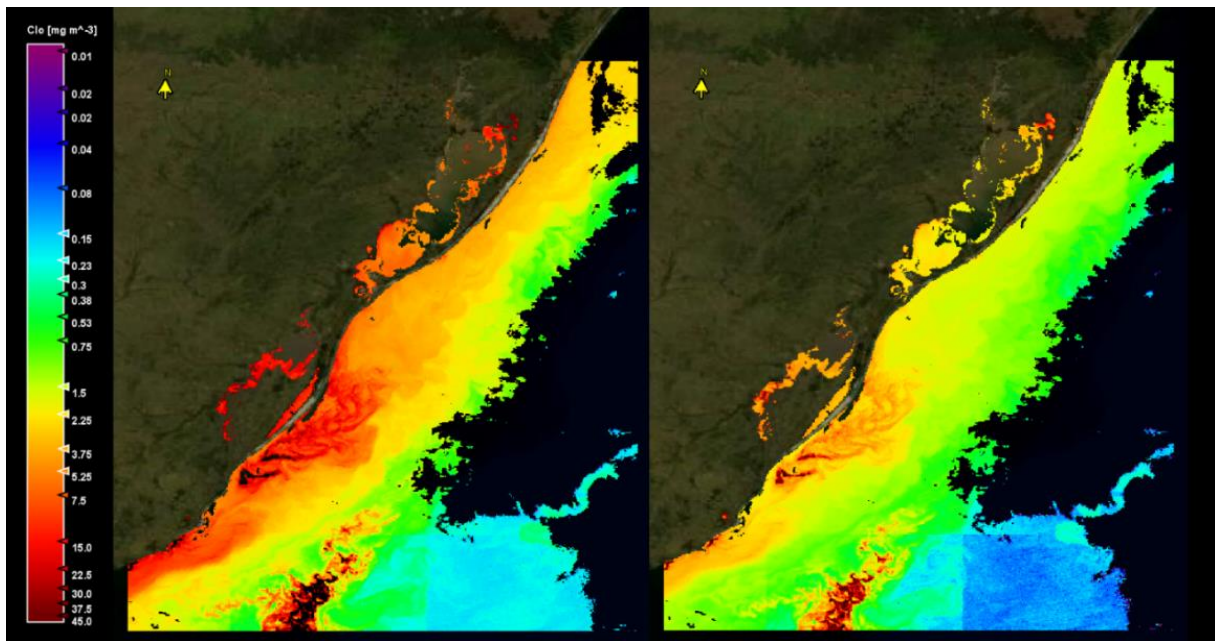


Figura 10. Imagem da concentração de clorofila-a a partir do sensor MODIS-Aqua na região Sul do Brasil (RS) em 31/07/2021, utilizando o algoritmo global OC3-M (esquerda) e OC2-LPv2 (direita).

Distribuição do material em suspensão na superfície do mar

A concentração do material em suspensão total (MST) é a propriedade mais facilmente mensurável por sensores remotos na região Sul do Brasil, principalmente nas águas sob influência da Lagoa dos Patos e da pluma do Rio La Plata (e.g. Fassoni-Andrade et al., 2017; Tavora et al., 2019). Apesar disso, o MST não se relaciona linearmente com qualquer banda do vermelho ou próximo do vermelho (Rodrigues, 2014; Sartorato, 2020). Modelos polinomiais de segunda ordem que relacionam o MST com bandas do vermelho foram desenvolvidos e validados por Sartorato (2020), apresentando as menores diferenças em relação aos dados *in situ*, quando aplicados a imagens de reflectância cujo efeito atmosférico foi corrigido pelos modelos iterativos NIR padrão e NIR-SWIR adaptado (Wang & Shi, 2007). Tavora et al. (2019) utilizaram uma série de 8 anos de dados do sensor MODIS, com correção atmosférica baseada nas bandas do NIR-SWIR (Wang e Shi, 2007), apresentando dinâmicas importantes do material em suspensão (computado a partir do algoritmo de Nechad et al. (2010)) em escalas mensais, sazonais e interanuais.

Atualmente, o grupo de pesquisa em geotecnologias da FURG tem atuado no uso de câmeras multiespectrais a bordo de veículos aéreos não tripulados (VANT ou drones) para o mapeamento do MST nessa região dinâmica da descarga da Lagoa dos Patos (Figura 11). Para isso, ortomosaicos são comparados com dados coletados *in situ* para análise de diferentes modelos bio-óticos e calibração de imagens de satélite a partir de um banco de dados robusto com maior resolução espaço-temporal.

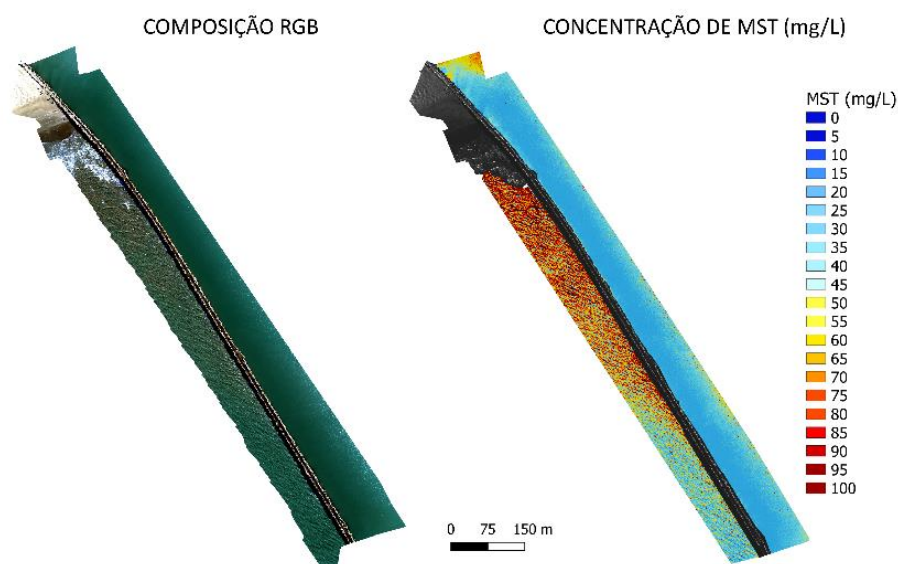


Figura 11. Ortomosaicos do molhe oeste da Barra de Rio Grande (RS) em composição RGB (esquerda) e concentração de MST (direita) a partir de imagens do sensor multiespectral a bordo de VANT, no dia 29/04/21.

Perspectivas futuras nos estudos da cor dos oceanos

Os resultados de Giannini et al (2013), Rodrigues (2014), Soto et al (2015), entre outros, demonstram claramente a necessidade de continuidade de medidas na costa sul do Brasil e estuário da Lagoa dos Patos para a geração de algoritmos bio-óticos. É necessário que haja maior esforço de amostragem, assim como investimento tecnológico e computacional, para validação de correção atmosférica e obtenção de dados biofísicos em maior resolução espaço-temporal. Além disso, dados de campo e imagens de satélite são fundamentais para o esforço em pesquisa e inovação necessárias para implementação da Década da Ciência Oceânica no Brasil, como parte da agenda 2030 das Nações Unidas para o desenvolvimento sustentável. Dentre os resultados esperados, o monitoramento dos oceanos por satélites, a partir de dados regionalmente calibrados, serão parte fundamental para o amplo conhecimento dos processos atuais e futuros, auxiliando em modelos de tendências e previsões climáticas.

Além do desenvolvimento de modelos dedicados às condições costeiras, os avanços dos instrumentos também estão relacionados à capacidade de lidar com ambientes geomorfologicamente complexos, devido à necessidade de maior resolução espacial e temporal dos sensores (Muller-Karger et al., 2018). Nesse sentido, o sensor de cor do oceano OLCI (Ocean and Land Colour Instrument), a bordo do satélite Sentinel-3 da ESA (Agência Espacial Europeia), tem fornecido dados operacionais oceânicos e terrestres, diariamente desde Abril de 2016. O Sentinel-3 fornece dados de superfície com 300m de resolução espacial e possui 21 bandas espectrais, as quais são utilizadas para diversos fins, incluindo aplicações em águas costeiras opticamente complexas (Donlon et al., 2012). O satélite Sentinel-3 faz parte do programa Copernicus da ESA, cujos dados são distribuídos pela EUMETSAT, através de uma política de dados abertos e os produtos têm sido validados em águas costeiras de várias localidades (e.g. Zibordi et al., 2018; Giannini et al., 2021). Sensores de maior resolução espacial (10-60m), como o MSI Sentinel-2, os quais foram desenvolvidos para aplicações terrestres, são atualmente utilizados para fornecer informações da cor da água, principalmente para monitoramento de partículas em suspensão na superfície do mar (e.g., Vanhellemont e Ruddick, 2018; Kuhn et al., 2019). Atualmente, produtos bio-óticos e biogeoquímicos obtidos pelo OLCI Sentinel-3 e MSI Sentinel-2 estão sendo testados e validados para a costa sul do Brasil pelo grupo de bio-ótica e sensoriamento remoto da cor do oceano do IO-FURG.

Referências bibliográficas

- Alpers, W., Brandt, P., Lazar, A., Dagonne, D., Sow, B., Faye, S., Hansen M., Rubino A., Poulain P. & Brehmer, P. (2013). A small-scale oceanic eddy off the coast of West Africa studied by multi-sensor satellite and surface drifter data. *Remote Sensing of Environment*, 129, 132-143. doi:10.1016/j.rse.2012.10.032.
- Andrade, F., & Ferreira, M. A. (2006). A simple method of measuring beach profiles. *Journal of Coastal Research*, 22(4), 995-999. doi:10.2112/04-0387.1.
- Auer, S. J. (1987). Five-year climatological survey of the Gulf Stream system and its associated rings. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 92(C11), 11709-11726.
- Babin, M., Stramski, D., Ferrari, G. M., Claustre, H., Bricaud, A., Obolensky, G., & Hoepffner, N. (2003). Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C7). doi:10.1029/2001JC000882.
- Bio, A., & Bastos, L., & Granja, H., & Pinho, J.L.S., & Gonçalves, J.A., & Henriques, R., & Madeira, S., & Magalhães, A., & Rodrigues, D. (2015). Methods for coastal monitoring and erosion risk assessment: two Portuguese case studies. *Revista de Gestão Costeira Integrada, Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 15(1),47-63. doi:10.5894/rgci490.
- Birkemeier, W. A. (1981). Fast, Accurate Two-Person Beach Surveys. *Coastal Engineering Research Center*. Fort Belvoir, VA.
- Bose, M.A, de Figueiredo, S. A., Calliari, L. J., Arigony-Neto, J., Goulart, E. S., de Carvalho Ferreira, J. A. & da Guia Albuquerque, M. (2020). Os efeitos da elevação do nível do mar e do balanço sedimentar em um hotspot erosivo no litoral do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 47(2), 097101. doi:10.22456/1807-9806.108560.
- Bracher, A., Bouman, H. A., Brewin, R. J., Bricaud, A., Brotas, V., Ciotti, A. M., ... & Wolanin, A. (2017). Obtaining phytoplankton diversity from ocean color: a scientific roadmap for future development. *Frontiers in Marine Science*, 4, 55. doi:10.3389/fmars.2017.00055.
- Brachet, S., Le Traon, P. Y., & Le Provost, C. (2004). Mesoscale variability from a high-resolution model and from altimeter data in the North Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C12). doi:10.1029/2004JC002360.
- Carvalho, M., Ciotti, A. M., Giancesella, S. M. F., Corrêa, F. M. P. S., & Perinotto, R. R. C. (2014). Bio-optical properties of the inner continental shelf off Santos estuarine system, southeastern Brazil, and their implications for ocean color algorithm performance. *Brazilian Journal of Oceanography*, 62(2), 71-87. doi:10.1590/S1679-87592014044506202.
- Chaigneau, A., Le Texier, M., Eldin, G., Grados, C., & Pizarro, O. (2011). Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: A composite analysis from altimetry and Argo profiling floats. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C11). doi:10.1029/2011JC007134.
- Chelton, D. B., Schlax, M. G., Samelson, R. M., & de Szoeki, R. A. (2007). Global observations of large oceanic eddies. *Geophysical Research Letters*, 34(15). doi:10.1029/2007GL030812.
- Chelton, D. B., Schlax, M. G., & Samelson, R. M. (2011). Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Progress in oceanography*, 91(2), 167-216. doi: 10.1016/j.pocean.2011.01.002
- Ciotti, Á. M., Garcia, C. A. E., & Jorge, D. S. F. (2010). Temporal and meridional variability of Satellite-estimates of surface chlorophyll concentration over the Brazilian continental shelf. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 5(2), 236–253.
- Cowell, P. J., Roy, P. S., & Jones, R. A. (1992). Shoreface translation model: computer simulation of coastal-sand-body response to sea level rise. *Mathematics and computers in simulation*, 33(5-6), 603-608. doi:10.1016/0378-4754(92)90158-D.
- Cowell, P. J., Roy, P. S., & Jones, R. A. (1995). Simulation of large-scale coastal change using a morphological behaviour model. *Marine Geology*, 126(1-4), 45-61. doi: 10.1016/0025-3227(95)00065-7.

- Cowell, P. J., Thom, B. G., Jones, R. A., Everts, C. H., & Simanovic, D. (2006). Management of uncertainty in predicting climate-change impacts on beaches. *Journal of Coastal Research*, 22(1), 232-245. doi: 10.2112/05A-0018.1.
- Delgado, I., & Lloyd, G. (2004). A simple low cost method for one person beach profiling. *Journal of Coastal Research*, 20(4), 1246-1252. doi:10.2112/03-0067R.1.
- Dogliotti, A. I., Ruddick, K. G., Nechad, B., Doxaran, D., & Knaeps, E. (2015). A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment*, 156, 157-168. doi:10.1016/j.rse.2014.09.020.
- Donlon, C., Berruti, B., Mecklenberg, S., Nieke, J., Rebhan, H., Klein, U., ... & Sciarra, R. (2012, July). The Sentinel-3 Mission: Overview and status. In *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 1711-1714). IEEE. doi:10.1109/IGARSS.2012.6351194.
- Drummond, C. D., Harley, M. D., Turner, I. L., A Matheen, A. N., & Glamore, W. C. (2015). UAV applications to coastal engineering. Em *Australasian Coasts & Ports Conference 2015: 22nd Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 15th Australasian Port and Harbour Conference* (267). Engineers Australia and IPENZ.
- Eltner, A., & Sofia, G. (2020). Structure from motion photogrammetric technique. Em P. Tarolli, S. M. Mudd (Eds.), *Developments in Earth Surface Processes* 23, 1-24. Elsevier. doi:10.1016/B978-0-444-64177-9.00001-1.
- Emery, K. O. (1961). A simple method of measuring beach profiles. *Limnology and oceanography*, 6(1), 90-93. doi:10.4319/lo.1961.6.1.0090.
- Ferreira, A., Ciotti, Á. M., & Giannini, M. F. C. (2014). Variability in the light absorption coefficients of phytoplankton, non-algal particles, and colored dissolved organic matter in a subtropical bay (Brazil). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 139, 127-136. doi:10.1016/j.ecss.2014.01.002.
- Figueiredo, S. A., Calliari, L. J., & Machado, A. A. (2018). Modelling the effects of sea-level rise and sediment budget in coastal retreat at Hermenegildo Beach, Southern Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 66, 210-219. doi:10.1590/s1679-87592018009806602.
- FitzGerald, D. M., Fenster, M. S., Argow, B. A., & Buynevich, I. V. (2008). Coastal impacts due to sea-level rise. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 36, 601-647. doi: 10.1146/annurev.earth.35.031306.140139.
- Forgiarini, A. P. P., de Figueiredo, S. A., Calliari, L. J., Goulart, E. S., Marques, W., Trombetta, T. B., ... & Salame, C. C. (2019). Quantifying the geomorphologic and urbanization influence on coastal retreat under sea level rise. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 230, 106437. doi:10.1016/j.ecss.2019.106437.
- Fu, L. L. (2006). Pathways of eddies in the South Atlantic Ocean revealed from satellite altimeter observations. *Geophysical Research Letters*, 33(14). doi:10.1029/2006GL026245.
- Gade, M., Byfield, V., Ermakov, S., Lavrova, O., & Mitnik, L. (2013). Slicks as indicators for marine processes. *Oceanography*, 26(2), 138-149. doi:10.5670/oceanog.2013.39.
- Gade, M., Buck, A., & Karimova, S. (2018). Statistical Analysis of Eddies in the Western Mediterranean Based on Multiple SAR Imagery. *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1481-1484. Valencia, Espanha. doi:10.1109/IGARSS.2018.8518805.
- Garcia, C. A., Sarma, Y. V. B., Mata, M. M., & Garcia, V. M. (2004). Chlorophyll variability and eddies in the Brazil–Malvinas Confluence region. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(1-3), 159-172. doi:10.1016/j.dsr2.2003.07.016
- Garcia, C. A. E., Garcia, V. M. T., & McClain, C. R. (2005). Evaluation of SeaWiFS chlorophyll algorithms in the Southwestern Atlantic and Southern Oceans. *Remote Sensing of Environment*, 95(1), 125-137. doi:10.1016/j.rse.2004.12.006

- Garcia, V. M. T., Signorini, S., Garcia, C. A. E., & McClain, C. R. (2006). Empirical and semi-analytical chlorophyll algorithms in the south-western Atlantic coastal region (25–40 S and 60–45 W). *International Journal of Remote Sensing*, 27(8), 1539-1562. doi: 10.1080/01431160500382857.
- Giannini, M. F. C., Garcia, C. A. E., Tavano, V. M., & Ciotti, Á. M. (2013). Effects of low-salinity and high-turbidity waters on empirical ocean colour algorithms: An example for Southwestern Atlantic waters. *Continental Shelf Research*, 59, 84-96. doi:10.1016/j.csr.2013.04.013.
- Giannini, M. F. C., Harari, J., & Ciotti, A. M. (2017). The use of CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite) to trace the dynamics of total suspended matter at an urbanized coastal area. *Brazilian Journal of Oceanography*, 65, 309-323. doi:10.1590/S1679-87592017135006502.
- Gómez-Gutiérrez, Á., & Gonçalves, G. R. (2020). Surveying coastal cliffs using two UAV platforms (multirotor and fixed-wing) and three different approaches for the estimation of volumetric changes. *International Journal of Remote Sensing*, 41(21), 8143-8175. doi:10.1080/01431161.2020.1752950.
- Gonçalves, J. A., & Henriques, R. (2015). UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 101-111. doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009.
- Gonzalez-Silvera, A., Santamaria-del-Angel, E., Garcia, V. M., Garcia, C. A., Millán-Nuñez, R., & Muller-Karger, F. (2004). Biogeographical regions of the tropical and subtropical Atlantic Ocean off South America: classification based on pigment (CZCS) and chlorophyll-a (SeaWiFS) variability. *Continental Shelf Research*, 24(9), 983-1000. doi:10.1016/j.csr.2004.03.002.
- Goyens, C., Jamet, C., & Schroeder, T. (2013). Evaluation of four atmospheric correction algorithms for MODIS-Aqua images over contrasted coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 131, 63-75. doi:10.1016/j.rse.2012.12.006.
- Groom, S., Sathyendranath, S., Ban, Y., Bernard, S., Brewin, R., Brotas, V., ... & Wang, M. (2019). Satellite ocean colour: current status and future perspective. *Frontiers in Marine Science*, 6, 485. doi:10.3389/fmars.2019.00485.
- Grottoli, E., Biauxque, M., Rogers, D., Jackson, D. W., & Cooper, J. A. G. (2021). Structure-from-Motion-Derived Digital Surface Models from Historical Aerial Photographs: A New 3D Application for Coastal Dune Monitoring. *Remote Sensing*, 13(1), 95. doi:10.3390/rs13010095.
- Guo, J., Shi, L., Pan, S., Ye, Q., Cheng, W., Chang, Y., & Chen, S. (2020). Monitoring and evaluation of sand nourishments on an embayed beach exposed to frequent storms in eastern China. *Ocean & Coastal Management*, 195, 105284. doi:10.1016/j.ocecoaman.2020.105284.
- Haala, N., & Rothermel, M. (2012). Dense multi-stereo matching for high quality digital elevation models. *PFG Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 331-343. doi:10.1127/1432-8364/2012/0121.
- Harley, M. D., Turner, I. L., Short, A. D., & Ranasinghe, R. (2011). Assessment and integration of conventional, RTK-GPS and image-derived beach survey methods for daily to decadal coastal monitoring. *Coastal Engineering*, 58(2), 194-205. doi:10.1016/j.coastaleng.2010.09.006.
- Harley, M. D., Turner, I. L., Short, A. D., Bracs, M. A., Phillips, M. S., Simmons, J. A., & Splinter, K. D. (Setembro, 2015). Four decades of coastal monitoring at Narrabeen-Collaroy Beach: the past, present and future of this unique dataset. Em *Australasian Coasts & Ports Conference*. Auckland, Nova Zelândia.
- I.B.G.E., Censo (2010). Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br>.

- IOCCG. (2000). Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex Waters. (S. Sathyendranath ed.). Dartmouth, NS, Canada, International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG), 140pp. (Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 3) .doi:10.25607/OBP-95.
- IPCC (2019): Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. *In press*.
- IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. *In Press*.
- Jacobs, G. A., Barron, C. N., & Rhodes, R. C. (2001). Mesoscale characteristics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C9), 19581-19595. doi:10.1029/2000JC000669.
- Karimova, S. (2017). Observing surface circulation of the Western Mediterranean basin with satellite imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-3-W2-97-2017.
- Kuhn, C., de Matos Valerio, A., Ward, N., Loken, L., Sawakuchi, H. O., Kampel, M., ... & Butman, D. (2019). Performance of Landsat-8 and Sentinel-2 surface reflectance products for river remote sensing retrievals of chlorophyll-a and turbidity. *Remote Sensing of Environment*, 224, 104-118. doi:10.1016/j.rse.2019.01.023.
- Kuragano, T., & Kamachi, M. (2000). Global statistical space-time scales of oceanic variability estimated from the TOPEX/POSEIDON altimeter data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C1), 955-974. doi:10.1029/1999JC900247.
- Lee, J. M., Park, J. Y., & Choi, J. Y. (2013). Evaluation of sub-aerial topographic surveying techniques using total station and RTK-GPS for applications in macrotidal sand beach environment. *Journal of Coastal Research*, (65 (10065)), 535-540. doi:10.2112/SI65-091.1.
- Lemos, A. T., Ghisolfi, R. D. R., & Mazzini, P. L. F. (2018). Annual phytoplankton blooming using satellite-derived chlorophyll-a data around the Vitória-Trindade Chain, Southeastern Brazil. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 136, 62-71. doi:10.1016/j.dsr.2018.04.005.
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhof, S. (2018). The state of the world's beaches. *Scientific reports*, 8(1), 1-11. doi:10.1038/s41598-018-24630-6.
- Mannino, A., Novak, M. G., Hooker, S. B., Hyde, K., & Aurin, D. (2014). Algorithm development and validation of CDOM properties for estuarine and continental shelf waters along the northeastern US coast. *Remote Sensing of Environment*, 152, 576-602. doi:10.1016/j.rse.2014.06.027.
- Maritorena, S., Siegel, D. A., & Peterson, A. R. (2002). Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. *Applied optics*, 41(15), 2705-2714. doi:10.1364/AO.41.002705.
- Martínez, J., Sastre, J., Alemán, G., Castro, J. J., Martín Artiles, A., & Robayna, D. (1987). Los movimientos de las superficies topográficas en las playas de arenas: métodos de investigación e interpretación. *Revista de Obras Públicas*, 134 (3269), 469-483.
- Matsuoka, D., Araki, F., Inoue, Y., & Sasaki, H. (2016). A new approach to ocean eddy detection, tracking, and event visualization—application to the northwest pacific ocean. *Procedia Computer Science*, 80, 1601-1611. doi:10.1016/j.procs.2016.05.491.

- Morrow, R., & Le Traon, P. Y. (2012). Recent advances in observing mesoscale ocean dynamics with satellite altimetry. *Advances in Space Research*, 50(8), 1062-1076. doi:10.1016/j.asr.2011.09.033.
- Muller-Karger, F. E., Hestir, E., Ade, C., Turpie, K., Roberts, D. A., Siegel, D., ... & Jetz, W. (2018). Satellite sensor requirements for monitoring essential biodiversity variables of coastal ecosystems. *Ecological applications*, 28(3), 749-760. doi:10.1002/eap.1682.
- Munk, W., Armi, L., Fischer, K., & Zachariasen, F. (2000). Spirals on the sea. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 456(1997), 1217-1280. doi:10.1098/rspa.2000.0560.
- Nechad, B., Ruddick, K. G., & Park, Y. (2010). Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sensing of Environment*, 114(4), 854–866. doi:10.1016/j.rse.2009.11.022.
- Okubo, A. (1970). Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity singularities such as convergences. *Deep sea research and oceanographic abstracts*, 17, 445–454.
- Oliveira, F. S., & Polito, P. S. (2013). Characterization of westward propagating signals in the South Atlantic from altimeter and radiometer records. *Remote sensing of environment*, 134, 367-376. doi:10.1016/j.rse.2013.03.019.
- Oliveira, F. S., & Polito, P. S. (2018). Mesoscale eddy detection in satellite imagery of the oceans using the Radon transform. *Progress in Oceanography*, 167, 150-163. doi:10.1016/j.pocean.2018.08.003.
- Oliveira, U. R., Simões, R. S., Calliari, L. J., & Gautério, B. C. (2019). Erosão de dunas sob ação de um evento extremo de alta energia de ondas na costa central e sul do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 20(1). doi:10.20502/rbg.v20i1.1352
- O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Mitchell, B. G., Siegel, D. A., Carder, K. L., Garver, S. A., ... & McClain, C. (1998). Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C11), 24937-24953.
- Over, J. S. R., Ritchie, A. C., Kranenburg, C. J., Brown, J. A., Buscombe, D. D., Noble, T., ... & Wernette, P. A. (2021). *Processing coastal imagery with Agisoft Metashape Professional Edition, version 1.6—Structure from motion workflow documentation* (No. 2021-1039). US Geological Survey, Reston, VA. doi: 10.3133/ofr20211039.
- Papakonstantinou, A., Topouzelis, K., & Pavlogeorgatos, G. (2016). Coastline zones identification and 3D coastal mapping using UAV spatial data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(6), 75. doi:10.3390/ijgi5060075.
- Pearlman, J., Bushnell, M., Coppola, L., Karstensen, J., Buttigieg, P. L., Pearlman, F., ... & Whoriskey, F. (2019). Evolving and sustaining ocean best practices and standards for the next decade. *Frontiers in Marine Science*, 6, 277. doi:10.3389/fmars.2019.00277.
- Pucino, N., Kennedy, D. M., Carvalho, R. C., Allan, B., & Ierodiaconou, D. (2021). Citizen science for monitoring seasonal-scale beach erosion and behaviour with aerial drones. *Scientific reports*, 11(1), 1-17. doi:10.1038/s41598-021-83477-6.
- Rietbroek, R., S. Brunnabend, J. Kusche, J. Schröter, and C. Dahle. (2016). Revisiting The Contemporary Sea-Level Budget On Global And Regional Scales. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*, 113 (6): 1504-1509. doi:10.1073/pnas.1519132113.
- Robinson, A. R. (1983). *Eddies in marine science*. New York: Springer
- Rodrigues, J. P. (2014). *Caracterização bio-óptica das águas do Estuário da Lagoa dos Patos, RS – Brasil* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande.
- Rodrigues, J. P., Araujo, M. L. V., Emerich, P., Ávila, R., & Garcia, C. A. E. (2012). Absorção e atenuação da luz e sua relação com os constituintes óticos das águas do Estuário da Lagoa

dos Patos (RS - Brasil). *Anais do Congresso Brasileiro de Oceanografia*, 2012, 1615–1629, Rio de Janeiro.

- Romeiser, R. (2013). The future of SAR-based oceanography: high-resolution current measurements by along-track interferometry. *Oceanography*, 26(2), 92-99. doi:10.5670/oceanog.2013.37.
- Saba, V. S., Friedrichs, M. A., Antoine, D., Armstrong, R. A., Asanuma, I., Behrenfeld, M. J., ... & Westberry, T. K. (2011). An evaluation of ocean color model estimates of marine primary productivity in coastal and pelagic regions across the globe. *Biogeosciences*, 8(2), 489-503. doi:10.5194/bg-8-489-2011.
- Sadarjoen, I. A., & Post, F. H. (2000). Detection, quantification, and tracking of vortices using streamline geometry. *Computers & Graphics*, 24(3), 333-341. doi:10.1016/S0097-8493(00)00029-7
- Sallenger Jr, A. H., Krabill, W. B., Swift, R. N., Brock, J., List, J., Hansen, M., ... & Stockdon, H. (2003). Evaluation of airborne topographic lidar for quantifying beach changes. *Journal of Coastal Research*, 125-133.
- Saraceno, M., Provost, C., & Piola, A. R. (2005). On the relationship between satellite-retrieved surface temperature fronts and chlorophyll a in the western South Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C11). doi:10.1029/2004JC002736.
- Sartorato, L. L. (2020). *Caracterização ótica e quantificação do material particulado em suspensão do estuário e da pluma da Lagoa dos Patos (RS, Brasil) por sensoriamento remoto* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande.
- Siegel, D. A., Maritorena, S., Nelson, N. B., Behrenfeld, M. J., & McClain, C. R. (2005). Colored dissolved organic matter and its influence on the satellite-based characterization of the ocean biosphere. *Geophysical Research Letters*, 32(20). doi:10.1029/2005GL024310.
- Simões, R. S., de Oliveira, U. R., de Almeida Espinoza, J. M., da Guia Albuquerque, M., & Alves, D. C. L. (2019). Uso de drone de pequeno porte para análise costeira: enfoque metodológico (Use of small drone for coastal analysis: methodological approach). *Revista brasileira de geografia física*, 12(2), 622-640. doi:10.26848/rbgf.v12.2.p622-640.
- Soto I., Möller O. O. Jr., Souza, M. S., Pereira E., Odebrecht, C., Rodrigues, J. P., Tavano, V. M., Serra, F. P., Mendes, C. R. B. and Garcia, C. A. E. (Novembro, 2015). Sediment load, phytoplankton community and estuarine circulation dynamics in Patos Lagoon, Brazil. *Coastal and Estuarine Research Federation*. Portland, EUA.
- Souza, R., Pezzi, L., Swart, S., Oliveira, F., & Santini, M. (2021). Air-Sea Interactions over Eddies in the Brazil-Malvinas Confluence. *Remote Sensing*, 13(7), 1335. doi:10.3390/rs13071335.

HUELLA URBANA DE LA CIUDAD DE ROSARIO, SANTA FE, ARGENTINA. AÑOS 2013 Y 2015

Laura Balparda; Diego López; Florencia Tazzioli; Ma. Cecilia Torralba; Brunela Ciattaglia; Héctor Peña; Tania Solis; Verónica Aquili; Dardo Delorenzi; Benito Vicioso

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina

csr@fceia.unr.edu.ar

Resumen

Una de las necesidades que se plantea a nivel mundial, es el estudio de la distribución espacial y la evolución de los asentamientos humanos, donde resultan clave las herramientas de la teledetección. A tales fines, se define huella urbana, al área urbanizada dominada por construcciones edilicias. El estudio de la evolución espacial y temporal de la huella urbana proporciona elementos que facilitan la planificación y el ordenamiento territorial, en pos de alcanzar ciudades y comunidades más inclusivas y sostenibles (ODS 11, UN, 2015). El objetivo del presente trabajo es identificar la huella urbana en la ciudad de Rosario (Santa Fe, Argentina), usando imágenes radar de los satélites COSMO-SkyMed y Radarsat-2, años 2013 y 2015. En el procesamiento se sigue el modelo raster binario con valor 1 (uno) en presencia de huella urbana y 0 (cero) en caso contrario. En la determinación se emplea una metodología basada en la coherencia interferométrica InSAR. En la verificación de uno de los resultados, se utiliza el producto del proyecto Global Urban Footprint (GUF), de la Agencia Espacial Alemana. El resultado derivado de imágenes COSMO-SkyMed (HU) presentó en algunos subsectores, una superficie de la huella urbana mayor respecto al producto GUF, y en otros el resultado opuesto. En base a la propuesta metodológica se determinó la huella urbana de la ciudad de Rosario para los años 2013 y 2015. La comparación con sitios testigos y con un producto de características similares, arrojaron los primeros indicios de la necesidad de continuar ampliando y profundizando el análisis.

Palabras clave: *huella urbana, InSAR, GUF, COSMO-SkyMed, Radarsat-2*

Introducción

El fenómeno global de transición del ambiente rural al urbano, pone de manifiesto que la mayoría de los habitantes de la Tierra, viven en algún tipo de entorno urbanizado; este hecho se acentúa drásticamente con el paso del tiempo, estimándose que aproximadamente un 70% de las personas, vivirán en centros urbanos para el año 2050 (Esch *et al.*, 2017).

Ante esta realidad, los organismos de gobierno se enfrentan al desafío apremiante de planificar, gestionar y controlar la urbanización, planteando estrategias de reorganización en ámbitos como la infraestructura, el transporte y el ordenamiento territorial en general.

El conocimiento de la distribución espacial de las urbanizaciones, su evolución y su relación con el área de los asentamientos rurales son el punto de partida para abordar la implementación de acciones que tiendan a minimizar las consecuencias negativas de esta realidad en la vida de los habitantes de estos centros (ODS NU, 2015).

El mapeo de las áreas urbanas permite detectar la transformación de zonas rurales a urbanas, relevar el estado de los asentamientos irregulares, analizar la detección, usos y distribución de mejoras, entre otras acciones que puedan contribuir a la resolución de probables conflictos (Voltersen *et al.*, 2017).

En el mapeo, resultan de gran utilidad los datos captados por los sensores remotos a bordo de satélites y las herramientas de la teledetección, que permiten estudiar las dimensiones espaciales de los asentamientos humanos y su crecimiento.

En este contexto, se define como huella urbana a la extensión espacial del área urbanizada, conformada por estructuras antrópicas como por ejemplo edificaciones, calles y superficies impermeables en general, sin considerar las superficies naturales que se encuentran dentro de las ciudades (Voltersen *et al.*, 2017). No obstante, en algunos estudios se considera solo al área edificada como huella urbana (Esch *et al.*, 2017).

El estudio de la evolución espacial y temporal de la huella urbana, permite cuantificar la expansión urbana de una población. Estos resultados son una herramienta útil para la planificación y gestión del ordenamiento territorial, así como también para la detección de cambios en el uso del suelo y facilitan, en cierto modo, al desarrollo de urbanizaciones más inclusivas y sostenibles, tal como se plantea a nivel mundial, en el objetivo número 11 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (ODS NU, 2015).

Independientemente de la metodología que se utilice para obtener la huella urbana, la misma se representa mediante una máscara de asentamiento urbano siguiendo un modelo ráster binario de presencia/ausencia (Esch *et al.*, 2017).

Actualmente, uno de los estudios más importante realizado para la identificación de la huella urbana a nivel mundial es el proyecto Global Urban Footprint (GUF, DLR 2016), creado a partir principalmente de datos satelitales TerraSAR-X y TanDEM-X, años 2011-2013, llevado a cabo por el Centro Aeroespacial Alemán (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. - DLR). Este trabajo se desarrolló, con el objetivo de mapear los asentamientos urbanos, permitiendo analizar los patrones y las estructuras urbanas, la distribución regional de la población y la organización de las áreas urbanas y rurales (Agencia Espacial Alemana, 2018).

La obtención de GUF se basó en el cálculo de una medida de textura y en una clasificación que se centra en el análisis combinado de las características locales de retrodispersión (amplitud) y heterogeneidad local (textura) (Esch *et al.*, 2014). Estas características de las construcciones se relacionan con las estructuras de edificios verticales, de modo tal que según Esch *et al.* (2017) la máscara de GUF refleja la distribución detallada de construcciones en altura y no la totalidad de la superficie impermeable, que usualmente incluye carreteras y superficies pavimentadas. Esta particularidad diferencia los resultados obtenidos con esta metodología de los mapas de asentamiento derivados de imágenes satelitales multiespectrales (Esch *et al.*, 2017).

El producto GUF consiste en una máscara donde los píxeles poseen valores 0/255 correspondientes a ausencia/presencia de la huella urbana, visibles en tonos de negro/blanco en la figura 1, con una resolución espacial de 12 metros (Esch *et al.*, 2011; 2017; 2018). GUF provee datos uniformes aplicables en todo el mundo sobre la localización, el tamaño y la forma de los asentamientos urbanos, resultando una ventaja crucial especialmente en regiones remotas y subdesarrolladas de la Tierra, donde los datos geográficos disponibles son frecuentemente escasos. Existen dos conjuntos de datos GUF, uno de uso abierto y sin cargo para aplicaciones sin fines de lucro cuya resolución general es de 84 metros y otro con fines científicos, donde los píxeles son de 12 metros, a los cuales se puede acceder a través de una solicitud al Centro Aeroespacial Alemán (Esch *et al.*, 2017).

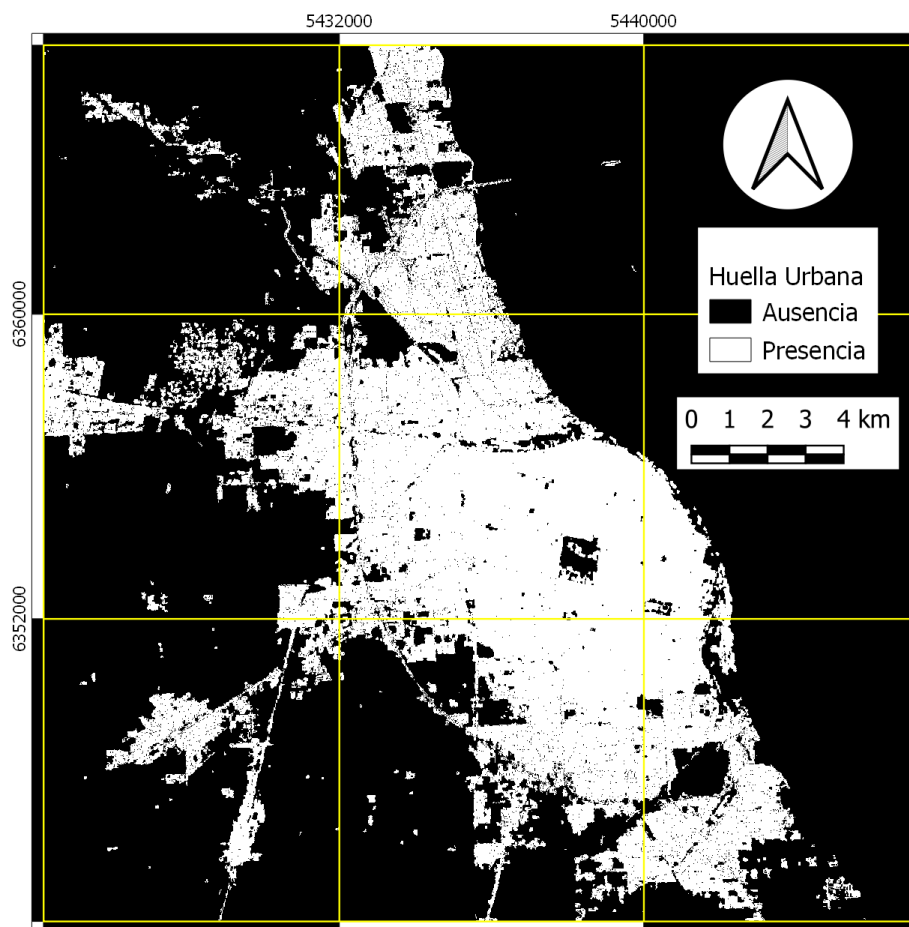


Figura 1. Máscara GUF en la ciudad de Rosario. Fuente: Esch *et al.* (2011; 2017; 2018)

Existen también, otros dos proyectos muy relevantes a nivel mundial, a saber: Global Human Settlement Layer (GHSL)¹² y el Global Human Built-up And Settlement Extent (HBASE)¹³, ambos de acceso libre y gratuito. Por un lado, en GHSL, se procesaron grandes volúmenes de datos heterogéneos a partir de imágenes satelitales Landsat y Sentinel, continentales y globales, imágenes satelitales a escala pequeña, datos censales e información geográfica proveniente de diferentes fuentes; produciendo así desde 1975 a 2018, información espacial global sobre población y dimensiones de los asentamientos humanos en el planeta. Estos resultados han sido testeados con datos de distintos sensores, misiones radar y ópticas, públicas y privadas (European Commission, 2018).

Por otro lado, HBASE es un mapa global de extensión de asentamientos, derivado de los datos Global Land Survey (GLS) de Landsat del año 2010. Este producto es luego utilizado como entrada para mejorar cartografías de superficies en Global Man-made Impervious Surface (GIMS); el cual emplea en su algoritmo, imágenes satelitales de alta resolución para calcular el porcentaje de superficie impermeable antrópica dentro de las zonas urbanas (NASA, s.f.).

Los proyectos internacionales, antes mencionados, ponen en evidencia una y otra vez, la relevancia y el alcance de un sistema de teledetección espacial; donde se incluye: una fuente de

¹² Global Human Settlement Layer (GHSL) pertenece a Joint Research Centre (JRC) y Directorate-General for Regional and Urban Policy (DG REGIO), European Commission, junto con la asociación internacional GEO Human Planet Initiative. (s.f.) GHSL – Global Human Settlement Layer. Disponible en: <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/>. Fecha de consulta: 25/09/21.

¹³ Global Human Built-up And Settlement Extent (HBASE) pertenece a NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC).(s.f.) Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). Disponible en: <https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/ulandsat-hbase-v1>. Fecha de consulta: 25/09/21.

energía detectada por los sensores (propia o externa), la cobertura terrestre, el sistema sensor, el sistema de recepción-comercialización, el intérprete y el usuario final (Chuvienco, 2010).

De todo el rango de variación del espectro electromagnético, en el que los sensores remotos satelitales pueden sentir energía, resulta de interés la región de las microondas, más específicamente, en aquellas bandas donde opera el Radar de Apertura Sintética (SAR). Esta elección se justifica, por el potencial que tienen en captar datos de noche y de día, en presencia de nubes y precipitaciones leves, entre otras. Cabe mencionar, que la resolución espectral, el moteado (ruido) y otras características de las imágenes de radar, requieren de un grado de habilidad importante en el análisis e interpretación de las mismas. No obstante, la posibilidad de hacer uso de técnicas interferométricas abre un abanico de oportunidades que merecen ser exploradas, para la obtención de cartografía temática.

La ciudad de Rosario (Provincia de Santa Fe, Argentina) presenta un constante crecimiento en su desarrollo urbanístico, ejerciendo su influencia sobre las localidades satélites que conforman su área metropolitana. En este trabajo se plantea el estudio de la detección de la huella urbana a través de imágenes satelitales radar, haciendo uso de técnicas interferométricas, considerando como área de interés a la ciudad de Rosario, para los años 2013 y 2015.

Objetivo general

Identificar la huella urbana en la ciudad de Rosario (Santa Fe, Argentina), usando imágenes radar de apertura sintética de los satélites COSMO-SkyMed y Radarsat-2, para los años 2013 y 2015, respectivamente.

Objetivos específicos

- Determinar la huella urbana a partir de datos captados por el sensor remoto a bordo de los satélites COSMO-SkyMed y Radarsat-2, aplicando técnicas interferométricas.
- Analizar cuantitativamente la huella urbana obtenida desde imágenes de radar COSMO-SkyMed, en relación al producto obtenido en el marco del proyecto Global Urban Footprint.
- Validar en sitios testigos, la huella urbana creada a partir de imágenes de radar COSMO-SkyMed, considerando para su validación el área que surge de la vectorización en un aerofotomosaico de lo edificado en planta y el proyecto Global Urban Footprint.

Área de estudio y datos

Área de estudio

La ciudad de Rosario está ubicada en la zona sur de la provincia de Santa Fe, República Argentina, entre 32° 52' 18" y 33° 02' 22" latitud Sur y entre 60° 36' 44" y 60° 47' 46" longitud Oeste. Su altitud sobre el nivel del mar oscila entre los 22,5 y 24,6 metros. El distrito posee una superficie total de 178,69 km², de la cual el 67,36% está urbanizada. Limita al este con el Río Paraná, al sur con las localidades de Soldini, Piñeiro y Villa Gobernador Gálvez, al oeste con Funes y Pérez, y al norte con Granadero Baigorria e Ibarlucea¹⁴.

Datos

¹⁴ Rosario. Características. Cuidad. Municipalidad de Rosario. Disponible en: <http://www.rosario.gov.ar/web/ciudad/caracteristicas/informacion-territorial-y-datos>. Fecha de consulta: 24/05/2018.

En el presente trabajo se seleccionan las imágenes satelitales radar de las misiones COSMO-SkyMed¹⁵ y Radarsat-2¹⁶. Con respecto a las imágenes COSMO-SkyMed sus especificaciones son: banda X (frecuencia de adquisición 9.6 GHz), modo de adquisición Stripmap Himage con un ancho de faja de 40 km y un ángulo de inclinación de 27,71° a 30,47° (cercano y lejano respectivamente), polarización horizontal-horizontal (HH), resolución espacial 3 m, fecha de adquisición 19/06/2013 y 27/06/2013. Las características de las imágenes Radarsat-2 son: banda C (frecuencia de 5,405 Ghz), modo de adquisición Ultra Fine Beam U10 con un barrido de 20 km y un ángulo de incidencia de 37,2° a 38,4° (cercano y lejano respectivamente), polarización horizontal-horizontal (HH), resolución espacial 2.6 m, fecha de adquisición 21/11/2015 y 15/12/2015.

Los subsets de las imágenes COSMO-SkyMed (Figura 2) seleccionadas son:

- CSKS2_SCS_B_HI_04_HH_RA_SF_20130619102933_20130619102940_hh_slc
- CSKS2_SCS_B_HI_04_HH_RA_SF_20130627102929_20130627102938_hh_slc

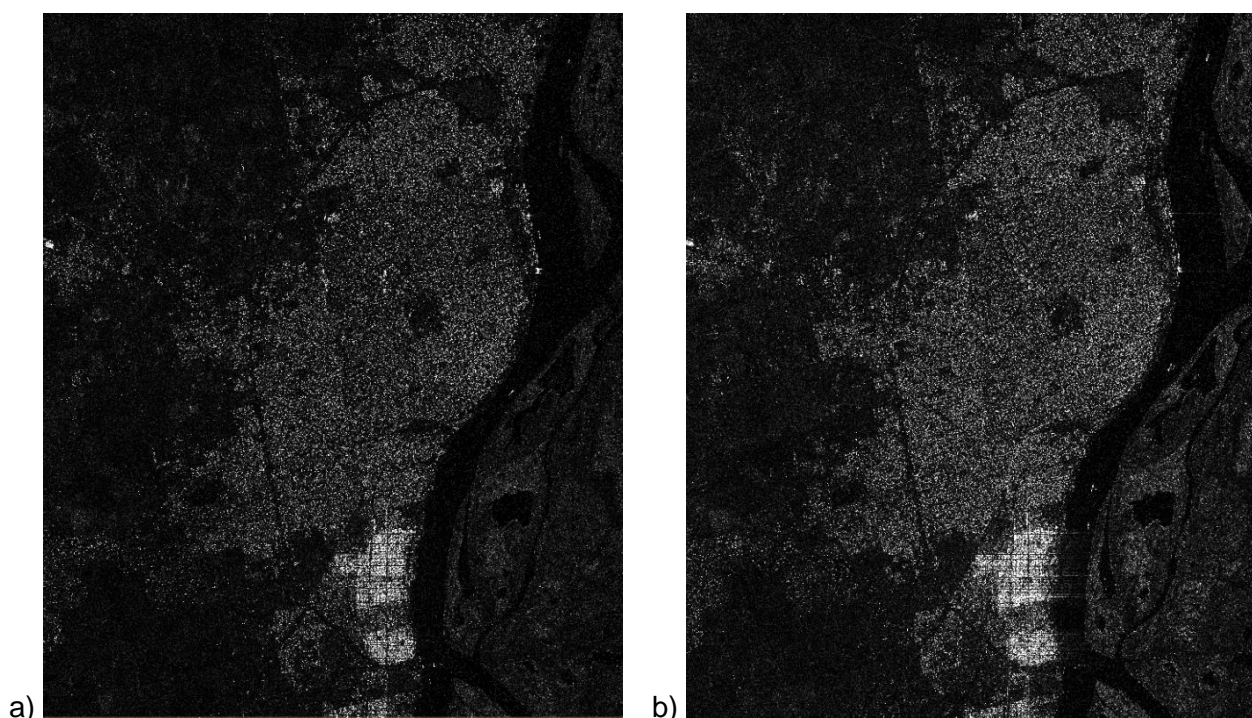


Figura 2. Subsets de imágenes COSMO-SkyMed, correspondientes a las fechas: a) 19 de junio de 2013; b) 27 de junio de 2013

Los subsets de las imágenes Radarsat-2 (Figura 3) seleccionadas son:

- RS2_OK70799_PK650897_DK581136_U10_20151121_224941_HH_SLC
- RS2_OK70799_PK650898_DK581137_U10_20151215_224939_HH_SLC

¹⁵ Provistas en el marco del Anuncio de Oportunidad AO-SAOCOM. Organizado por CONAE. PI: Cotlier, C. Proyecto N° 4 "Clasificación del Uso y Cobertura del suelo urbano de las Ciudades de Rosario, Gran Rosario, San Juan y Gran San Juan - Argentina, utilizando polarizaciones y bandas de plataformas SARAT/SAOCOM, Radarsat-2, COSMO SkyMed y PALSAR."

¹⁶ Provistas en el marco de la iniciativa Science and Operational Applications Research - Education International (SOAR-EI). Organizado por CCRS y MDA. PI: Cotlier, C. Proyecto "Horticulture Crop Yield and Urban Sprawl and Urban Fringe Shift with Radarsat-2 Images".

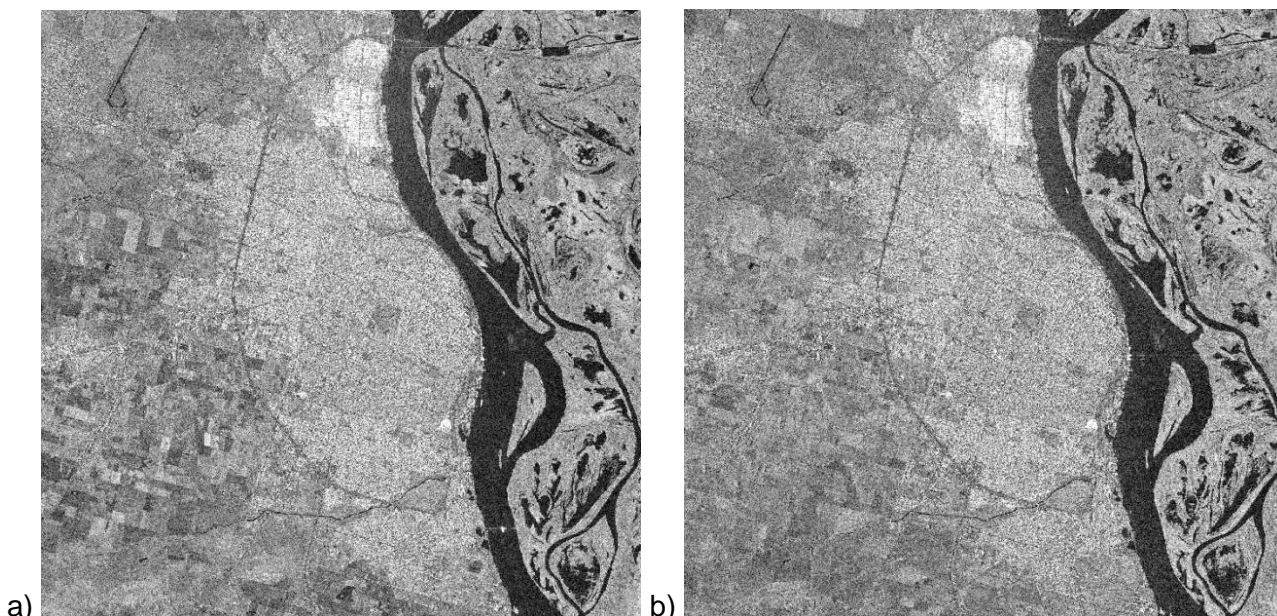


Figura 3. Subsets de las imágenes Radarsat-2, correspondientes a las fechas: a) 21 de noviembre de 2015 y b) 15 de diciembre de 2015

Con el objetivo de obtener los indicadores para el análisis de la huella urbana se utilizan tres bases cartográficas¹⁷ en formato Geographic Markup Language (.gml), sistema de referencia global WGS84, a saber:

- **Manzanas.** La componen polígonos que delimitan las manzanas catastrales. Observación: existen sectores en la periferia de la ciudad de Rosario, en los cuales no está definida la manzana en el Catastro municipal.
- **Parcelas#.** Compuesta por polígonos que delimitan las parcelas de las 21 secciones catastrales. Nota: en cada manzana quedan incluidas un número variable de parcelas; pero en el área periférica al casco céntrico existen sectores, en los cuales las parcelas no cuentan con una definición oficial catastral del número de manzana.
- **Distritos descentralizados.** Contiene los polígonos correspondientes a los límites de los distritos descentralizados de la ciudad de Rosario.

Para la comparación de los resultados obtenidos se utiliza:

- **Global Urban Footprint (GUF)¹⁸.** Imagen en formato raster con resolución de 12 metros, con valores 0/255 correspondientes a ausencia/presencia de la huella urbana (visibles en tonos de negro/blanco en la Figura 1), sistema de referencia global WGS84, obtenido a través del procesamiento de imágenes satelitales radar, años 2011-2013 (Esch *et al.*, 2011; 2017; 2018).
- **Aerofotomosaico de la ciudad de Rosario, año 2013.** Disponible a través del geoservicio WMS de la IDERosario¹⁹ (Figura 4).

¹⁷ Datos Abiertos de la Municipalidad de Rosario. Disponible en: <https://datos.rosario.gob.ar/>. Fecha de consulta: 23/05/18.

¹⁸ Dato facilitado por Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V. (DLR, Centro Aeroespacial Alemán).

¹⁹ IDERosario. Infraestructura de Datos Espaciales de Rosario. Servicio WMS. Disponible en: <https://www.rosario.gob.ar/wms/planobase>. Fecha de consulta: 26/06/2019.



Figura 4. Aerofotomosaico de la ciudad de Rosario, año 2013. Fuente: Infomapa IDERosario

Metodología

En la obtención de la huella urbana se sigue la metodología educativa sobre asentamientos urbanos propuesta por el EO-College²⁰, modificada para poder utilizar las imágenes COSMO-SkyMed y Radarsat-2.

La metodología modificada se inicia con la creación de los subsets del área de estudio de las imágenes COSMO-SkyMed y Radarsat-2. Luego, el proceso se divide en dos partes:

1. se corregistran los subsets y se estima la coherencia, denominada Coh;
2. se calibran los subsets, filtrado Gamma Map para reducción de speckle y pasaje a decibeles.

Posteriormente, se compilan todos los archivos en uno solo y se crea el promedio de los subsets calibrados, denominado Prom_dB. Se ortorectifica la compilación y se aplica el algoritmo de creación de la máscara de huella urbana, en el que se comparan Prom_dB y Coh con valores umbrales seleccionados p y c, respectivamente. Dichos valores umbrales se modifican respecto a los indicados en la metodología de referencia, para obtener un resultado que se adecue a las características de la ciudad de Rosario. Esta adaptación, se plantea en función de considerar la retrodispersión de los asentamientos europeos (donde fue aplicada inicialmente esta metodología) y las edificaciones presentes en nuestra área de estudio. La selección se realiza teniendo en cuenta el comportamiento que tienen las coberturas, según su respuesta en coherencia y retrodispersión, mencionadas en la Tabla 1.

²⁰ Curso Echoes in Space. EO-College. European Space Agency. Disponible en: <https://eo-college.org/courses/echoes-in-space/>. Fecha de consulta: 23/03/2018.

Tabla 1. Caracterización de coberturas según la coherencia y la retrodispersión

Comportamiento	Cobertura
Alta coherencia	Áreas urbanas y suelo desnudo
Baja coherencia	Decorrelación volumétrica de áreas forestadas
Alta retrodispersión por doble rebote o dispersión volumétrica	Áreas urbanas o forestadas
Baja retrodispersión por rebote simple	Vegetación o suelo desnudo

En la Figura 5 se presenta el diagrama de flujo, que sintetiza la metodología para la obtención de la huella urbana.

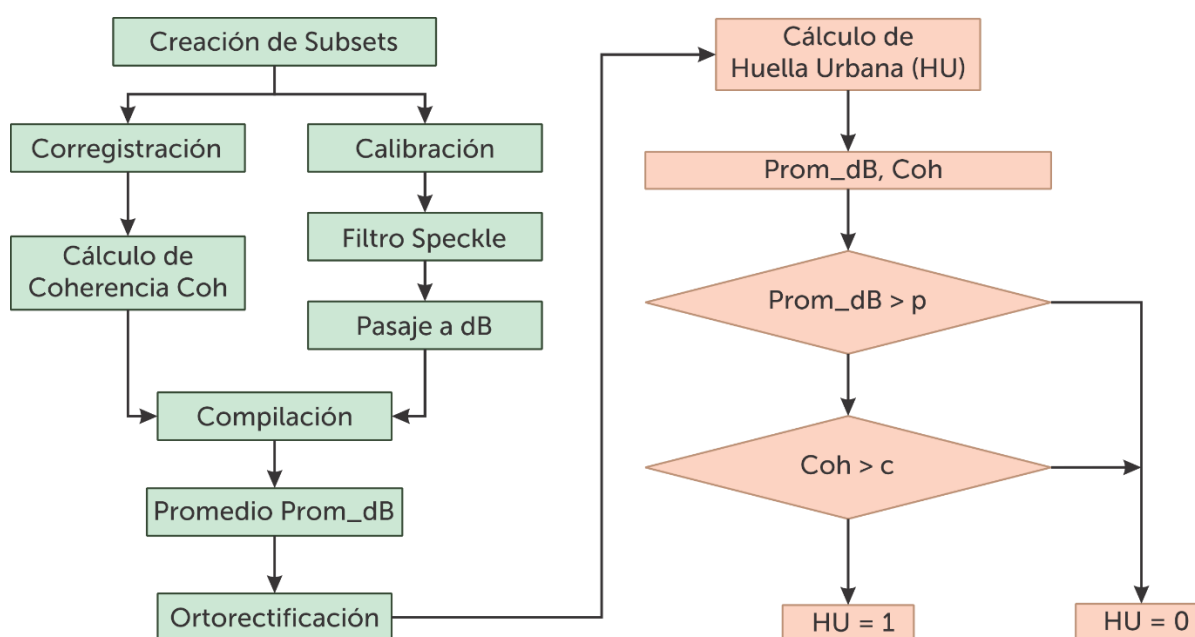


Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología

A la huella urbana resultante de aplicar la metodología modificada usando datos COSMO-SkyMed se la denomina HU; dada su temporalidad, se utiliza en la fase de validación.

En la obtención de la máscara de la huella urbana se utiliza el *software* libre Sentinels Application Platform²¹ (SNAP).

Validación

²¹ SNAP - ESA SeNtinel's Application Platform v8.0.8. Disponible en: <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>

El procedimiento de validación se aplica a la huella urbana obtenida a partir de datos COSMO-SkyMed; consta de dos etapas a realizar en un Sistema de Información Geográfica (SIG) (Figura 6) (Tazzioli, 2020; Balparda *et al.*, 2020):

- Análisis de HU en relación al producto GUF. Para ello se establece una unidad de análisis espacial que permite la cuantificación y relación de la superficie detectada por ambas huellas. A continuación, se define un índice que permite estimar la semejanza con GUF.
- Análisis exploratorio en sitios testigos. Consiste en relacionar las superficies de la huella urbana COSMO-SkyMed, GUF y lo edificado en planta (obtenido por digitalización del aerofotomosaico 2013, disponible en el Infomapa IDERosario). Los sitios testigos se seleccionan considerando diferentes tipos de construcciones en el área de estudio, tales como: iglesia, supermercado, fábrica, escuela, institución gubernamental, centro comercial, estación ferroviaria, vivienda, edificio y museo, entre otros. Asimismo, también se han seleccionado otros lugares donde la edificación es nula, como por ejemplo plazas y parques.

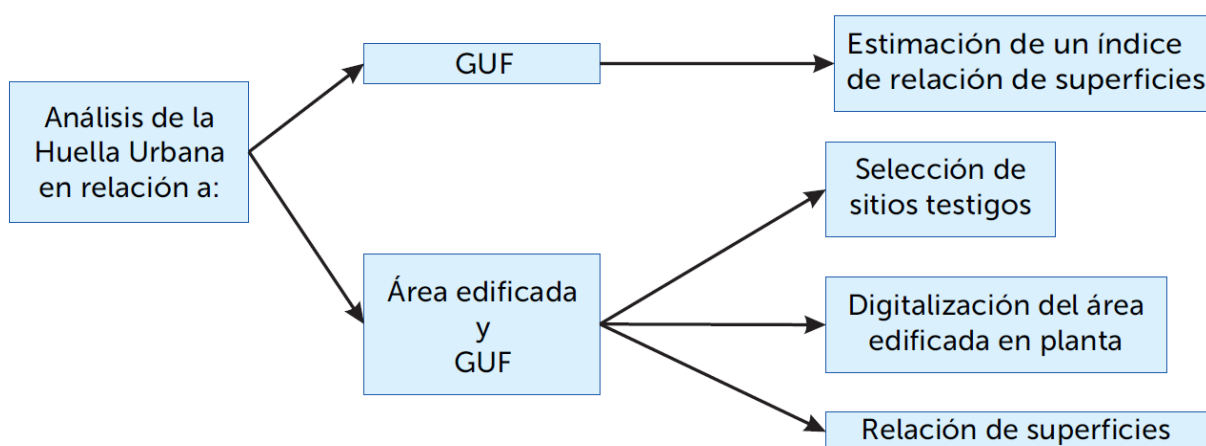


Figura 6. Procesamiento de validación

Procesamiento en un ambiente SIG

La etapa de procesamiento en un ambiente SIG comienza con la creación de un nuevo proyecto; donde se importan las capas vectoriales: manzanas, parcelas# y distritos descentralizados de la ciudad de Rosario, así como también las capas raster: GUF y la huella urbana COSMO-SkyMed (HU). El marco de referencia geodésico nacional a utilizar es POSGAR 94 faja 5 (EPSG 22185).

A fin de completar aquellos sectores de Rosario que no tienen definidas las manzanas oficiales, se combinan las capas manzanas y parcelas#, creando una capa llamada manzanas_modif, de modo tal de obtener una única unidad de análisis vectorial en toda el área de estudio.

Con el objetivo de trabajar con una única resolución espacial, se realiza el resampleo de la máscara GUF, pasando de 12 a 3 metros. Posteriormente, se recortan las huellas urbanas GUF resampleada y HU, utilizando los límites del distrito Rosario (creado a partir de los distritos descentralizados).

En la obtención de indicadores a partir de las máscaras GUF resampleada y HU, se realiza un conteo de los píxeles que tienen valor 255 y HU=1 (presencia de huella urbana), respectivamente; considerando como unidad de análisis los polígonos definidos en manzanas_modif. Luego, se calcula la superficie urbanizada multiplicando este indicador por el área de cada píxel (9 m²).

El procesamiento en un ambiente SIG se realiza con el *software* libre QGIS²².

²² QGIS, Sistema de Información Geográfica (SIG) de código libre para plataformas GNU/Linux, Mac OS, Microsoft Windows y Android. Disponible en: <https://www.qgis.org/es/site>.

Relación entre GUF resampleada y huella urbana HU

Con el fin de analizar la relación que existe entre la máscara resampleada GUF (Sup_{GUF}) y la huella urbana HU ($Sup_{HU_Pp_Cc}$), se plantea el cálculo de un índice que combina los valores de superficie urbanizada, siguiendo las especificaciones de la Figura 7. Los valores del índice varían entre [-1;1] según el grado de semejanza; donde en 0 se alcanza la mayor similitud y en los extremos del rango de variación, las mayores disimilitudes (Tazzioli, 2020; Balparda *et al.*, 2020).

$$\begin{array}{l}
 \text{Relación} \\
 \text{y} \\
 \text{Sup}_{GUF} \\
 \text{y} \\
 \text{Sup}_{HU_Pp_Cc}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 \frac{Sup_{GUF} - Sup_{HU_Pp_Cc}}{Sup_{GUF}}, Sup_{GUF} > Sup_{HU_Pp_Cc} \text{ y } Sup_{GUF} \neq 0 \\
 \frac{Sup_{GUF} - Sup_{HU_Pp_Cc}}{Sup_{HU_Pp_Cc}}, Sup_{GUF} < Sup_{HU_Pp_Cc} \text{ y } Sup_{HU_Pp_Cc} \neq 0 \\
 0, Sup_{GUF} = 0 \text{ y } Sup_{HU_Pp_Cc} = 0 \\
 0, Sup_{GUF} > 0 \text{ y } Sup_{HU_Pp_Cc} > 0 \text{ y } Sup_{GUF} = Sup_{HU_Pp_Cc}
 \end{array}
 \right.$$

Figura 7. Índice de la relación entre GUF resampleada y huella urbana HU

Digitalización del área edificada en planta

El procedimiento se inicia con la digitalización de la superficie edificada en planta a partir del aerofotomosaico del distrito Rosario (vuelo fotogramétrico del IGN, año 2013). Una nueva capa vectorial tipo polígono se crea, bajo la denominación Edificado; donde se incluyen los siguientes campos en la tabla de atributos: ID, nombre del lugar y superficie de lo edificado en planta.

La digitalización se realiza teniendo en cuenta el desplazamiento por perspectiva del área edificada en planta y la sombra presente en la imagen (Figura 8), con el propósito de atenuar el desplazamiento propio de la imagen y aleros que alteran las dimensiones de lo construido.

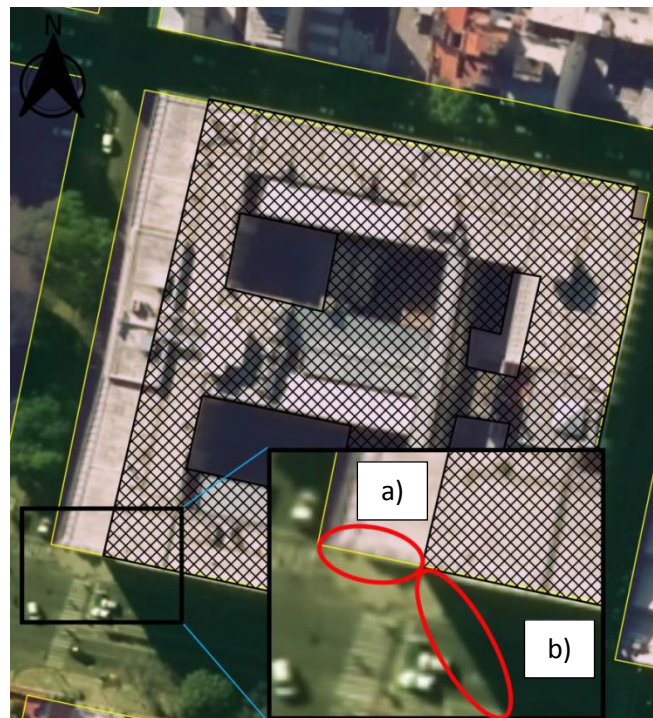


Figura 8. Digitalización de un sitio testigo: a) Visualización del desplazamiento por perspectiva y b) Influencia de la sombra

En la selección de los diferentes sitios testigos se consideran construcciones edilicias que permanecen invariantes en las fechas correspondientes a los distintos productos incluidos en el análisis y el trabajo de digitalización realizado en 2019.

Resultados

Huellas Urbanas

A partir del procesamiento interferométrico de los pares de imágenes COSMO-SkyMed, considerando valores de $p = -15$ y de $c = 0,5$, se obtuvo la huella urbana de la ciudad de Rosario, para el año 2013 (Figura 9.a). Con la misma metodología, pero considerando los pares Radarsat-2, con valores de $p = -10$ y $c = 0,5$, se identificó la huella urbana para el año 2015 (Figura 9.b). Al igual que con el producto GUF, los productos resultantes se visualizan con una representación gráfica de presencia/ausencia de huella urbana en tonos blanco/negro, respectivamente.

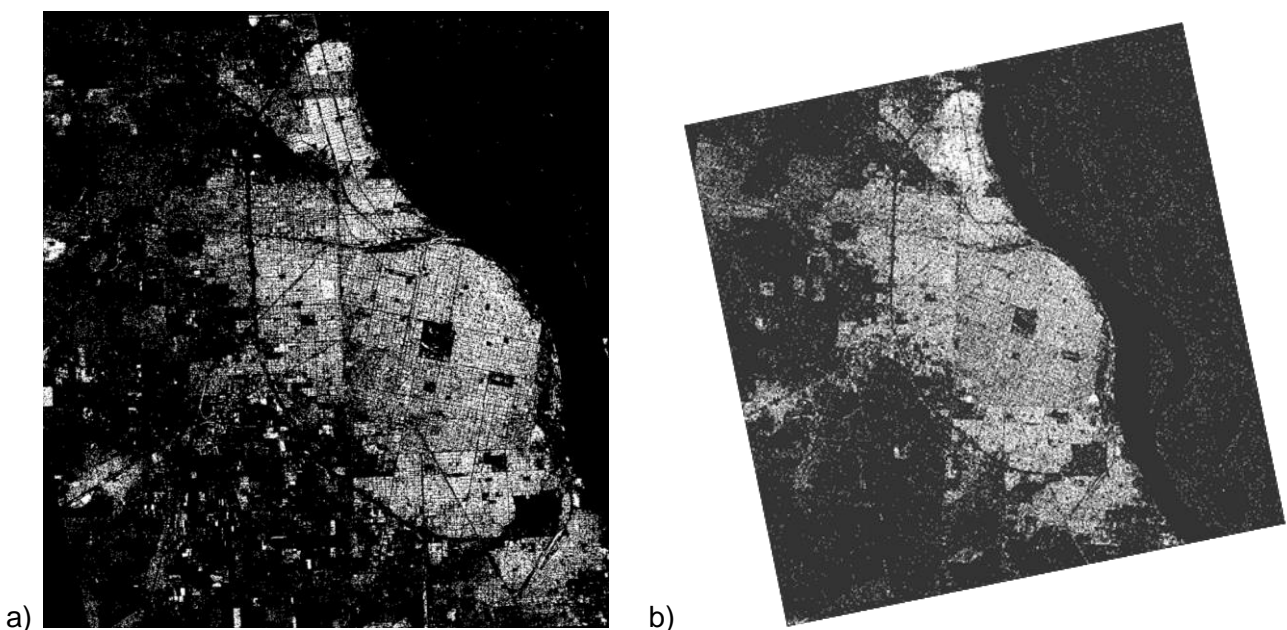


Figura 9. Huellas Urbanas: a) COSMO-SkyMed, año 2013 y b) Radarsat-2, año 2015

En la Figura 9, se observa una concordancia en el perfil de las huellas urbanas correspondiente a los años 2013 y 2015; dado, principalmente, por el entramado urbano y el contraste que se evidencia con aquellas zonas donde no hay edificaciones, tales como: las avenidas y bulevares, las vías del ferrocarril y los parques de la ciudad.

Índice de relación entre las huellas urbanas GUF resampleada y HU

Una vez finalizado el cálculo del índice que relaciona las superficies correspondientes a la huella urbana de GUF resampleada y la obtenida a partir de imágenes COSMO-SkyMed (HU), se procedió a realizar una cartografía que permitió visualizar las zonas similares y las disímiles (Figura 10).

Así, en la Figura 10, los polígonos de manzanas_modif en color blanco indican que la superficie cubierta por ambas huellas es igual o similar (valores del índice próximos a cero). En cambio, los polígonos en verde claro e intenso (valores positivos del índice), son indicativos de que GUF resampleada identificó una mayor superficie que el producto HU, es decir detección por exceso. Por último, los polígonos en los dos tonos de rojo, representan los valores negativos del índice,

evidenciando que HU detectó mayor superficie edificada que GUF resampleada, en este caso se menciona como detección por defecto.

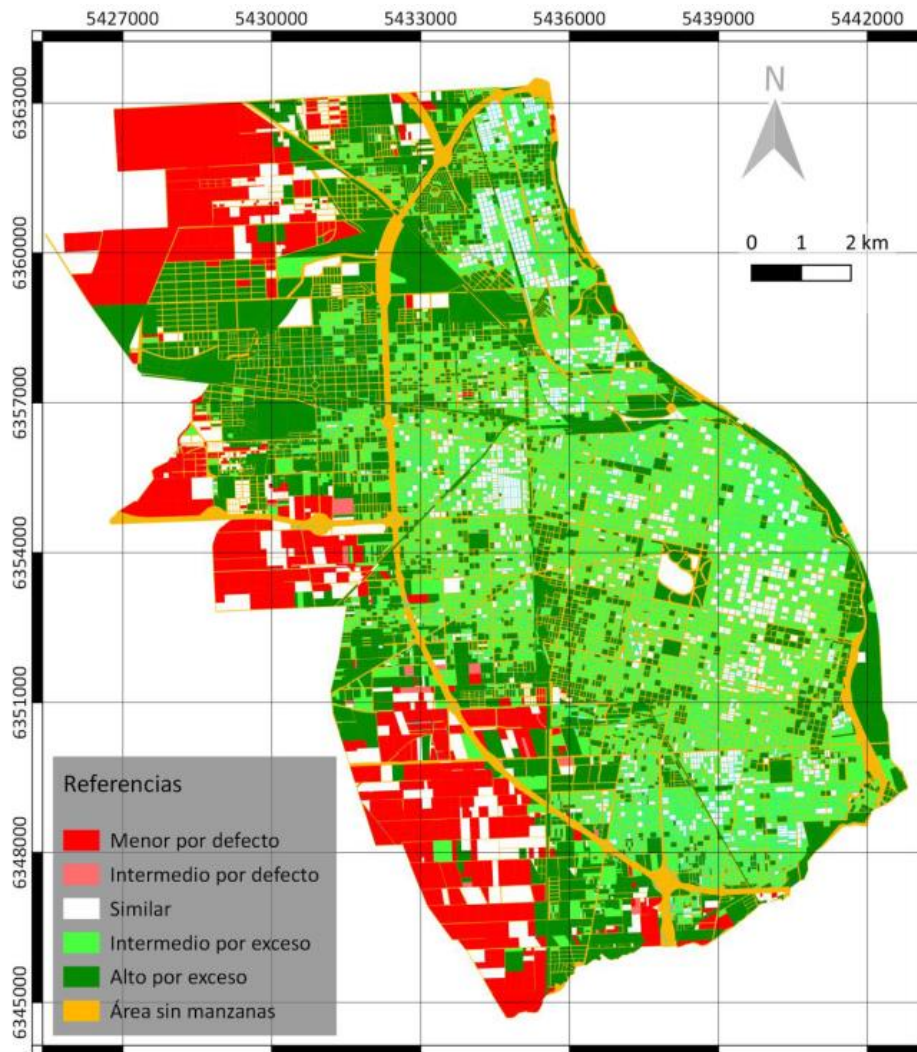


Figura 10. Índice de la relación entre la huella urbana GUF resampleada y HU

Análisis exploratorio en sitios testigos

Un total de 14 sitios testigos distribuidos en la ciudad de Rosario (Figura 11), se seleccionaron siguiendo los criterios pre-establecidos, con fines exploratorios.

Si bien, el proceso de digitalización de lo edificado en planta y su análisis, se realizó para todos los casos seleccionados (Tazzioli, 2020), en este capítulo, a modo de ejemplo, sólo se presenta el estudio de un sitio donde se encuentra emplazado un supermercado que abarca aproximadamente 2/3 del total de una manzana.

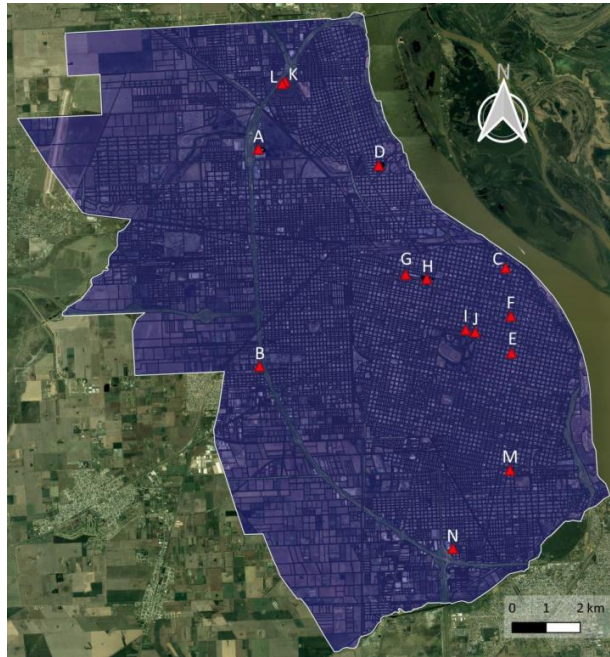


Figura 11. Ubicación de los sitios testigos seleccionados

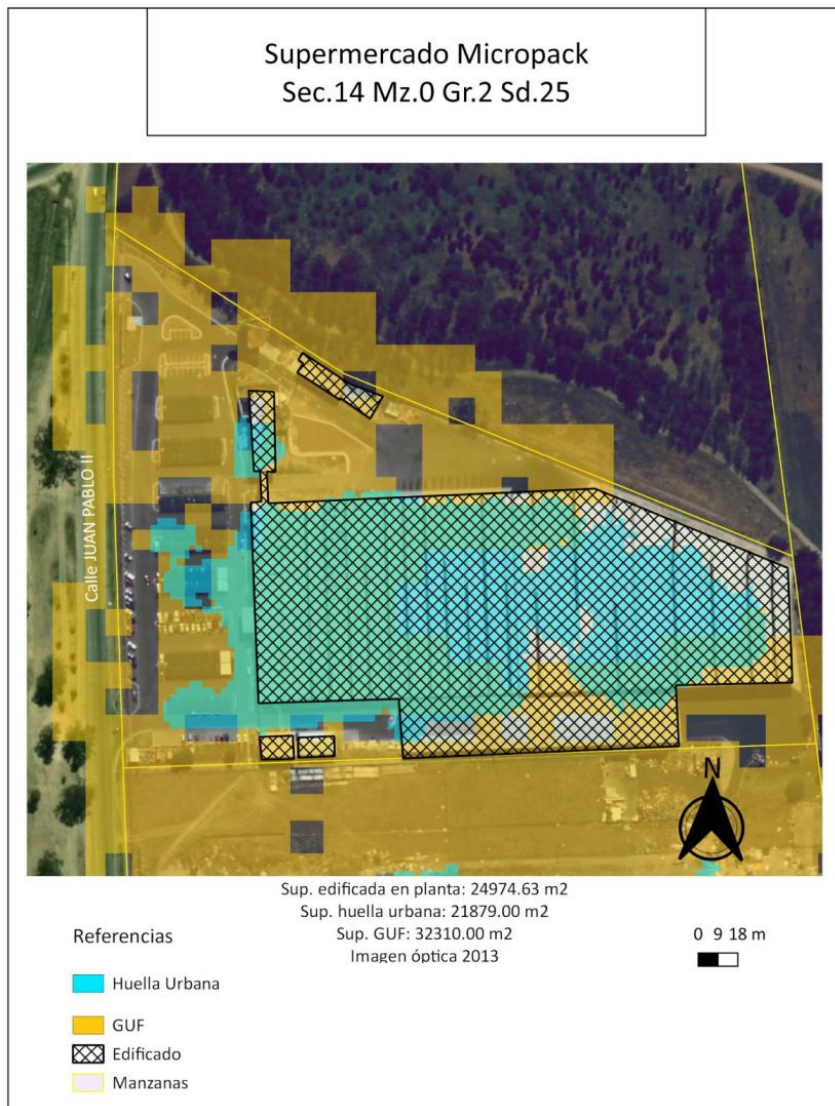


Figura 12. Ejemplo de sitio testigo. Sitio testigo A, tipo supermercado

En la Figura 12, se observa la manzana y sus alrededores donde se ubica el supermercado MicroPack (cito en Juan Pablo II y Av. Sorrento). A partir del aerofotomosaico se digitalizó el contorno de la superficie edificada que ocupa un total de 24974.63 m² (entramado cuadrangular). La superposición con las huellas urbanas de interés, permitió identificar que GUF resampleada detectó de manera importante por exceso (píxeles en color naranja) en todas las direcciones. En cambio, la HU, determinó en el área oeste por exceso, pero en menor medida y, además, en el área este y sur del supermercado detectó por defecto.

En los 12 sitios testigos con construcciones edilicias, se calcularon los valores de superficie correspondientes a: edificado en planta (ED), huella urbana GUF resampleada, huella urbana COSMO-SkyMed (HU) y la razón porcentual de ambas huellas en relación a lo edificado en planta. La nómina de los sitios testigos y los resultados de estos indicadores se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Sitios testigos edificados con sus respectivas superficies y relaciones porcentuales

Sitio	ED [m ²]	GUF[m ²]	HU [m ²]	(GUF-ED)/ED [%]	(HU-ED)/ED [%]
A) Supermercado Micropack	24974,63	32310,00	21879,00	29,37	-12,40
B) Fabaher S.A.	6097,06	12474,00	3564,00	104,59	-41,55
C) Escuela Técnica N°7	9270,22	14139,00	7560,00	52,52	-18,45
D) Portal Rosario Shopping	34738,41	36981,00	12726,00	6,46	-63,37
F) Escuela Normal Superior N°1 "Dr. Nicolás Avellaneda"	3686,27	14274,00	3807,00	287,22	3,28
H) Mercado del Patio – Mc Donald's	9115,37	40770,00	11097,00	347,27	21,74
I) Museo Municipal de Bellas Artes Juan B. Castagnino	1510,85	10062,00	1701,00	565,98	12,59
J) Tribunales Provinciales de Rosario	9454,77	12222,00	7812,00	29,27	-17,38
K) Natividad del Señor	1260,97	2970,00	18,00	135,53	-98,57
L) Monoblock Barrio Rucci	740,80	2889,00	972,00	289,99	31,21
M) Centro Municipal de Distrito Sur Rosa Ziperovich	3745,26	5868,00	2817,00	56,68	-24,79
N) Manzana con edificaciones unifamiliares	1962,77	3798,00	1449,00	93,50	-26,18

La huella urbana GUF resampleada identificó en promedio el 166,53% por exceso respecto a la superficie en planta digitalizada. En cambio, HU lo hace por exceso en cuatro casos, con un promedio de 17,20% y por defecto, en ocho casos con 37,83%. Tomando todos los casos de la

huella urbana HU de manera conjunta resulta en una predominancia de identificación por defecto del 19,49%.

De igual modo, la Tabla 3 contiene datos de superficie referidos a los sitios testigos correspondientes a espacios recreativos (plazas), considerando como referencia para el análisis la superficie de la manzana.

Tabla 3. Sitios testigos recreativos (plazas) con sus superficies y relaciones porcentuales

Lugar	MZ [m ²]	GUF [m ²]	HU [m ²]	GUF/MZ [%]	HU/MZ [%]
E) Plaza Libertad	13010,31	7965,00	0,00	61,22	0,00
G) Plaza Mariano Moreno	15166,53	6444,00	9,00	42,49	0,06

En este punto, queda en evidencia la génesis del producto GUF, donde se observó un porcentaje de huella urbana importante dentro de la manzana; a diferencia de la huella urbana HU que prácticamente no identifica construcciones.

Discusión

La metodología utilizada para la obtención de la Huella Urbana de la ciudad de Rosario, a partir de datos COSMO-SkyMed, difiere de la usada por GUF en aspectos tales como la técnica, el volumen de datos, la temporalidad y la resolución espacial. Si bien, ambas propuestas tienen como objetivo la detección de la huella urbana teniendo en cuenta las edificaciones, GUF termina seleccionando un área más amplia, que incluye superficies impermeables tales como calzadas, rutas, pistas de aterrizaje, y otras superficies de uso recreativo (superficies de asfalto, cemento, baldosas, cerámicas, entre otras). Esta situación se pone de manifiesto en el análisis exploratorio en sitios testigos, con una detección por exceso en todos los casos evaluados (respecto de lo edificado). A pesar de las diferencias, los resultados así obtenidos se podrían constituir en antecedentes o datos de entrada en futuros trabajos en esta línea de investigación.

Un punto a considerar es que, en el producto HU, se detectaron algunos píxeles falsos positivos correspondientes a parcelas rurales ubicadas en la periferia de la ciudad. Esta determinación se pudo realizar a través de la comparación del producto GUF resampleado y el aerofotomosaico disponible en el Infomapa IDERosario. Los falsos positivos se podrían llegar a descartar considerando otras fuentes de información, como por ejemplo máscaras de vegetación creadas con imágenes ópticas.

Algunos polígonos resultantes de la digitalización de lo edificado en planta, no se ubicaron por completo dentro de la unidad de análisis (polígonos de la capa manzanas_modif). Si bien los datos de las distintas fuentes utilizadas, cumplen con los estándares del Open Geospatial Consortium (OGC)²³, en ninguno de los casos se encontró una medida que indique la calidad o el error de los productos. Las diferencias encontradas se pueden deber al propósito para el cual las capas fueron editadas. Así, el aerofotomosaico se elaboró con fines de visualización, contando con una precisión distinta a la unidad de análisis contemplada en este estudio, resultante de la combinación de las capas manzanas y parcelas#, editadas estas últimas con fines catastrales.

En los sitios testigos, se identificaron en la huella urbana COSMO-SkyMed (HU) superficies por exceso y, en otros casos, por defecto. Esto indica la necesidad de realizar ajustes, como el agregado de imágenes de orientación orbital descendente. También, se observa un

²³ OGC: organización internacional sin fines de lucro constituida en 1994, con el objetivo de promover el desarrollo y uso de estándares y tecnologías abiertas en el campo de la información geográfica.

desplazamiento en dirección sur-oeste de la huella urbana obtenida respecto de la digitalización de lo edificado en planta. No obstante, la metodología utilizada en el presente trabajo permite obtener un resultado más cercano a la realidad de terreno, en relación a GUF y en concordancia a los objetivos planteados.

Debido a la temporalidad de las fuentes de datos con la que fue creado el producto GUF, se tomó la decisión de no realizar la comparación con la huella urbana obtenida a partir de imágenes Radarsat-2. Asimismo, para este segundo producto obtenido, queda pendiente realizar una comparación con lo edificado en planta, dado que aún no se encontró una fuente de datos de resolución espacial y temporal similar, tal como la que se utilizó en la metodología de análisis exploratorio implementada con la huella urbana COSMO-SkyMed.

Conclusiones

La metodología aplicada, adaptada de la propuesta educativa del EO-College, permitió la obtención de la huella urbana para la ciudad de Rosario, años 2013 y 2015, utilizando imágenes radar de apertura sintética de alta resolución de los satélites COSMO-SkyMed y Radarsat-2. Cabe mencionar que, un punto importante dentro de la metodología es la utilización de técnicas interferométricas que posibilitaron la caracterización de la cobertura y la posterior identificación de la huella urbana.

En el análisis cuantitativo de la huella urbana obtenida a partir de imágenes COSMO-SkyMed, en relación con el producto GUF, se encontró una mayor concordancia de los productos en el casco céntrico de la ciudad de Rosario, delimitado por el Río Paraná, la avenida Carlos Pellegrini y el bulevar Nicasio Oroño, así como también en otros emplazamientos urbanos establecidos de larga data en los distritos descentralizados Norte, Noroeste y Sur. Mientras que, en la zona periférica de la ciudad de Rosario (al oeste de la avenida de circunvalación 25 de mayo), se presentaron las mayores discordancias en ambos sentidos, es decir en determinados sectores una mayor detección de GUF y en otros, una mayor identificación a través del producto derivado de COSMO-SkyMed.

El análisis de sitios testigos permitió concluir que, en todos los casos, la huella urbana GUF resampleada clasificó por exceso en relación a la digitalización sobre una aerofotografía de lo edificado en planta. En cambio, el producto de huella urbana a partir de COSMO-SkyMed identificó por exceso y defecto con un comportamiento más errático; en algunos casos influenciado por el desplazamiento que se visualiza cuando se analiza cada caso en particular, y en otros, debido a las características propias de cada construcción.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo, más precisamente en la fase de validación, ponen de manifiesto las oportunidades de mejora y dan paso al planteo de nuevos trabajos en esta línea de investigación. Se pueden considerar otros conjuntos de datos (sensores remotos y fechas diferentes), introducir modificaciones en la metodología, así como también ampliar el proceso de validación. En esta última etapa, se podrían incorporar nuevos sitios testigos, trabajo de campo y otras fuentes de datos, tales como las disponibles en los organismos gubernamentales vinculados al catastro de la Municipalidad de Rosario o de la Provincia de Santa Fe.

Si bien, son sumamente importantes los proyectos de alcance global, tales como GUF, GHSL y HBASE, llevados a cabo por instituciones altamente reconocidas a nivel internacional, también resultan significativas las investigaciones del orden y alcance local. Esta dicotomía permite enriquecer la temática de interés e incluir puntos relevantes, tales como el conocimiento del área de estudio, el acceso a datos puntuales y la cercanía a las autoridades gubernamentales municipales encargadas de la gestión. De este modo, se habilita el intercambio de saberes, datos, técnicas y productos validados, con miras a contribuir en las etapas de planificación urbana, en pos de alcanzar un desarrollo urbanístico más inclusivo y sostenible. Se espera que todos estos esfuerzos, se constituyan en mayor o menor medida en aportes, que permitan acercarnos cada vez más a la concreción de los objetivos y metas planteados en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.

Referencias bibliográficas

- Agencia Espacial Alemana - DLR. (2018). *DLR Portal*. Disponible en: http://www.dlr.de/eoc/en/desktopdefault.aspx/tabid-9628/16557_read-40454/. Fecha de consulta: 24/05/2018.
- Balparda, L.; del Valle, H.; López, D.; Torralba, M.; Aquili, V.; Peña, H.; Vicioso, B.; Delorenzi, D.; Tazzioli, F.; Ciattaglia, B.; Solis, T. (2020). Identificación de la Huella Urbana de la ciudad de Rosario (Santa Fe, Argentina), utilizando imágenes satelitales radar. Año 2013-2020. [Presentación de póster]. XIV Jornadas de Ciencia , Tecnología e Innovación 2020. Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Argentina. Disponible en: <https://jornadasctei.unr.edu.ar/12b-balparda/>
- Chuvieco E (2010). Teledetección ambiental. Barcelona, España: Editorial Ariel.
- Esch, T., Heldens, W., Hirner, A., Keil, M., Marconcini, M., Roth, A., Zeidler, J., Dech, S., Strano, E. (2017): Breaking new ground in mapping human settlements from space – The Global Urban Footprint. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 134 (2017) 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.012>.
- Esch, T., Schenk, A., Ullmann, T., Thiel, M., Roth, A., Dech, S. (2011): Characterization of Land Cover Types in TerraSAR-X Images by Combined Analysis of Speckle Statistics and Intensity Information. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume 49, Issue 6, pp. 1911- 1925. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2091644>.
- Esch, T.; Bachofer, F.; Heldens, W.; Hirner, A.; Marconcini, M.; Palacios-Lopez, D.; Roth, A.; Üreyen, S.; Zeidler, J.; Dech, S., *et al.* (2018): Where we live—a summary of the achievements and planned evolution of the global urban footprint. *Remote Sensing* 2018, 10. <http://dx.doi.org/10.3390/rs10060895>.
- European Commission. *Copernicus Open Access Hub*. Disponible en: [https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products\('de108251-9aed-463e-91dc1c5b8d8109d0'\)/\\$value](https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products('de108251-9aed-463e-91dc1c5b8d8109d0')/$value). Fecha de consulta: 4/05/2018.
- European Commission. *Copernicus Open Access Hub*. Disponible en: [https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products\('c2b1cf90-5746-447f-80aa60122909723e'\)/\\$value](https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products('c2b1cf90-5746-447f-80aa60122909723e')/$value). Fecha de consulta: 4/05/2018.
- Objetivos de Desarrollo Sostenible. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. Disponible en: <https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html> Fecha de consulta: 10/03/2021.
- Tazzioli, F. (2020). Huella urbana de la ciudad de Rosario - Santa Fe, Argentina - Año 2013. Trabajo Final. Ingeniería en Agrimensura. Escuela de Agrimensura. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.
- Voltersen, M.; Esch, T.; Berger, C.; Eckardt, R. (2017). Urban footprints. Module 3105: Urban Areas. SAREDU. Disponible en: https://eo-college.org/resource/urban_footprints/

IMPLEMENTACIÓN DE ÍNDICES DE DÉFICIT HÍDRICO PARA EL MONITOREO DE SEQUÍAS EN EL SALVADOR CON DIFERENTES FUENTES DE DATOS

Osmin Cordova ¹; Virginia Venturini ^{2,3}; Leandro Sgroi²; Elisabet Walker^{2,3}

¹Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, San Salvador, El Salvador.

²Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina.

vventurini@fich.unl.edu.ar

Resumen

La sequía es un fenómeno que genera grandes pérdidas económicas para la sociedad y se están observando más frecuentemente debido al cambio climático. En Centroamérica este fenómeno se relaciona con la distribución anómala de la precipitación (P) en un período corto, dentro de la estación lluviosa. En El Salvador, el fenómeno denominado “canícula”, está asociado a una disminución importante de la P cuya duración es de pocos días, por lo que es difícil de monitorearlo sólo con la P, como se hace actualmente. En el presente se han desarrollado muchos indicadores para caracterizar las sequías; en particular, se destacan la precipitación estandarizada y los índices de condición propuestos por Kogan (Kogan, 1995), que admiten diversas fuentes de información. En este trabajo se aplicaron cuatro indicadores de déficit hídrico - la P estandarizada, la evapotranspiración (ET), el índice de condición de la humedad del suelo (HSCI) y el índice de condición de la vegetación (VCI)- para evaluar las sequías en El Salvador. Para ello se utilizó información satelital, base de datos climáticos y la interface de programación disponible en la plataforma de Google Earth Engine. Se analizó el comportamiento de los indicadores durante el periodo 2015-2019 y en particular, el año extremadamente seco 2015, para determinar la capacidad de monitoreo de los indicadores utilizados. Los resultados obtenidos sugieren que el conjunto de índices propuesto permite monitorear la sequía, identificando el inicio, el impacto y la extensión territorial en El Salvador.

Palabras clave: déficit hídrico, monitoreo, teledetección, Google Earth Engine, estrés hídrico

Introducción

Las sequías se destacan por ser uno de los desastres naturales que afecta a la población mundial y produce grandes pérdidas económicas para la sociedad (Mo, 2008). Sequías más largas e

intensas se han observado desde los 70's en regiones tropicales y subtropicales, debidas al cambio climático (Solomon, Manning, Marquis y Qin, 2007). En Centroamérica, la sequía se relaciona con la distribución anómala de la precipitación (P) dentro del periodo lluvioso y está estrechamente relacionada con el fenómeno El Niño - Oscilación Sur (ENOS), (Van der Zee Arias, Van der Zee, Meyrat, Poveda y Picado, 2012). En El Salvador, estos eventos secos son recurrentes en los meses de julio y agosto, cuando se registra una importante disminución de la P durante 10-15 días, fenómeno denominado "canícula". Por sus características, la sequía afecta en mayor grado a la agricultura y la ganadería y en menor grado al sistema de recarga de las fuentes de agua superficiales y subsuperficiales. Por lo tanto, es posible decir que, en dicho país, la sequía meteorológica es lo suficientemente acentuada como para transformarse en una sequía agrícola, pero su duración no es suficiente como para convertirse en una sequía hidrológica (Van der Zee Arias et al., 2012).

Históricamente, El Salvador ha sufrido diferentes eventos de sequía con mayor o menor grado de severidad, de los cuales se destaca la severidad de los eventos registrados en los años 2015 y 2018, (<http://cidoc.marn.gob.sv/por-categoria/?cat=Informe-sequia>). En dicho país, habitualmente estos eventos se monitorean mediante la identificación de los días secos consecutivos observados en los registros de la red de estaciones pluviométricas, mantenidas por la Dirección del Observatorio de Amenazas de El Salvador (DGOA), caracterizando la sequía como débil, moderada o fuerte, según el total de días contabilizados con menos de 1 mm de P (Kattan et al., 2017). En la actualidad no se dispone de un sistema de monitoreo que use variables derivadas de productos satelitales, con diferentes resoluciones espaciales y a tiempo cuasi-real.

En los últimos años se han desarrollado diferentes metodologías para monitorear sequías utilizando productos satelitales (García-Haro et al., 2014; Girolimetto y Venturini, 2013; Mishra, Vu, Veettil y Entekhabi, 2017). Muchos estudios se han basado en los llamados "índices de condición" derivados de información satelital (Kogan, 1995; Zhang, Jiao, Zhang, Huang, y Tong, 2017) o en variaciones de ellos (Du et al., 2013; Zhou et al., 2012). Estos tipos de índices consisten en la normalización de la variable usando los valores mínimos y máximos absolutos de la serie temporal de la variable en cada píxel, de forma tal que su variación queda limitada al intervalo [0,1], (Zhang et al., 2017).

En las últimas tres décadas, se han propuesto una gran variedad de índices con información satelital, los que han sido utilizados con gran éxito (Holzman, Carmona, Rivas, y Niclòs, 2018; Kogan, 1995; Moran, Clarke, Inoue y Vidal, 1994; Vicente-Serrano, Beguería y López-Moreno, 2010; Walker y Venturini, 2019; entre otros). En particular, el índice de condición para la vegetación derivados del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), como el Índice de Condición de Vegetación, VCI (Kogan, 1990); para la temperatura de la superficie (Ts), como el Índice de Condición de Temperatura, TCI (Kogan, 1995); y para la humedad del suelo (HS), por ejemplo, el Índice de Condición de Humedad del suelo, HSCI (Kogan, 1995).

Paralelamente, se han desarrollado indicadores que utilizan el estrés hídrico (EH) en el monitoreo de eventos extremos secos (Fensholt y Sandholt, 2003; Girolimetto y Venturini, 2014; Holzman et al., 2018; Moran et al., 1994). Muchos de estos índices, se formulan combinando un índice de vegetación con observaciones de la Ts, asumiendo que esta última variable resume el estado energético de la superficie. Los modelos de EH tienen una estrecha relación con el proceso de evapotranspiración real (ET), por lo que, en los últimos años, se ha puesto especial énfasis en la incorporación de ET en el monitoreo de sequías. Por ejemplo, los índices desarrollados por Vicente-Serrano et al. (2010), Kim y Rhee (2016) y Chang, Xu, Starr y Paw (2018); los cuales en general, se evaluaron con información derivada de modelos hidrológicos y bases de datos climáticas globales. Se destaca que en la práctica se considera que la aplicación de un solo indicador no es suficiente para comprender la dinámica de la sequía en diferentes condiciones ambientales y climáticas (Sánchez, González-Zamora, Martínez-Fernández, Piles, y Pablos, 2018).

El advenimiento de Google Earth Engine (GEE), una plataforma potente y novedosa establecida en la nube, proporciona un entorno en línea único para acceder y procesar datos globales. GEE permite realizar análisis de datos climáticos y ambientales a escala global y local, con el poder de seleccionar y procesar un gran número de datos en muy poco tiempo (Gorelick et al., 2017). La base de datos de GEE incluye un amplio repositorio de imágenes satelitales, datos geofísicos y

climáticos para abordar una variedad de problemas de alto impacto social, incluidas las sequías (Gorelick et al., 2017).

En este trabajo se propone aplicar los índices de P, HSCI, VCI y ET, a fin de analizar su potencial uso en el monitoreo de la canícula en El Salvador. Asimismo, se aprovecharán las ventajas que proporciona GEE para generar información de calidad, con diferentes resoluciones espacio-temporales, útil en la gestión del déficit hídrico y así colaborar con la reducción de los impactos negativos de la canícula.

Metodología

Para monitorear la canícula en El Salvador se calcularán los índices de condición VCI y HSCI propuestos por Kogan (Kogan, 1990, 1995). Además, se aplicará el modelo de Walker, García, Venturini y Carrasco (2019) para derivar la ET.

1 Índices de condición

El índice VCI relaciona los valores actuales de NDVI de cada píxel de una imagen de una región, con los valores de NDVI mínimos y máximos históricos registrados (Kogan, 1990). Su expresión es la siguiente:

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (1)$$

Donde NDVI, $NDVI_{min}$ y $NDVI_{max}$ son los valores de NDVI medios mensuales, mínimos y máximos históricos del píxel donde se calcula el VCI, respectivamente.

Este índice separa la variabilidad del NDVI asociada a los efectos climáticos de corto plazo, de las fluctuaciones de los cambios a largo plazo propios del ecosistema (Kogan, 1990, 1995). Por lo tanto, mientras el NDVI muestra la dinámica estacional de la vegetación, el VCI varía en el rango 0-1 (déficit hídrico - exceso hídrico), reflejando cambios relativos en la vegetación con relación a las condiciones extremas registradas hasta el momento (Kogan, 1995).

La metodología propuesta para la evaluación de la condición de HS se plantea de manera similar al VCI (Kogan, 1990). El índice HSCI es el valor actual de HS, normalizado a partir de los valores máximos y mínimos históricos de HS en cada uno de los píxeles, estableciéndose de la siguiente manera:

$$HSCI = \frac{HS - HS_{min}}{HS_{max} - HS_{min}} \quad (2)$$

donde HS, son los valores medios de humedad del suelo del mes, HS_{min} y HS_{max} son mínimo y máximo históricos registrados, respectivamente para cada píxel analizado.

2 Modelo de ET

El modelo ET_{wv} publicado por Walker y otros (Walker et al., 2019) consiste en una mejora de la metodología propuesta por Venturini y otros (Venturini, Islam y Rodriguez, 2008). En efecto, los autores modificaron la estimación de la evapotranspiración relativa (F), definida como la relación entre la ET y la evapotranspiración potencial. La parametrización de F propuesta por Venturini y colaboradores requería la estimación de la tensión de vapor de agua real de la superficie (e_s), que

es clave para el modelo y difícil de obtener. Walker y otros (2019) propusieron estimar e_s con información de textura de la superficie y HS. En consecuencia, la relación entre HS y la humedad de la superficie en saturación (HS_{sat}) reemplazó la formulación de F original de Venturini y otros (2008), representando el proceso físico generador de la ET (para más detalles, ver Walker et al., 2019). La ecuación para estimar ET, denominada ET_{wv}, es la siguiente:

$$ET_{wv} = \alpha \left(\frac{\frac{HS}{HS_{sat}} \Delta}{\frac{HS}{HS_{sat}} \Delta + \gamma} \right) (R_n - G) \left(\frac{1}{L \cdot \rho} \right) \quad (3)$$

donde α es el parámetro de Priestley y Taylor (Priestley y Taylor, 1972) típicamente igual a 1,26 (adimensional), HS es el contenido de humedad del suelo, HS_{sat} es el contenido de agua de saturación del suelo, R_n es la radiación neta (MJ/m²), G es el flujo de calor de la superficie del suelo (MJ/m²), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación (kPa/°C), γ es la constante psicrométrica (kPa/°C), L es el calor latente de vaporización (MJ/Kg) y ρ es la densidad del agua (Kg/m³).

Área de estudio y datos

1. Área de estudio

La República de El Salvador (Figura 1), con una extensión territorial de 21,041 km², posee un relieve irregular producto de la alta actividad tectónica y volcánica, (Kattan et al., 2017). Esta actividad, junto al clima húmedo, se revela en los suelos de la región, los que básicamente pueden agruparse en Mollicos, Andosoles Úmbricos, Andosoles Vítricos, Regosoles Éutricos y Phaeozems Lúvicos (FAO, 1974). Los granos básicos como Maíz, Frijol, Arroz y Sorgo son los cultivos dominantes en el país, ocupando aproximadamente 381942 hectáreas. Dichos cultivos se caracterizan por ser muy sensibles a los cambios de humedad en el suelo (Dada y Sevilla, 2009).

El clima es típico de zonas tropicales y ofrece condiciones térmicas similares durante todo el año. La temperatura media anual es de 24,8 °C, presentándose la temperatura media más baja en los meses de diciembre (23,8 °C) y enero (23,9 °C), mientras que el mes más cálido es abril (32,0 °C). El régimen de lluvias en El Salvador se caracteriza por estar dividido en dos periodos, uno con ausencia de P durante los meses de noviembre a abril y otro en donde se concentran las P en los meses de mayo a octubre. En este último período, la P presenta una distribución temporal bimodal, con un pico principal en el mes de septiembre (máximo cercano a los 350 mm) y uno secundario en el mes de junio (325 mm aproximadamente), de acuerdo con la serie pluviométrica 1981-2010. Según el Informe Nacional del Estado de los Riesgos y Vulnerabilidades publicado en 2017 por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, el promedio anual de P es de 1863 mm a nivel nacional (1981-2010). El 85% del total de la lluvia proviene de sistemas convectivos de corta duración y solo el 15% se compone de P continuas de larga duración, originadas por la cercanía con la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) durante los meses de junio a septiembre e incluso octubre y noviembre en algunas ocasiones (Kattan et al., 2017).

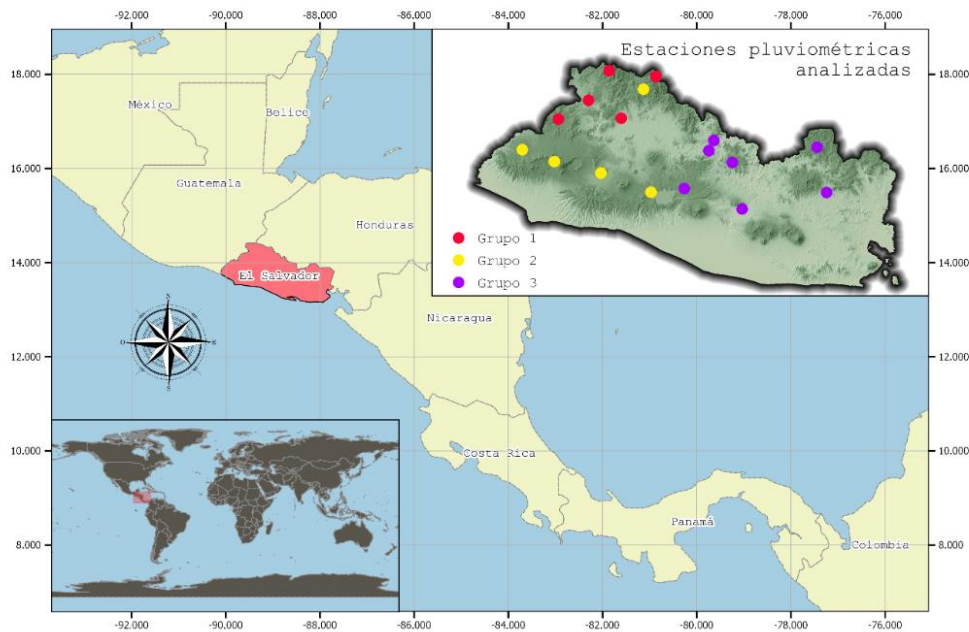


Figura 1: Ubicación de las estaciones meteorológicas en el mapa del relieve de El Salvador y su ubicación en Centro América y el mundo.

2. Datos

Los datos satelitales y climáticos utilizados para este trabajo están disponibles en el catálogo de GEE, mientras que los datos de P registrados por las estaciones pluviométricas fueron provistos por la DGOA. Además, se utilizó el mapa de clasificación de textura propuesto por Walker y Venturini (2019) para obtener los valores de HSsat correspondientes a El Salvador (https://code.earthengine.google.com/?asset=users/venturv/mapa_SMSat_025grados). Durante el período de estudio, 04/2015 – 12/2019, se analizaron dos años en particular; uno marcadamente seco (2015) y un año normal (2016).

A continuación, se presenta una breve descripción de las bases de datos utilizadas y de la información extraída de cada una de ellas.

2.1. Bases de datos globales disponibles en GEE

Los datos de P, NDVI, HS, radiación neta de onda corta (RNoc), radiación neta de onda larga (RNol), flujo de calor del suelo (G) y temperatura del aire (Ta) se extrajeron de diferentes bases de datos disponibles en el catálogo de GEE.

Los datos de P fueron obtenidos de la misión Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Esta es una misión conjunta entre la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) diseñada para monitorear y estudiar la lluvia tropical. El producto utilizado aquí, TRMM 3B43, fusiona datos de microondas de múltiples satélites, cada uno calibrado de forma intermitente al instrumento de TRMM. Este producto provee valores mensuales a una resolución espacial de 0,25° (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog>).

Los datos de NDVI utilizados provinieron del producto MOD13Q1 de la misión EOS-Terra, en su versión 6. Este producto es generado con información del sensor MODIS con una resolución temporal de 16 días y una resolución espacial de 250 metros. Las imágenes del índice NDVI, están conformadas con los píxeles de las imágenes de los 16 días antecedentes, con baja cobertura de nubes, bajo ángulo de visión y los valores más altos de NDVI (Didan, Munoz, Solano y Huete, 2015). La información está disponible desde el año 2000 hasta la actualidad.

Los datos de HS fueron tomados de la base de datos de la NASA y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés). Esta base de datos de GEE, que se denomina NASA-USDA-SMAP Global Soil Moisture Data (de ahora en más NASA-USDA), provee información desde el 2015 con una resolución espacial de 0,25°. Este producto integra la HS diaria derivada de la misión Soil Moisture Active Pasive (SMAP) en el modelo de dos capas de Palmer del USDA, (Mladenova et al., 2019).

Los datos de RNoc, RNol, G y Ta fueron obtenidos de la base de datos climática Global Land Data Assimilation System version 2.1 (GLDAS). Esta base de datos proporciona, desde el año 2000, información cada tres horas a escala global con una resolución espacial de 0,25° (Rodell et al., 2004).

Todas las bases de datos utilizadas aquí se encuentran disponibles de manera gratuita y pueden ser operadas desde la plataforma de GEE (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/>).

2.2. Observaciones Pluviométricas de estaciones meteorológicas

Se utilizaron datos de P observada de 17 estaciones pluviométricas distribuidas en todo El Salvador, mantenidas por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (ver Figura 1). Los datos están disponibles desde el año 1970 hasta la actualidad y son distribuidos de manera gratuita.

En este trabajo, las estaciones fueron agrupadas en tres grupos según la región donde se encuentran y en función de la distribución regional de la P. El nombre de cada estación, su elevación, coordenadas geográficas (latitud y longitud) y grupo al que se la asoció, se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Nombre de cada estación utilizada, elevación, coordenadas geográficas (latitud y longitud) y grupo.

Estación	Elevación (m)	Latitud (°)	Longitud (°)	Grupo
A15	485	14.228	-89.478	1
A18	1770	13.875	-89.645	1
A27	700	14.120	-89.651	1
A31	1851	14.398	-89.360	1
B1	190	13.996	-88.756	3
B6	650	13.870	-88.650	3
B10	600	13.938	-88.785	3
C9	880	13.720	-88.926	3
G3	320	14.125	-89.290	1
G4	1000	14.291	-89.161	2
G13	1960	14.365	-89.090	1
L27	680	13.595	-89.481	2
S10	615	13.698	-89.118	2
T6	15	13.573	-89.833	2
V9	20	13.601	-88.593	3
Z2	250	13.696	-88.106	3
Z3	1225	13.958	-88.161	3

Resultados

A fin de realizar un análisis espacio-temporal de los indicadores VCI, HSCI, P y ET_{wv} , se calcularon los valores medios mensuales de las variables involucradas, para los meses comprendidos en el periodo en estudio. Para esto, se promediaron los valores disponibles en el mes. En el caso de los datos climáticos de GLDAS, se promediaron los 240-248 valores disponibles en un mes, en cada nodo y lo mismo se hizo con los 30-31 valores diarios de P observados en las estaciones pluviométricas tradicionales. Los datos de P provistos por TRMM son mensuales, por lo que no fue necesario pre-procesarlos. Por otra parte, se generaron las imágenes de los valores mínimos y máximos históricos de cada variable, para poder calcular los índices VCI y HSCI. Con los valores medios mensuales de cada variable se calcularon los índices descritos en la sección 2. A continuación, se presentan los resultados obtenidos analizados según su variabilidad temporal y espacial.

1. Análisis temporal

A fin de analizar la evolución temporal de los indicadores, los mismos se calcularon con información disponible en GEE. El indicador VCI (Ecuación 1) se calculó a partir de los valores medios mensuales de NDVI. La ET_{wv} se estimó con valores medios mensuales de las bases de datos GLDAS, NASA-USDA y la ecuación 3. El indicador HSCI (Ecuación 2) se estimó con la HS que proporciona la base de datos NASA-USDA. La evolución de la P se evaluó con datos medios mensuales observados de 17 estaciones distribuidas en todo El Salvador, como se describió en la subsección 3.2.2.

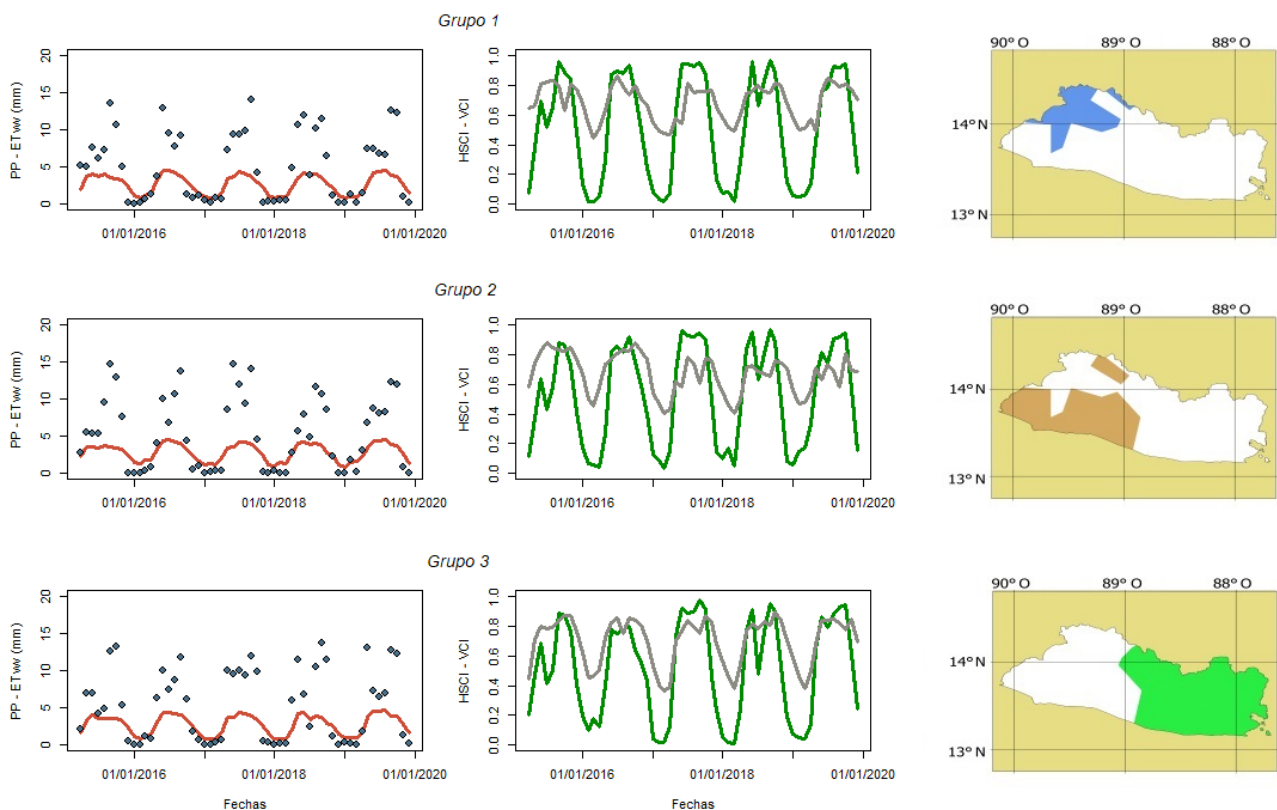


Figura 2: P observada (rombos azules), ET_{wv} (línea roja), VCI (línea gris) y HSCI (línea verde) medio mensual para las tres regiones de El Salvador en el período 04/2015-12/2019.

En la Figura 2 se presentan los valores medios mensuales de todas las variables durante los meses del período 04/2015-12/2019. Se observa que, durante la estación seca (con baja P), el indicador HSCI descendió alcanzando valores mínimos de 0,01 a 0,09 en los tres grupos de estaciones, sugiriendo que el contenido de HS regional era bajo, como era de esperar. El indicador VCI descendió de 0,9 en la época húmeda a un valor aproximado de 0,44 en la estación

seca, indicando cambios en la vegetación, posiblemente por la ausencia de P. Se observa, además, que la ET_{wv} no presentó grandes variaciones a lo largo del año, no obstante, las máximas tasas de ET_{wv} coincidieron con los períodos de alta P. La Figura 2 muestra la sensibilidad que tienen los indicadores propuestos a las variaciones de la P y su potencial uso para monitorear la canícula. De todos ellos, el indicador HSCI parece ser el más efectivo en identificar la falta de HS y caracterizar la variabilidad temporal del fenómeno de la sequía.

2. Análisis espacial

El año 2015 fue un año con una marcada falta de P en El Salvador, por lo que se analizó la distribución espacial de las variables en los meses en los que ocurrió la canícula (junio-septiembre). Asimismo, se repitió el análisis para el año 2016 que fue un año normal, a fin de validar los resultados obtenidos para el 2015.

Los mapas de los indicadores VCI, HSCI y ET_{wv} se construyeron con las mismas bases de datos que se utilizaron para el análisis temporal (MOD13Q1, GLDAS y NASA-USDA). La variabilidad espacial de la P se evaluó utilizando el producto provisto por la misión TRMM para tener una distribución espacial homogénea de datos.

La Figura 3 muestra los mapas resultantes de ET_{wv} , los índices HSCI, VCI y la P de TRMM (PPM) obtenidos en GEE, para el período 06/2015-09/2015. Se puede observar que en los meses de julio y agosto los valores de HS fueron bajos, esto implica bajos valores de HSCI, en concordancia con los bajos registros de PPM (< 9 mm/día). El VCI presentó en los meses de julio y agosto la mayor cantidad de píxeles con valores cercanos a cero, esto refleja la falta de verdor en las plantas debido a la falta de agua en la región. No obstante, es importante resaltar que la vegetación tiene mecanismos de adaptación que le permiten resistir el estrés que produce la falta de agua (Valladares et al., 2004). Esta adaptabilidad a los cambios de humedad, mantiene la actividad clorofílica aún con estrés hídrico, por lo que la falta de agua se manifiesta en la vegetación cuando la sequía ya se ha instalado en la zona. Por esto, el VCI no sería un buen indicador para detectar el inicio de la sequía. La ET_{wv} no mostró grandes variaciones durante los meses de la canícula. Sin embargo, las mayores tasas de ET parecen presentarse en septiembre, mes con altos niveles de PPM, HSCI y VCI (ver Figura 3). Se debe tener presente que el clima tropical típico del Caribe se caracteriza por tener baja variabilidad de temperatura y humedad relativa del aire durante el año, por lo que la ET_{wv} tampoco presenta gran variabilidad.

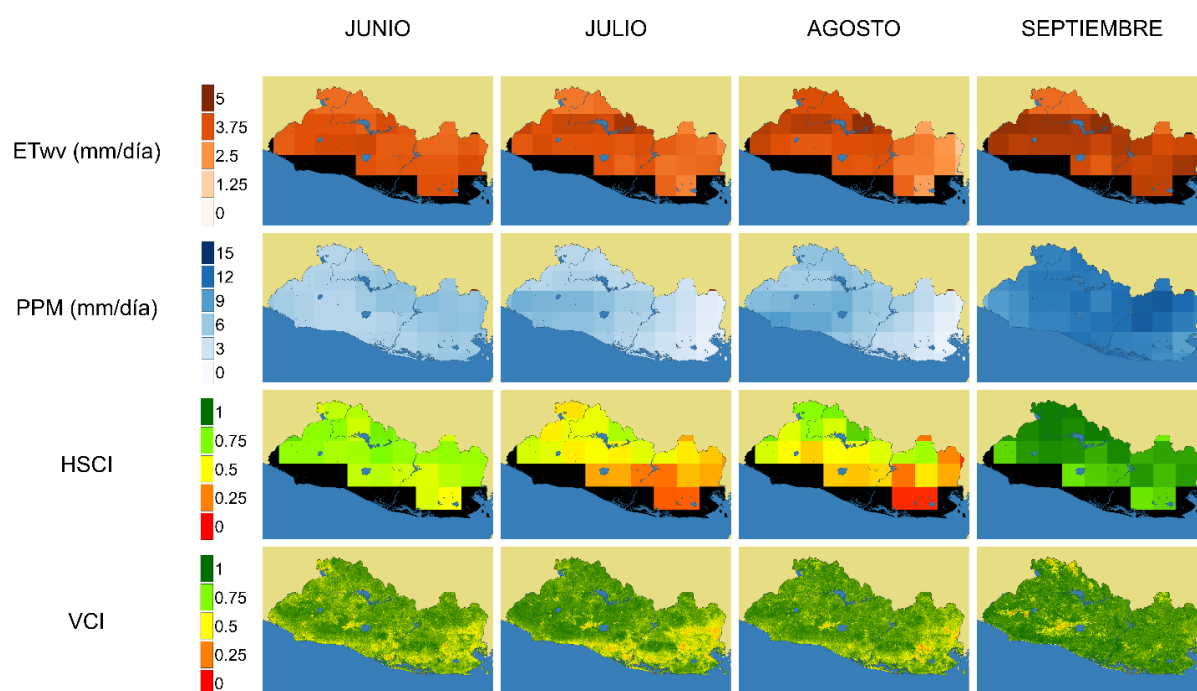


Figura 3. Mapas de ET_{wv} , PPM, HSCI y VCI para los meses de 06/2015-09/2015 en El Salvador.

Es importante destacar que la resolución espacial más fina de los mapas del VCI (250 metros), en comparación con la resolución del resto de los indicadores (0,25°), permitió identificar con más detalle las regiones más afectadas por la canícula. Sin embargo, el HSCI parece ser el indicador más sensible a la falta de agua y a pesar de su pobre resolución espacial permitiría caracterizar la variabilidad espacial de la canícula. Sin duda, la dinámica temporal propia de las variables es muy importante para el monitoreo de las sequías. La vegetación en general tiene una respuesta más lenta que la HS, a la variabilidad de la P.

Los mapas de ET_{wv} , VCI, HSCI y PPM para el año 2016, se muestran en la Figura 4. Para los meses de julio y agosto se observó una leve disminución de los valores de HSCI que concuerdan con una disminución en los valores PPM y ET_{wv} . Los mapas de VCI no mostraron mayores variaciones para el período 06/2016-09/2016. No obstante, todos los indicadores reflejaron condiciones de elevada humedad para los meses de junio-septiembre en El Salvador, en comparación con los valores alcanzados por los mismos en el año 2015. Por lo tanto, los resultados obtenidos en este trabajo muestran que los indicadores utilizados resultan útiles para monitorear la evolución de la canícula y caracterizarla una vez identificada.

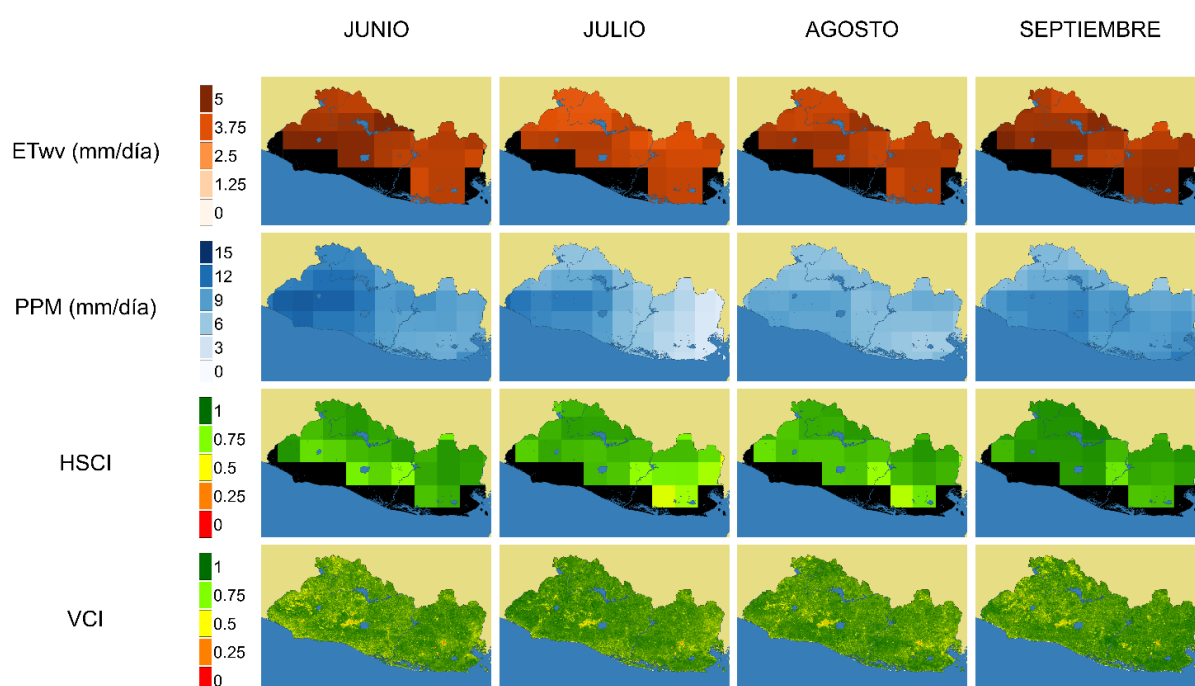


Figura 4. Mapas de ET_{wv} , PPM, HSCI y VCI para los meses de 06/2016-09/2016 en El Salvador.

Conclusiones

La sequía es un fenómeno recurrente que afecta a toda Centroamérica, en especial a El Salvador ya que su producto bruto interno (PBI) depende en gran medida de la producción agrícola, que a su vez depende totalmente de la P. En este trabajo se exploró el uso de cuatro indicadores de déficit hídrico, P, ET, VCI y HSCI, derivados de las bases de datos GLDAS, TRMM, MODIS y NASA-USDA-SMAP Global Soil Moisture disponibles en Google Earth Engine durante los años 2015-2019. Los indicadores seleccionados resultaron adecuados para monitorear y caracterizar la evolución espacio-temporal de los déficits hídricos que ocurren durante la canícula. El HSCI sería el mejor indicador en detectar el inicio de la sequía, mientras que VCI sería el indicador más adecuado para el monitoreo durante la evolución de la canícula, ya que permitiría determinar el impacto de la misma y la extensión territorial. Además, el VCI permitiría detectar el fin de la sequía, indicando el momento en que los pigmentos fotosintéticos de las plantas recuperan la actividad normal.

Todos los indicadores demostraron ser efectivos para caracterizar la variabilidad espacial y temporal del contenido de humedad de la superficie. No obstante, las diferentes resoluciones espaciales de los indicadores utilizados, el uso conjunto de ellos caracteriza la canícula mejor de lo que se logra con un solo indicador, independientemente de la resolución espacial que este tenga.

Podemos concluir entonces que los indicadores analizados enriquecen el estudio del fenómeno, brindando información con diferente resolución espacial y temporal. Esto permite mejorar el monitoreo actual de la sequía significativamente. Asimismo, mediante el uso de Google Earth Engine se logró codificar un sistema de monitoreo permanente para El Salvador que permitirá detectar anomalías en las P y evaluar sus consecuencias. El VCI permitirá delinear con mayor precisión las regiones que se ven afectadas por una sequía. Los resultados de esta investigación han sido presentados para su consideración a las autoridades del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Hídricos del El Salvador, quienes consideran que su aplicabilidad va a mejorar mucho su sistema actual.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con el apoyo del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y el Programa de Becas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), que financió la beca de Osmin Córdova.

Referencias bibliográficas

- Chang, K. Y., Xu, L., Starr, G., y Paw (2018). A drought indicator reflecting ecosystem responses to water availability: The normalized ecosystem drought index. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250, 102-117.
- Dada, H., y Sevilla M. (2009). IV censo agropecuario 2007-2008. Resumen de Resultados. San Salvador: Ministry of Economy, Vice-ministry of Industry (SV). Recuperado de file:///C:/Users/Usuario/Downloads/ESV_SPA_RES.REP_2008.pdf.
- Didan, K., Munoz, A. B., Solano, R., y Huete, A. (2015). MODIS vegetation index user's guide (MOD13 series). *University of Arizona: Vegetation Index and Phenology Lab*. Recuperado de https://lpdaac.usgs.gov/documents/621/MOD13_User_Guide_V61.pdf.
- Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P., y Huang, Y. (2013). A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 245-253.
- Fensholt, R., y Sandholt, I. (2003). Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sensing Environment*, 87, 111– 121.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (1974). *Soil Map of the World, 1: 5 000 000*. Volume I: Legend. Unesco -París.
- García-Haro, F. J., Campos-Taberner, M., Sabater, N., Belda, F., Moreno, A., Gilabert, M. A., Martínez, B., Pérez-Hoyos A., y Meliá, J. (2014). Vulnerabilidad de la vegetación a la sequía en España, *Revista de Teledetección*, 42, 29-37.
- Girolimetto, D., y Venturini, V. (2013). Water Stress Estimation from NDVI-Ts Plot and the Wet Environment Evapotranspiration. *Advances in Remote Sensing*, 2, 283-291.
- Girolimetto, D., y Venturini, V. (2014). Evapotranspiration and water stress estimation from TIR and SWIR bands. *Agriculture, Forestry and Fisheries*, 3(6-1), 36-45.

- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., y Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27.
- Holzman, M. E., Carmona, F., Rivas, R., y Niclòs, R. (2018). Early assessment of crop yield from remotely sensed water stress and solar radiation data. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 145, 297-308.
- Kattan, C., Menjívar, L., Molina, G., Peñate, Y., Estrada, A., Moran, I., Chávez, T., Arriola B., Cruz D., Vides, R., Erazo, A., Beltrán, H., Rivas, C., Barrera, G., y Cañas, A. (2017). Informe Nacional del Estado de los Riesgos y Vulnerabilidades, San Salvador. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de <http://rcc.marn.gob.sv/handle/123456789/9>.
- Kim, D., y Rhee J. (2016). A drought index based on actual evapotranspiration from the Bouchet hypothesis. *Geophysical Research Letters*, 43, 10277–10285.
- Kogan, F. N. (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 11(8), 1405-1419.
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in space research*, 15(11), 91-100.
- Mishra, A., Vu, T., Veettil, A. V., y Entekhabi, D. (2017). Drought monitoring with soil moisture active passive (SMAP) measurements. *Journal of Hydrology*, 552, 620-632.
- Mladenova, I. E., Bolten, J. D., Crow, W. T., Sazib, N., Cosh, M. H., Tucker, C. J., y Reynolds, C. (2019). Evaluating the Operational Application of SMAP for Global Agricultural Drought Monitoring. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(9), 3387-3397.
- Mo, K. C. (2008). Model-based drought indices over the United States. *Journal of Hydrometeorology*, 9 (6), 1212-1230.
- Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y., y Vidal, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 49 (3), 246-263.
- Priestley, C. H. B., y Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100, 81–92.
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U. E. A., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C. J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J. K., Walker, J. P., Lohmann, D., y Toll, D. (2004). The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 381-394.
- Sánchez, N., González-Zamora, Á., Martínez-Fernández, J., Piles, M., y Pablos, M. (2018). Integrated remote sensing approach to global agricultural drought monitoring. *Agricultural and forest meteorology*, 259, 141-153.
- Solomon, S., Manning, M., Marquis, M., y Qin, D. (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4). Cambridge university press.
- Valladares, F., Vilagrosa, A., Peñuelas, J., Ogaya, R., Camarero, J. J., Corcuera, L., Sisó, S., y Gil-Pelegrín, E. (2004). Estrés hídrico: ecofisiología y escalas de la sequía. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*, 2, 165-192.
- Van der Zee Arias, A., Van der Zee, J., Meyrat, A., Poveda, C., y Picado, L. (2012). *Estudio de caracterización del Corredor Seco Centroamericano (Países CA-4)*. Tomo I. FAO, Roma (Italia).
- Venturini, V., Islam, S., y Rodriguez, L. (2008). Estimation of evaporative fraction and evapotranspiration from MODIS products using a complementary based model. *Remote Sensing of Environment*, 112(1), 132-141.

- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., y López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *Journal of Climate*, 23, 1696–1718.
- Walker, E., García, G. A., Venturini, V., y Carrasco, A. (2019). Regional evapotranspiration estimates using the relative soil moisture ratio derived from SMAP products. *Agricultural Water Management*, 216, 254–63.
- Walker, E., y Venturini, V. (2019). Land surface evapotranspiration estimation combining soil texture information and global reanalysis datasets in Google Earth Engine. *Remote Sensing Letters*, 10, 929–938.
- Zhang, L., Jiao, W., Zhang, H., Huang, C., y Tong, Q. (2017). Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices. *Remote sensing of environment*, 190, 96-106.
- Zhou, L., Zhang, J., Wu, J., Zhao, L., Liu, M., Lü, A., y Wu, Z. (2012). Comparison of remotely sensed and meteorological data-derived drought indices in mid-eastern China. *International journal of remote sensing*, 33(6), 1755-1779.

INDICADORES DE IMPACTO URBANO-AMBIENTAL EN LOS ANEGAMIENTOS DEL 2010 Y 2015 EN SANTA FE, ARGENTINA: DIAGNÓSTICO MULTINIVEL BASADO EN SIG

Andrea Bosisio¹; Antonio Moreno Jiménez²

¹Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina

²Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España

acboisio@yahoo.com.ar

Resumen

Las anegaciones por lluvias en el espacio urbano son numerosas y recurrentes en varias ciudades latinoamericanas, y particularmente en la Argentina, ocasionando serios trastornos ambientales, funcionales y dotacionales a la población afectada y deteriorando su calidad de vida. Esta problemática, particularmente en la ciudad de Santa Fe de la Vera Cruz (Argentina), ha preocupado históricamente a sus ciudadanos, que sufren cuantiosos daños en cada episodio de anegamiento.

En el presente trabajo se aborda esta problemática mediante instrumentos geotecnológicos, con el fin de formular indicadores de impacto socio-espacial de las anegaciones en la ciudad, generar una cartografía detallada de los mismos y lograr así un diagnóstico, cuantitativo y visual, a tres niveles de desagregación espacial. Con ello se pretende conocer de forma más precisa la incidencia de estos eventos en las distintas partes de la ciudad durante sus períodos de ocurrencia y facilitar su valoración y la toma de decisiones por los organismos competentes.

Palabras clave: *Sistemas de Información Geográfica, indicadores de anegamientos urbanos, diagnóstico de impactos hídricos, análisis especial, Santa Fe*

Introducción, antecedentes y objetivos

Este trabajo se centra en el estudio de los anegamientos debidos a lluvias localmente intensas que, cuando ocurren sobre un ámbito urbano, afectan principalmente a la población, infraestructuras y actividades (Paoli et al., 2015). Generalmente las causas antrópicas de estos anegamientos atañen a intervenciones como obras de drenaje urbano e infraestructura vial, que contribuyen a modificar la respuesta hidrológica de la cuenca, limitando su capacidad de retención e incrementando los excesos hídricos y la escorrentía superficial. Esto suele estar directamente vinculado con las modificaciones en el uso de la tierra como consecuencia de una urbanización creciente, como es el caso de muchas ciudades de países latinoamericanos en desarrollo

(Aragón-Durand, 2014). Estas se caracterizan por una elevada concentración de población en pequeñas áreas, aumento de las periferias urbanas, urbanización espontánea, que ocurre generalmente en áreas de peligro de inundaciones como lo es la planicie aluvial (Tucci, 2007), y deficiente o nula planificación ante esos fenómenos físico-ambientales adversos.

El problema que en la actualidad representan las inundaciones urbanas en América Latina ha sido analizado de modo cualitativo-descriptivo y cuantitativo por varios autores (Tucci, 2007; Aragón-Durand, 2014; Paoli et al., 2015), teniendo en cuenta la interacción entre la sociedad y los peligros hidrometeorológicos y climáticos.

Asimismo, está bien establecido el papel de la urbanización y el desarrollo urbano, generalmente no regulado, como factores centrales en la generación, incremento y reducción de riesgo a inundaciones (Olcina Cantos, 2008; Linares, 2016). El tema cuenta con una atención ya larga en la bibliografía sobre el medio físico y la urbanización (e.g. Shaake, 1972; Sarma et al., 2016), así como en las obras sobre planeamiento urbano (e.g. Douglas, 1983, 179-199), y la resiliencia de las ciudades frente a estos disturbios (Tompkins y Adger, 2003).

En las últimas décadas se vienen desarrollando estudios e indicadores de vulnerabilidad social frente a inundaciones (Rufat et al., 2015; Nasiri et al., 2016), tomando gran importancia para cuantificar y mapear no solo la dimensión territorial, sino también la dimensión humana del riesgo (Linares, 2016; Velázquez, 2016; Bosisio y Moreno Jiménez, 2019).

En esta línea de preocupación, este estudio tiene como propósito general contribuir a una mejor caracterización de los impactos de las anegaciones urbanas por lluvias, utilizando para ello el análisis espacial y las geotecnologías (Moreno Jiménez *et al.*, 2017), cuyas excelentes capacidades y solidez posibilitan diagnósticos más certeros, mediante indicadores de afección más refinados y desagregados espacialmente (Bosisio y Moreno Jiménez, 2017 y 2020).

Como consecuencia de su emplazamiento geográfico la ciudad de Santa Fe de la Vera Cruz ostenta históricamente una severa vulnerabilidad pluvio-hídrica, producto de sus bajos niveles topográficos (Tucci, 2007). El foco de atención en este trabajo recae en la caracterización y análisis de las zonas de dicha ciudad con afección hídrico-pluvial y de sus ocupantes, que deberían ser especialmente considerados por los organismos decisores en planes estratégicos. A estos efectos el estudio se basará en dos episodios reales, acaecidos en dicha ciudad en los años 2010 y 2015, y de similares características.

A tal fin se avista la definición y obtención de indicadores estadísticos del impacto urbano de tales anegaciones alusivos a tres facetas: la superficie, la población y los usos del suelo. Para las dos primeras además, tales estadísticos irán referidos a varios niveles o escalas espaciales: por un lado, la ciudad en su conjunto, por otro, los distritos municipales y, finalmente, por unidades muy desagregadas espacialmente, los radios censales (RC). Con ello se persigue, aparte de una mejor apreciación de los impactos de cara a las intervenciones públicas, posibilitar estudios ulteriores sobre las desigualdades y posibles injusticias ambientales en la ciudad por tales anegamientos.

Cuestiones metodológicas

1. Ámbito de estudio y fuentes de datos estadísticos y cartográficos

A los efectos de centrarnos en el área más significativa de la ciudad se delimitó el *área urbana poblada* (AUP), la cual incluye zonas de uso residencial, comercial y ocio, con elevada densidad diaria de población, excluyendo las áreas no urbanizadas (Figura 1).

Las siguientes fuentes de información se incluyeron en una base de datos diseñada en SIG, con el objeto de tratarla desagregadamente en diferentes niveles:

- Una ortofotografía aérea de la Ciudad de Santa Fe de septiembre de 2013, con resolución de 1,20 metros, suministrada por el Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina.
- Capas vectoriales de áreas urbanas anegadas durante períodos de precipitaciones intensas realizados por la Municipalidad de la Ciudad de Santa Fe con datos relevados durante los meses de febrero/marzo de 2010 y febrero/marzo de 2015.

- Capas vectoriales de distritos administrativos, zonificación de usos de suelo, parcelas y límites municipales, obtenidas del Reglamento de Ordenamiento Urbano de la Municipalidad de la Ciudad de Santa Fe (Ordenanza 11748).

- Datos estadísticos poblacionales registrados para 399 radios censales urbanos, obtenidos del último Censo Nacional de Población y Vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC, 2013). Los radios son las unidades censales mínimas con límites geográficos definidos, se clasifican según la forma en que se asienta y distribuye la población en ese territorio y abarcan un área que comprende unas 300 viviendas aproximadamente. Los radios censales urbanos presentan población agrupada únicamente y están conformados por manzanas y/o sectores pertenecientes a una localidad (INDEC, 2013).

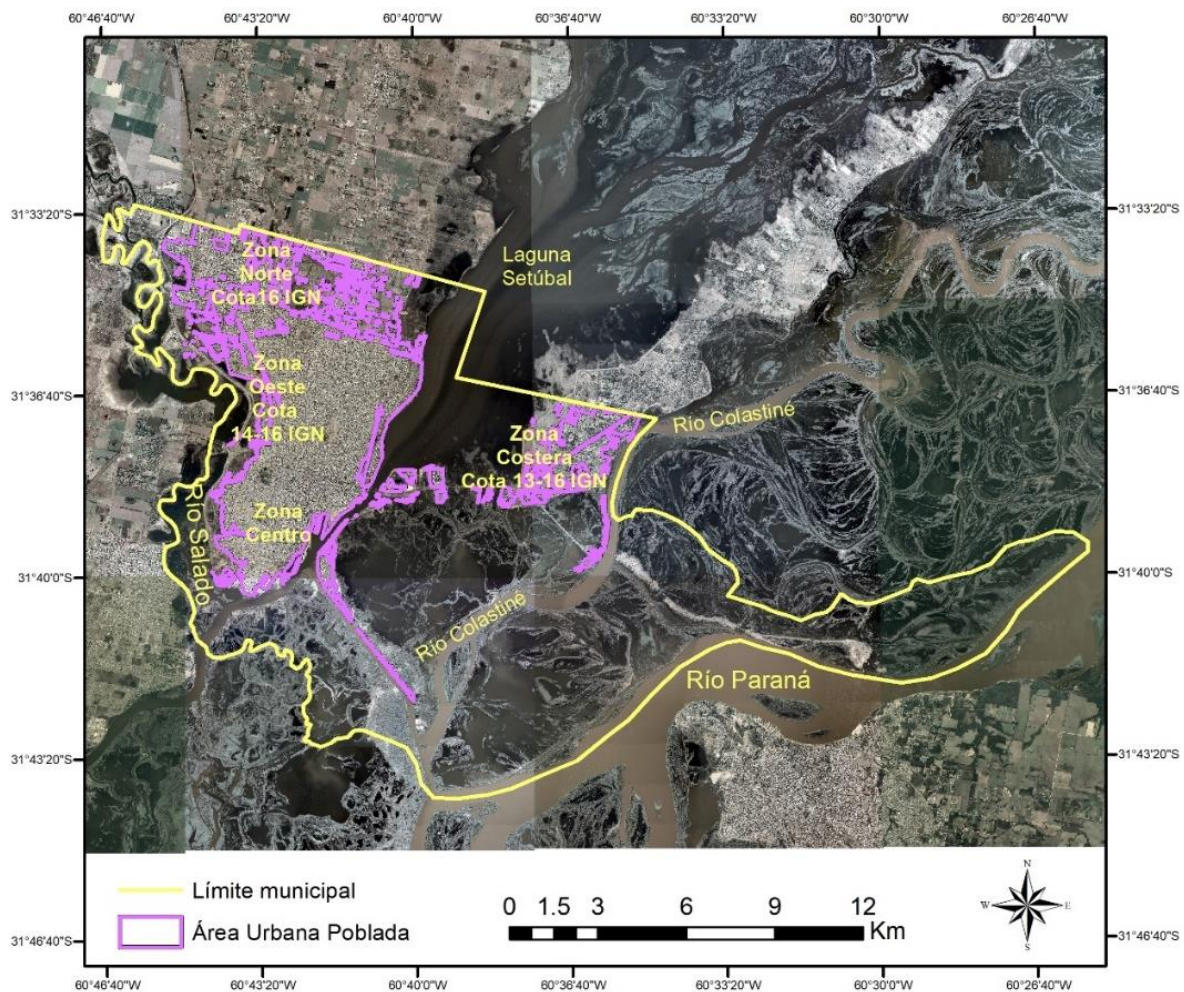


Figura 1. Límite municipal de la ciudad de Santa Fe de la Vera Cruz y demarcación del área urbana poblada, AUP (elaboración propia).

2. Indicadores y tratamientos con SIG

La capa vectorial correspondiente al área urbana poblada (AUP) se utilizó como capa de recorte para las capas restantes, con el fin de realizar los análisis estadísticos específicamente dentro de la planta urbana de la ciudad de Santa Fe. La tabla con datos poblacionales de los radios censales (RC) se unió en el SIG a la tabla de atributos de dicha capa de radios recortada. Adicionalmente, se adoptaron también los ocho distritos administrativos municipales como unidades para sintetizar los resultados y facilitar la valoración y la formación de decisiones públicas.

Con el objeto de mejorar el conocimiento de las consecuencias del anegamiento se plantearon tres clases de indicadores a estimar, que atañen a componentes de la ciudad: el área urbana poblada y la población residente. Los valores de dichos indicadores se obtuvieron para la ciudad,

por distritos administrativos y por RC, para síntesis y comparación espacial. Su expresión es la siguiente:

1. Superficie (en hectáreas) anegada y porcentaje respecto a la superficie total de distritos administrativos y RC. Este indicador se obtuvo mediante operaciones de geoprocésamiento vectorial para el AUP.

2. Cantidad de población potencialmente afectada y porcentaje respecto a la población total de cada RC. La lógica de estimación de la población afectada se sustenta en aplicar a los efectivos totales de residentes en cada RC un porcentaje justificado; en este caso el porcentaje de superficie anegada por RC. Utilizando técnicas de geoprocésamiento también se obtuvieron los valores poblacionales para los distritos administrativos.

3. Cantidad de parcelas afectadas y porcentaje respecto al total de las mismas, y desagregadas según las diferentes zonas de usos del suelo, que estén incluidas dentro de la AUP. Se estimaron también mediante geoprocésos.

Análisis de resultados

1. Caracterización de los anegamientos

Se seleccionaron dos eventos de anegaciones representativos por su complejidad, ambos acontecidos durante los meses de febrero-marzo de los años 2010 y 2015 durante la ocurrencia de “El Niño”, fenómeno caracterizado por abundantes precipitaciones y un elevado nivel hidrométrico correspondiente a las crecidas ordinarias de los ríos Salado y Paraná (Tabla 1).

Tabla 1. Datos pluviométricos y alturas hidrométricas máximas ocurridas durante los meses de los anegamientos en 2010 y 2015. Fuente: Centro de Informaciones Meteorológicas FICH-UNL.

Anegamientos	Meses	Total mensual de lluvia (mm)	Registro máximo mensual de lluvia (mm)	Media mensual de lluvia (mm)	Total de días de lluvia registrada	Altura máxima mensual del río Paraná (m)	Altura máxima mensual del río Salado (m)
2010	Febrero	357,30	135	29,8	12	6,02	4,85
	Marzo	164,50	92,2	27,4	6	5,82	4,22
2015	Febrero	214,25	159	30,6	7	4,52	5,06
	Marzo	208,50	118,5	26,1	8	4,26	6,27

Asimismo, se registraron niveles freáticos elevados, según lo establecido en los registros del monitoreo de niveles de agua subterránea en 23 pozos de observación ubicados dentro del ejido de la ciudad; en el lapso comprendido durante la ocurrencia de los anegamientos (Fornari, D’Elía, y Fedele, 2013). Dichos registros contabilizan un ascenso significativo de las napas con una profundidad de escasos 0,50 metros particularmente en los pozos ubicados en la zona norte y noreste de la ciudad. El ascenso notorio del nivel de agua subterránea se corresponde con una época muy lluviosa, meses de febrero y marzo, y con la ocurrencia de las crecidas ordinarias de los ríos Salado y Paraná (Paris, Pérez y D’Elía, 2018).

Con base en los datos precedentes y en las alertas de inundación por anegamiento que oportunamente denunciaron los vecinos afectados de la ciudad, la Municipalidad de Santa Fe (MCSF) elaboró mapas vectoriales con las zonas abarcadas por ambos anegamientos, haciendo la distinción entre las áreas donde el agua ingresó en las viviendas. En el mapa correspondiente al anegamiento del año 2010 se observa que las zonas mayormente afectadas son el cordón oeste, el norte, el este y la región costera (Figura 2). En cambio, en el mapa confeccionado para el año

2015, los sectores críticos son el este, norte y el sector costero, mejorando la situación en el cordón oeste que no aparece afectado en este período (Figura 3).

De forma sintética, para los anegamientos del año 2010 y del año 2015, se pudo calcular el total de la superficie anegada en el AUP de Santa Fe, la cual representa más de 800 hectáreas, es decir un 14,58 % de la superficie total para el año 2010, mientras que para el evento del año 2015 las hectáreas afectadas fueron más de 600, un 11,40 %. La población afectada total se ha estimado en algo más de cincuenta mil, aproximadamente el trece por ciento para el año 2010, y en cerca de treinta y cinco mil para el año 2015, el 8,84% (Tabla 2).

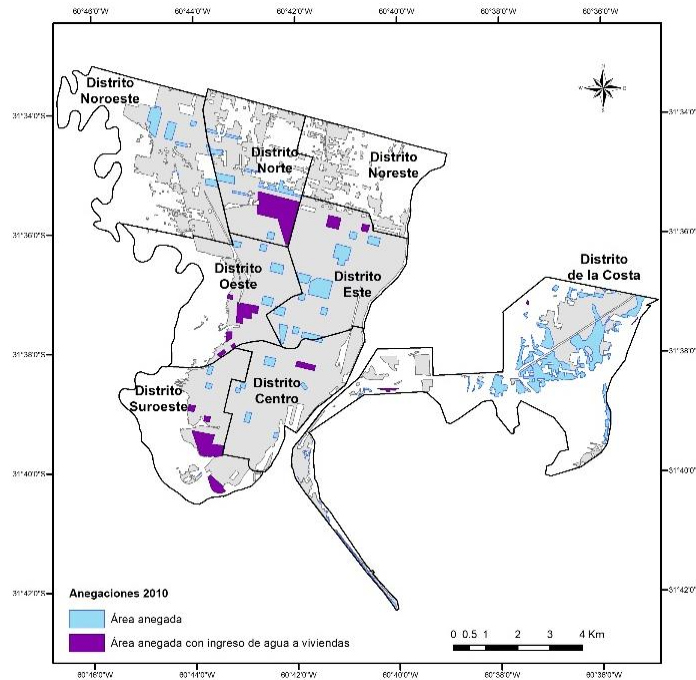


Figura 2. Zonas afectadas por anegamiento en el área urbana poblada de Santa Fe, 2010. Fuente: Elaboración propia en base a datos de MCSF.

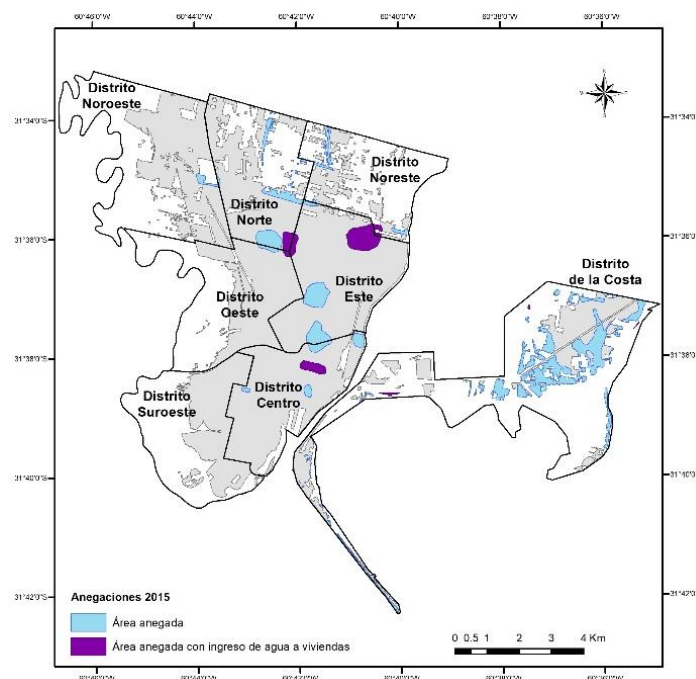


Figura 3. Zonas afectadas por anegamiento en el área urbana poblada de Santa Fe, 2015. Fuente: Elaboración propia en base a datos de MCSF.

Tabla 2. Indicadores de anegaciones y población afectada en el área urbana poblada (AUP) de Santa Fe, 2010 y 2015. Fuente: elaboración propia.

Años	Superficie AUP (ha)	Superficie anegada (ha)	% Superficie anegada	Población total AUP	Población afectada estimada	% Población afectada estimada
2010	5792,02	844,65	14,58	391190	50605	12,94
2015	5792,02	660,48	11,40	391190	34562	8,84

2. Análisis espacial de las anegaciones por distritos administrativos

Consideraremos en primer lugar los distritos, que son áreas de planificación administrativa establecidas según la ordenanza 11748 “Reglamento de Ordenamiento Urbano de la Ciudad de Santa Fe de la Vera Cruz” (2010). Los resultados de los geoprocetos utilizados en el análisis indican que el distrito con mayor superficie anegada tanto en el evento de 2010 como en el evento de 2015 es el de la Costa con más de 302 hectáreas afectadas en ambas fechas (Tabla 3). Asimismo, el distrito Norte y el distrito Este en el año 2010 presentan más de 140 hectáreas anegadas. De igual forma el distrito Norte y el distrito de la Costa ostentan el mayor porcentaje de superficie afectada en el mismo período, en contraposición al distrito Noreste que no presenta mayores inconvenientes (Figuras 4 y 6).

Tabla 3. Indicadores de impacto por anegaciones en los distritos de Santa Fe (AUP). Fuente: Elaboración propia.

Distritos	Superficie del Distrito (ha)	2010	2015	Población total del distrito	Población afectada estimada	
		Superficie anegada (ha) / (%)	Superficie anegada (ha) / (%)		2010	2015
Centro	959,17	36,5 / 3,81	58,62 / 6,11	63909	3173	4130
Suroeste	533	77,88 / 14,61	0 / 0	49003	7823	0
Oeste	634,81	66,76 / 10,52	10,57 / 1,66	45727	5593	718
Noroeste	704,5	56,84 / 8,07	8,77 / 1,24	55392	5087	1030
Este	1135,08	140,67 / 12,39	153,22 / 13,50	83541	11150	12628
Noreste	275	0,88 / 0,32	31,78 / 11,56	12244	38	1347
Norte	736,4	162,72 / 22,1	95,12 / 12,92	54458	11507	8477
De la Costa	813,55	302,42 / 37,17	302,42 / 37,17	26916	6232	6232

Por otra parte, durante el evento del año 2015 el distrito Suroeste no sufrió ningún tipo de inconvenientes, no siendo así en los distritos Norte y Este que registraron más de 90 hectáreas afectadas el primero y más de 150 hectáreas el segundo durante el período en cuestión, con un porcentaje de aproximadamente 13 % de afectación en ambos casos (Figuras 5 y 7).

Los distritos con más población afectada en el año 2010 son el Norte, el Este y el de la Costa (Tabla 3), aunque el distrito Norte presenta una situación más preocupante, dado que la afección por anegación a su población total es la mayor registrada para toda la ciudad. En contraposición, el distrito Noreste prácticamente no presenta complicaciones para la población (Figura 8).

En lo concerniente al evento del año 2015, los distritos con mayor población afectada son el Este y el de la Costa. Asimismo, el distrito Norte presenta una considerable baja en su registro de

población afectada con respecto al año 2010, aunque aún representa una cantidad importante, más de siete mil personas (Figura 9). En contraposición, durante este evento se observa que en el cordón marginal oeste lindero al río Salado y comprendido entre los distritos Suroeste, Oeste y Noroeste la situación presenta una gran mejoría respecto al evento pluvio-hídrico anterior. Muy probablemente esto se deba a la intervención realizada por el gobierno local, posteriormente al anegamiento acaecido en el año 2010, mediante la cual se concretaron obras de reservorios y canalizaciones que contribuyen al pronto escurrimiento de las precipitaciones, impidiendo así la acumulación de las mismas en dichos sectores.

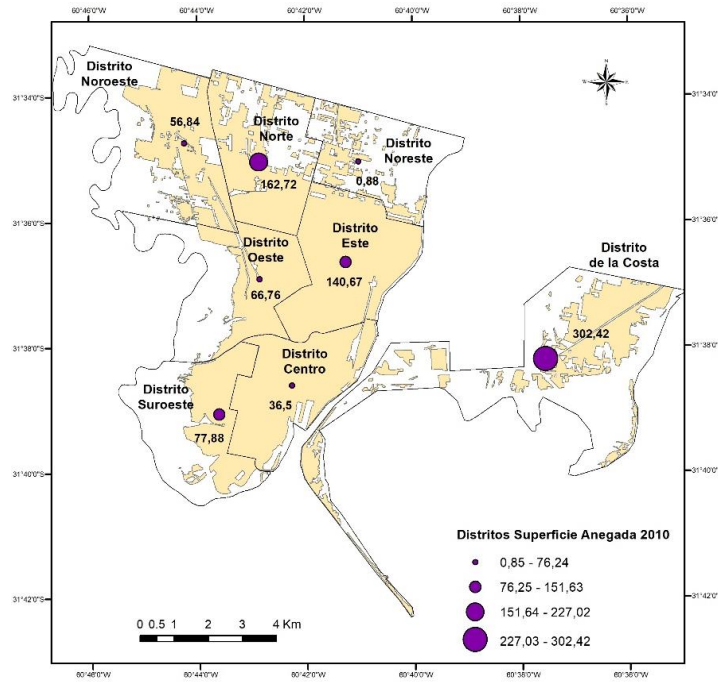


Figura 4. Superficie anegada por distritos en hectáreas en la ciudad de Santa Fe (AUP) 2010 (elaboración propia).

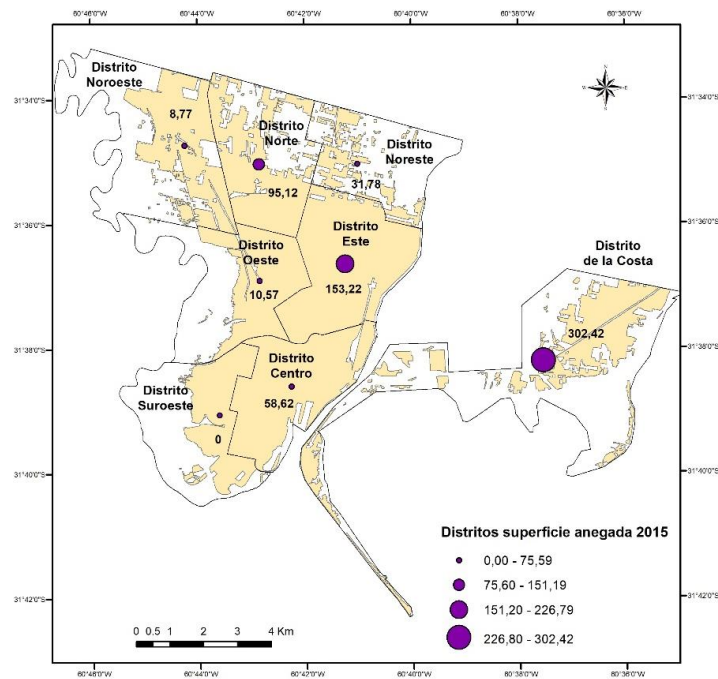


Figura 5. Superficie anegada por distritos en hectáreas en la ciudad de Santa Fe (AUP) 2015 (elaboración propia).

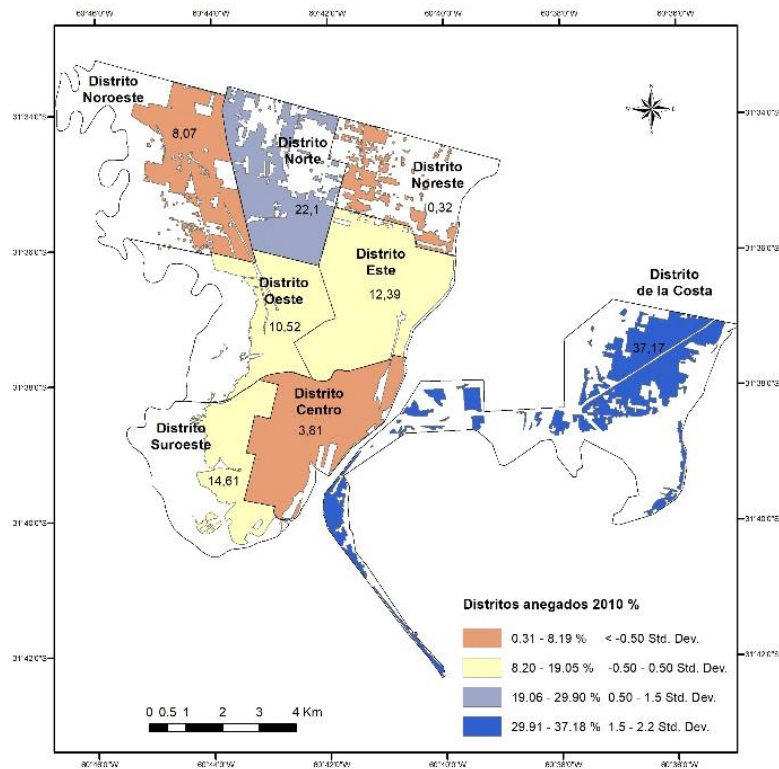


Figura 6. Porcentaje de superficie anegada por distritos en la ciudad de Santa Fe (AUP) 2010 (elaboración propia).

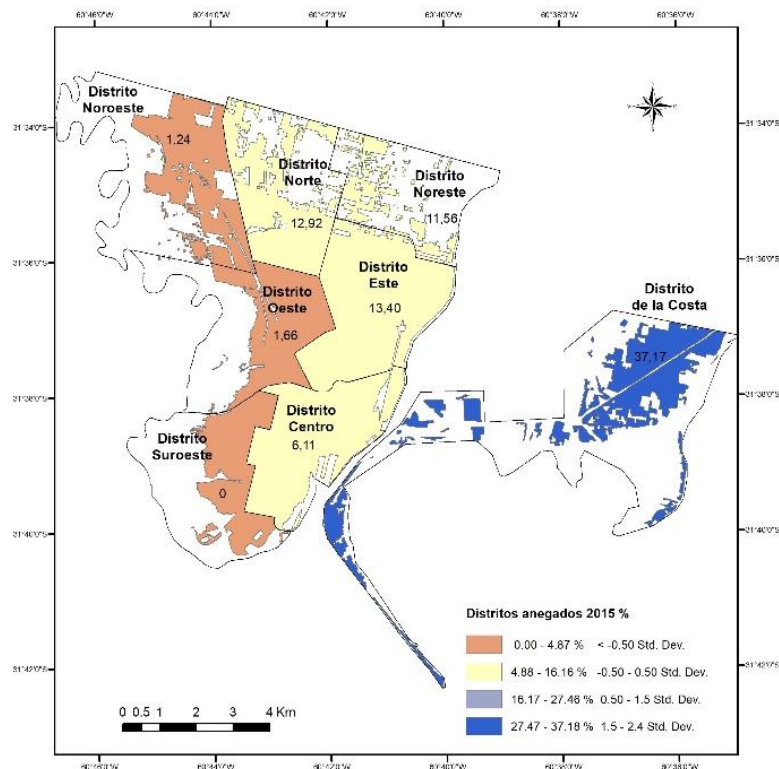


Figura 7. Porcentaje de superficie anegada por distritos en la ciudad de Santa Fe (AUP) 2015 (elaboración propia).

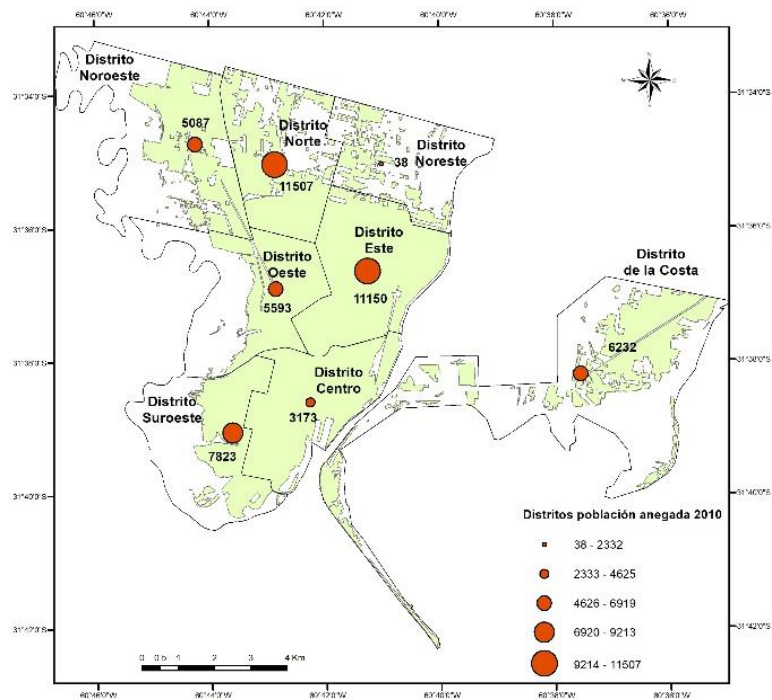


Figura 8. Población afectada por anegación por distritos en la ciudad de Santa Fe (AUP) 2010 (elaboración propia).

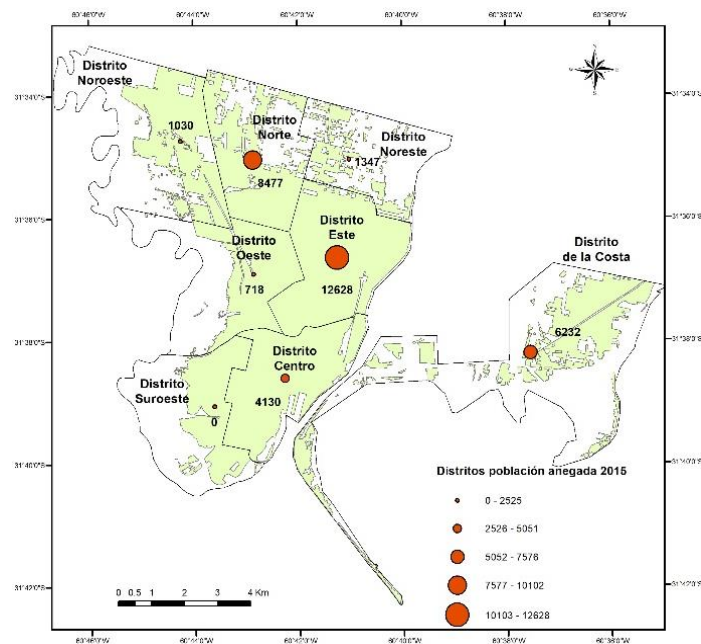


Figura 9. Población afectada por anegación por distritos en la ciudad de Santa Fe (AUP) 2015 (elaboración propia).

3. Análisis espacial de las anegaciones por radios censales

De los 399 RC urbanos analizados 197 (49 %) presentaron anegamientos durante las lluvias intensas del evento acaecido en febrero-marzo de 2010, y 94 (24 %) en el evento de 2015. Los porcentajes de afección superficial para los RC en el año 2010 varían desde afecciones mínimas del 0,49 %, a los casos en donde se registra más del 68 % o bien la totalidad del RC anegado. Para el año 2015 las afecciones oscilan desde el 0,31 % al total del radio afectado (Figura 10 y 11).

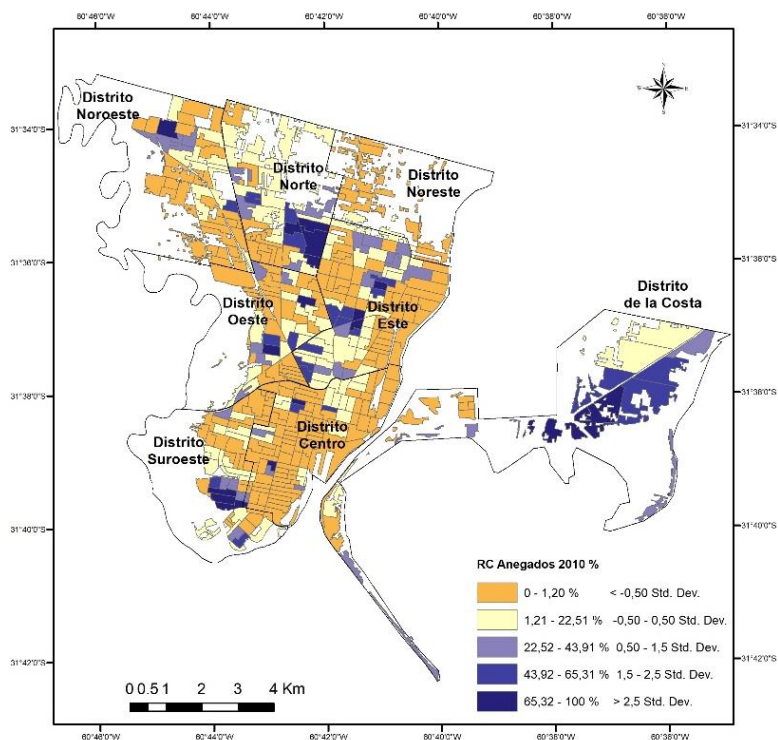


Figura 10. Porcentaje de superficie anegada por radios censales en Santa Fe 2010 (elaboración propia).

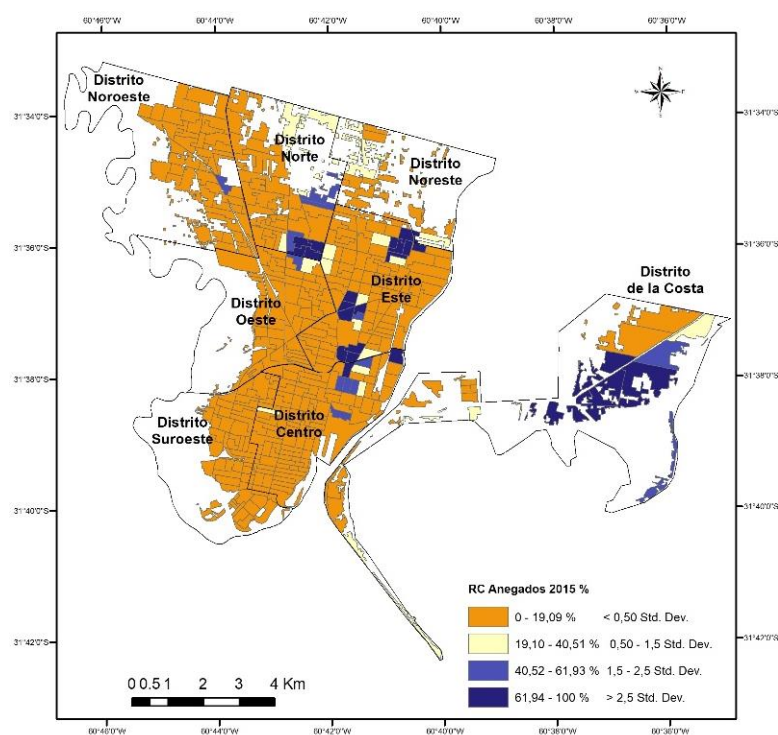


Figura 11. Porcentaje de superficie anegada por radios censales en Santa Fe 2015 (elaboración propia).

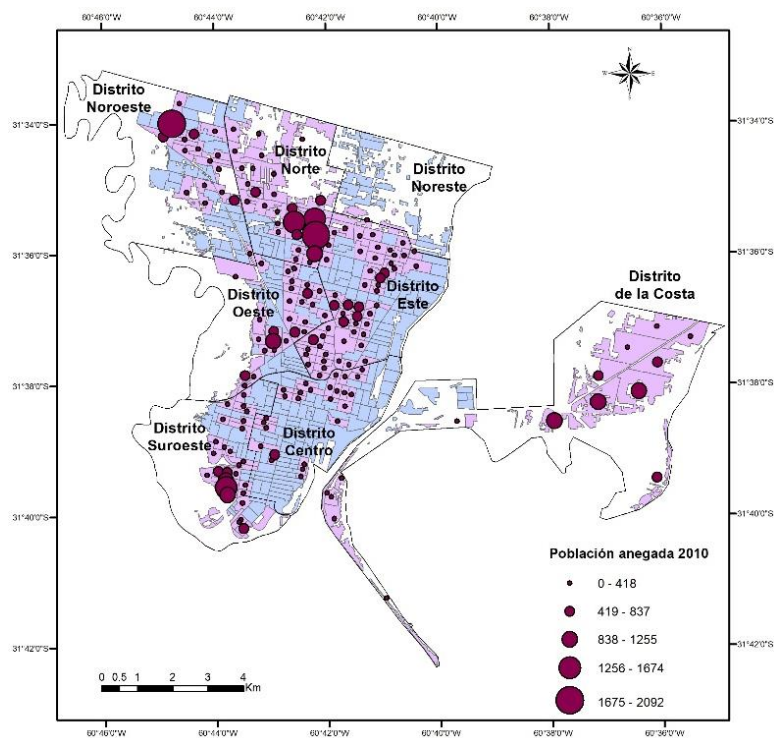


Figura 12. Población total anegada por radio censal en Santa Fe 2010 (elaboración propia).

El patrón espacial de anegamiento para el año 2010 exhibe valores altos en diferentes lugares de la ciudad: al noroeste y norte, varias zonas intermedias, al suroeste y en la zona costera. La distribución de la cantidad de población afectada estimada, dada la decisión metodológica adoptada, concuerda con el patrón recién descrito, destacando dos zonas al norte, otras en la parte intermedia en las cuales el agua ingresó a la vivienda familiar, al suroeste y al sur del departamento de la Costa; aflora además un amplio semillero con cifras menores en la parte intermedia (Figura 12). Para el año 2015 el patrón espacial es similar en la zona norte y en la zona Costera, pero hay un aumento de población afectada en las zonas centro y noreste; por otro lado, hay disminución o ausencia de población afectada en la zona suroeste (Figura 13).

Una caracterización adicional de la distribución espacial de la superficie y población anegada la aporta el índice de autocorrelación espacial I de Moran global (Goodchild, 1986; Celemin, 2009), cuyos valores oscilan entre -1 y $+1$. Como es sabido, esta herramienta estadística inferencial asume (hipótesis nula, representada con valores cercanos a cero) que la variable evaluada no posee autocorrelación espacial, distribuyéndose de forma aleatoria en el espacio. La hipótesis alternativa implica, por su parte, un patrón espacial no aleatorio, plasmado bien en valores positivos del índice (denotando agrupamiento espacial de valores similares de la variable), bien negativos (valores espacialmente cercanos muy contrastados).

El cálculo de este índice se realizó para los indicadores de población y superficie anegada por RC en base a dos métodos de conceptualización de las relaciones espaciales, el *método de distancia inversa*, cuya asunción estriba en que, para una entidad de destino dada, las entidades vecinas tienen mayor influencia en los cálculos que las entidades que están alejadas; a nuestros efectos, y tras diversos ensayos, se ha establecido un umbral de distancia de 1000 metros como alcance de tal influencia. El segundo método utilizado fue el de *bordes contiguos solamente*, en el cual solo los polígonos adyacentes son tenidos en cuenta en los cálculos para una entidad poligonal de destino. Como veremos, esta segunda opción ha conseguido mejores resultados en I , lo que acredita una superior idoneidad y rigor.

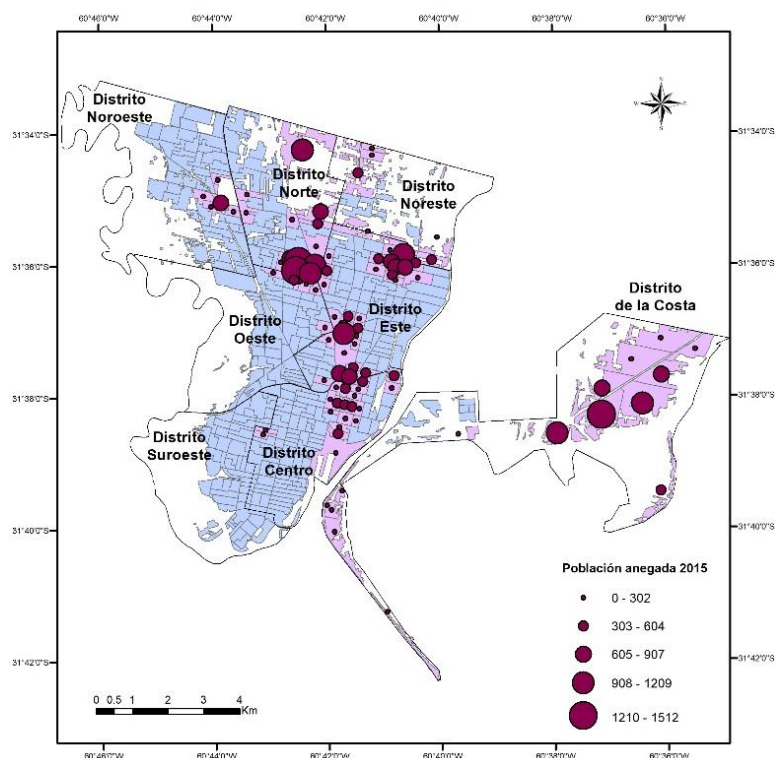


Figura 13. Población total anegada por radio censal en Santa Fe 2015 (elaboración propia).

El test (Tabla 4) arroja unos valores z positivos y altos, con probabilidades cercanas a cero, lo que indica que no hay una distribución espacial aleatoria de valores de los indicadores. El índice de Moran para ambas variables en el año 2010 presenta valores medio-bajos de autocorrelación positiva, dado que su distribución espacial aparece algo entremezclada. En contraposición, en el año 2015 los índices I son más elevados para ambos indicadores, denotando un mayor agrupamiento espacial de los valores similares, como se percibe en los mapas previos. Ello podría presuntamente atribuirse a las obras municipales realizadas entre ambos años para mejorar el drenaje superficial, que habrían logrado proteger a ciertas zonas, pero que habrían dejado algunas porciones o núcleos de la ciudad como afectables en este segundo período.

Tabla 4. Índice I de Moran calculado para la población y superficie anegada por radios censales Santa Fe, 2010 y 2015. Fuente: elaboración propia

Variable	Años	Conceptualización de relaciones espaciales						
		Distancia Inversa				Bordes contiguos solamente		
		Índice I de Moran	z-score	p-value	Distancia (metros)	Índice I de Moran	z-score	p-value
Superficie anegada (%)	2010	0,225	10,773	0,00	1000	0,391	11,986	0,00
	2015	0,364	17,462	0,00	1000	0,549	16,895	0,00
Población total anegada	2010	0,256	12,434	0,00	1000	0,406	12,670	0,00
	2015	0,334	16,094	0,00	1000	0,556	17,202	0,00

4. Análisis espacial de las anegaciones por usos de suelo

Para tener una percepción certera de cuáles fueron los usos de suelo y zonas más afectadas por ambos eventos hidro-meteorológicos se cuantificaron las parcelas anegadas, resultando en más del 13 % las afectadas para el año 2010 y en 10 % para el año 2015 (Tabla 5).

Tabla 5. Superficie de parcelas afectadas por anegación en el área urbana poblada (AUP) de Santa Fe. Fuente: Elaboración propia.

Años	Superficie de parcelas (Ha)	Superficie de parcelas anegadas (Ha)	% Superficie de parcelas anegadas	Total de parcelas	Total parcelas afectadas	% Parcelas afectadas
2010	4297,98	605,37	14,08	117028	16228	13,87
2015	4297,98	493,80	11,49	117028	11857	10

Las zonas de uso de suelo urbano que ostentan los registros más elevados de cantidad de parcelas anegadas en ambos eventos son, por este orden, Espacios Verdes, Residencial y Centralidad. Aunque con cifras más bajas también los Equipamientos sufrieron anegaciones significativas (Tabla 6).

Estas zonas presentan ambientes urbanos bien definidos según lo establecido en el Reglamento de Ordenamiento Urbano de la Ciudad de Santa Fe (Ordenanza 11748). El mismo en su artículo 56 especifica que la zona Residencial está caracterizada por densidades variables de población, (alta, media y baja), que pueden o no poseer exigencias de altura mínima para sus construcciones, patrimonio a preservar, características de barrio jardín o bien ser urbanizaciones integrales y conjuntos habitacionales. La afección en esta zona fue generalizada en el anegamiento de 2010, mientras que en 2015 se localizó en el norte, este y sector costero (Figuras 14 y 15).

Tabla 6. Parcelas afectadas por zonas en el área urbana poblada (AUP) de Santa Fe 2010 – 2015. Fuente: Elaboración propia.

Zonas	Total de Parcelas	Total de parcelas afectadas 2010	% Parcelas afectadas 2010	Total de parcelas afectadas 2015	% Parcelas afectadas 2015
Centralidad	26652	3101	11,63	2213	8,31
Equipamiento	823	47	5,71	21	2,55
Espacios Verdes	923	133	14,41	146	15,82
Especial de Islas	696	22	3,16	22	3,16
Residencial	87454	12658	14,47	9191	10,51
Rural	25	13	52	13	52
Urbanización Futura	100	1	1	0	0
Zona de Seguridad Hídrica	345	253	73,34	251	72,75

En el artículo 57 del citado reglamento se describe la zona de Centralidad como sectores nodales o lineales, con altos flujos circulatorios que presentan usos administrativo, financiero, comercial y también residencial. La Centralidad se plasma en sub-áreas entre las cuales figuran el microcentro, el macrocentro, los entornos particulares, los corredores lineales y los barrios. Los

mismos fueron afectados en 2010 en el sector norte, este y centro de la ciudad; mientras que en el evento pluvio-hídrico de 2015 solamente se afectaron las zonas norte y este.

La zona definida como Equipamiento refiere en el reglamento de Ordenamiento Urbano a fracciones en las cuales se localizan edificios, equipos o instalaciones destinadas a actividades productivas, técnicas y logísticas propias de la actividad urbana. Esta zona, conjuntamente con los Espacios Verdes, fue afectada en menor medida durante ambos períodos de anegamiento.

La zona denominada Zona de Seguridad Hídrica, caracterizada por ser un área no urbanizable, está destinada a obras estructurales de contención hídrica (reservorios y terraplenes de defensa contra inundaciones). Se encuentra incluida dentro del distrito de la Costa y ocupa sectores que poseen una cota de elevación inferior a 15 metros, por lo tanto, fue afectada en igual medida durante ambos eventos, en 2010 y 2015.

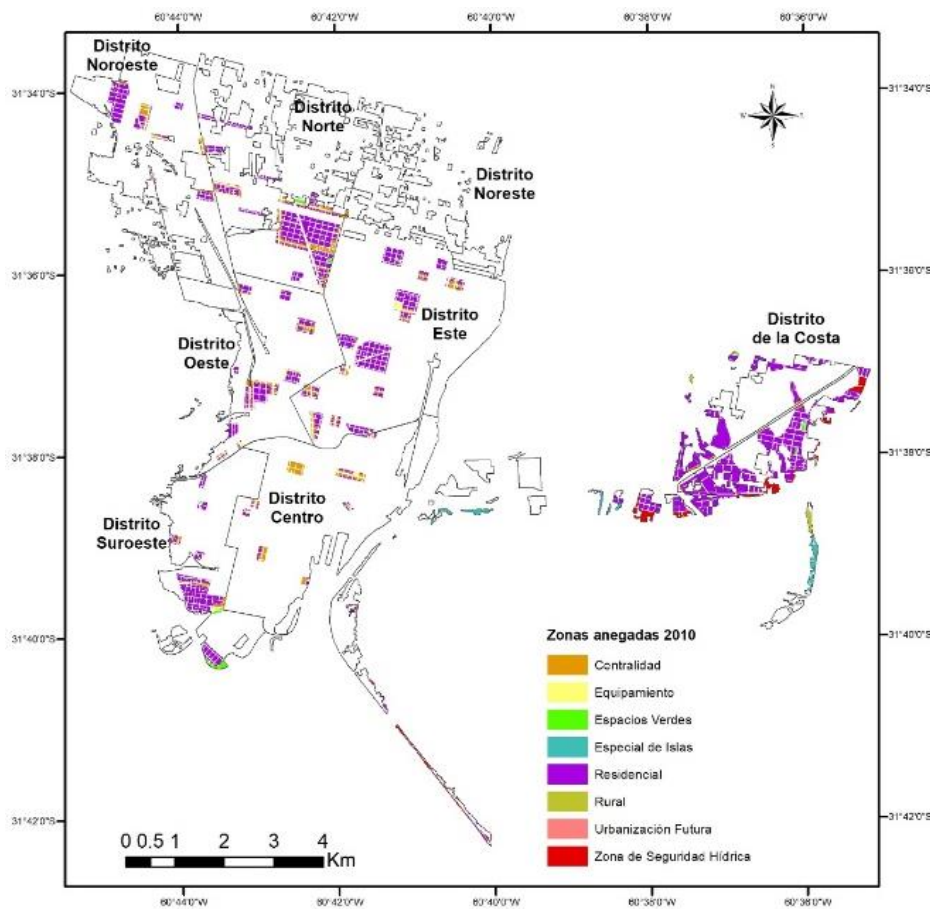


Figura 14. Parcelas afectadas por anegamiento según zonas de usos de suelo en el AUP, Santa Fe 2010 (elaboración propia).

La zona Especial de islas incluye las islas propiamente dichas y los frentes fluviales, que juntamente con la zona de seguridad hídrica son áreas no urbanizables destinadas a obras estructurales de carácter hidrológico y a uso recreativo y deportivo, sin ningún tipo de uso residencial. Por otro lado, la zona Rural, es un área destinada a usos agropecuarios compatibles con la proximidad del medio urbano, como son las quintas de producción familiar. El grado de afección de estas dos zonas en ambos eventos de anegamiento, fue similar al registrado en la zona de seguridad hídrica, debido a que comparten la ubicación en la zona costera con cotas muy bajas.

El área destinada a Urbanización futura, constituye un zona de reserva, pudiendo estar desocupada o bien ocupada por estructuras obsoletas. Este ámbito fue escasamente afectado en ambos eventos de anegamiento, lo cual resalta la acertada previsión al reservar dichos terrenos para el crecimiento futuro de la ciudad.

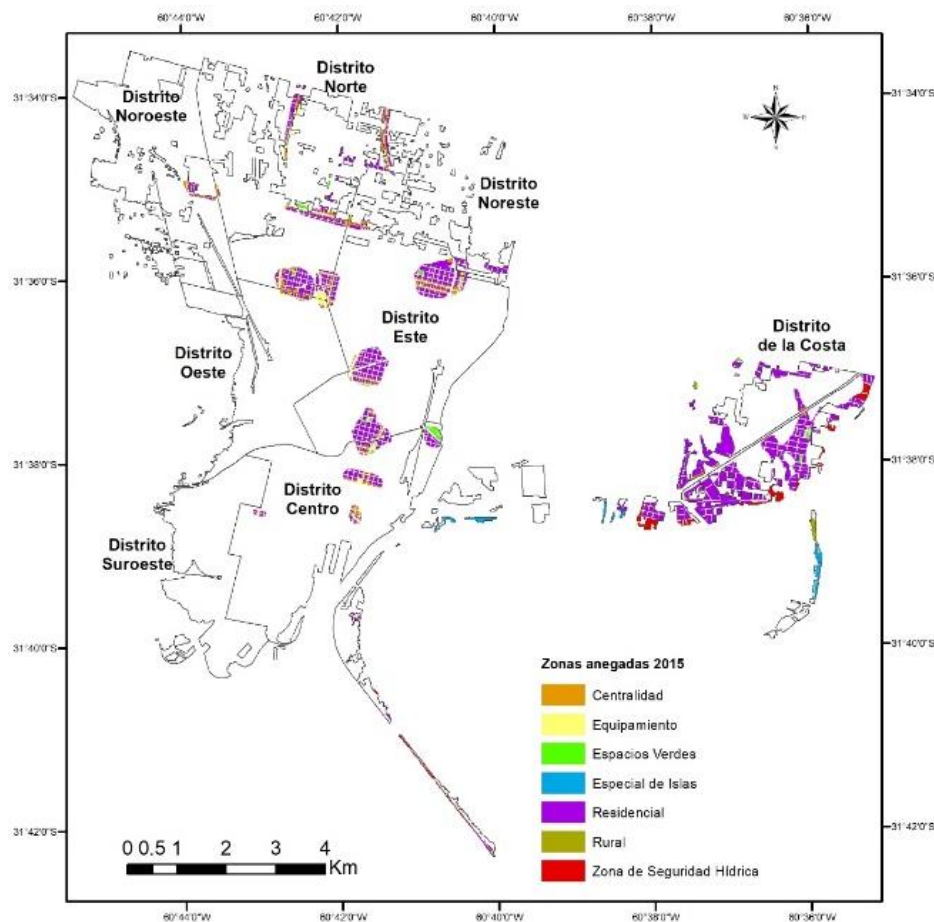


Figura 15. Parcelas afectadas por anegamiento según zonas de usos de suelo en el AUP, Santa Fe 2015 (elaboración propia).

Conclusiones

La ciudad de Santa Fe de la Vera Cruz se ubica entre dos grandes ríos no regulados, con amplios valles de inundación que han sido ocupados por la expansión urbana y sobre una topografía local plana con deficiencias para el escurrimiento de los excesos pluviales (Paoli *et al.*, 2015). Ello hace que las relaciones entre las precipitaciones y los niveles de agua subterránea, así como las hidráulicas entre los acuíferos y los cuerpos de agua superficiales, provoquen eventos críticos para el área urbana poblada. Ésta posee sectores consolidados, que implican cierta pérdida de la capacidad de infiltración del suelo o que impiden el escurrimiento natural de las aguas, lo que les convierte en zonas anegables frente a lluvias intensas que superen los 100 mm.

Junto a esos adversos factores físico-naturales del sitio, otros componentes de origen antrópico como las infraestructuras de protección, actúan circunstancialmente como embalses aumentando los peligros y los impactos de las anegaciones por lluvias.

En este capítulo se ha abordado una detallada caracterización espacial de los eventos de anegamiento de origen pluvial acaecidos en la ciudad en el año 2010 y 2015, diseñando y calculando un conjunto de indicadores más refinados de impacto para dos niveles de desagregación, los distritos administrativos y los radios censales, alusivos a tres atributos significativos: superficie, población y usos del suelo. Los SIG han facilitado cuantificar y visualizar el nivel de afección social y urbanística de los anegamientos de forma más penetrante, completa y aprehensible. Parece oportuno propugnar su adopción en tareas de monitoreo regular de esas adversidades hídrico-urbanas (tanto de origen pluvial, como fluvial).

Los resultados obtenidos han proporcionado un diagnóstico multinivel que desvela las deficiencias de una expansión urbana espontánea y no regulada, y que ignoró peligros naturales como los

hídricos. Se ha detectado así un alivio en la situación de anegamiento pluvial del año 2015 en la zona oeste y en algunas partes difusas de la ciudad, presumiblemente por efecto de las nuevas obras de canalizaciones de efluentes hídricos realizadas luego de los estragos ocurridos en el 2010. La cartografía producida permite orientar medidas ulteriores de planificación y control, singularmente en los sectores donde la vulnerabilidad sea más elevada, cuestión que se ha abordado en otras publicaciones, desvelando posibles injusticias ambientales (Bosisio y Moreno Jiménez, 2019).

Ampliando la perspectiva, nuestros resultados incitan a reclamar acciones preventivas, no solo hacia los riesgos por inundación fluvial, sino también hacia el anegamiento pluvial en el espacio urbano, dado el carácter dinámico del sistema.

Referencias bibliográficas

- Aragón-Durand, F. (2014). *Inundaciones en zonas urbanas de cuencas en América Latina*. Lima, Perú, Editorial Soluciones Prácticas. Recuperado de: <http://www.solucionespracticas.org.pe/Inundaciones-en-zonas-urbanas-de-cuencas-en-America-Latina>
- Bosisio, A. y Moreno Jiménez, A. (2017). Estimación mediante SIG de indicadores de anegamiento urbano por lluvias intensas: un estudio de caso, en Allende Álvarez, F., Cañada Torrecilla, R., Gómez Mediavilla, G., López Estébanez, N., Palacios García, A., Rojo Pérez, F. y Vidal Domínguez, M.J. (Eds.): *Naturaleza, territorio y ciudad en un mundo global, XXV Congreso de Geografía*. Asociación de Geógrafos Españoles (AGE) y Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Madrid (UAM). Madrid, España. DOI:<https://doi.org/10.15366/ntc.2017>
- Bosisio, A. y Moreno Jiménez, A. (2019). Medición de la injusticia ambiental sobre poblaciones vulnerables y carenciadas por anegamientos pluviales: Un análisis en Santa Fe de la Vera Cruz (Argentina) basado en SIG. *Estudios Geográficos*, 80 (287), e020. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201937.017>
- Bosisio, A. y Moreno Jiménez, A. (2020). Análisis espacial de indicadores de vulnerabilidad y privaciones sociales basado en SIG: el caso de Santa Fe de la Vera Cruz (Argentina). *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GeoSIG)*, 12 (17) Sección I: 1-19.
- Celemín, J. P. (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial. Importancia, estructura y aplicación. *Rev. Univ. Geogr.* v.18, n.1, Bahía Blanca-Argentina.
- Douglas, J. (1983). *The urban environment*. London, E. Arnold.
- Fornari, E.; D'Elía, M. y Fedele, A. (2013). Relaciones hidráulicas entre un sistema acuífero y cuerpos de agua superficial en áreas urbanas. En: *XXIV Congreso Nacional del Agua: 1-2*. San Juan, Argentina.
- Goodchild, M. F. (1986). *Spatial autocorrelation. CATMOG - Concepts and Techniques in Modern Geography- 47*. Norwich, UK, Geo Books. 57 pp.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC). (2013). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010: Censo del Bicentenario. Base de datos REDATAM: Definiciones de la base de datos. *Serie Base de datos censo 2010*. Buenos Aires, Argentina.
- Linares, S. (Coord.). (2016). *Soluciones espaciales a problemas sociales urbanos: aplicaciones de tecnologías de la información geográfica a la planificación y gestión municipal*. Tandil, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- Moreno Jiménez, A.; Buzai, G. y Fuenzalida, M. (Coords.). (2017). *Sistemas de información geográfica: aplicaciones en diagnósticos territoriales y decisiones geoambientales*. Madrid, Ra-Ma, 2ª ed. actualizada y aumentada.
- Nasiri, H.; Yusof, M. and Ali, T. (2016). An overview to flood vulnerability assessment methods. *Sustain. Water Resour. Manag.*, 2, 331–336. DOI:10.1007/s40899-016-0051-x

- Olcina Cantos, J. (2008). Cambios en la consideración territorial, conceptual y de método de los riesgos naturales, *Scripta Nova*, XII, 270 (24). Recuperado de: <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-270/sn-270-24.htm>
- Paoli, C.; Dondeynaz, C. y Carmona-Moreno, C. (2015). *Gestión integrada de crecidas: guía y caso de estudio*. European Commission, Joint Research Centre. Luxembourg, Publications Office of the European Union. doi:10.2788/997460
- Paris, M., Pérez, M. y D'Elía, M. (2018). El rol de la Hidrología Subterránea para el logro de la seguridad hídrica. *Cadernos Lab. Xeoloxico de Laxe Coruna*, Vol. 40, 103 – 121. DOI: <https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2018.40.0.4914>
- Rufat, S.; Tate, E.; Burton, C. and Maroof, A. (2015). Social vulnerability to floods: Review of case studies and implications for measurement. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, 470–486. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.09.013>
- Sarma, A.; Singh, V.; Kartha, S. and Bhattacharjya, R. (Eds.). (2016). *Urban hydrology, watershed management and socio-economic aspects*. Switzerland, Springer, DOI 10.1007/978-3-319-40195-9
- Shaake, J. C. (1972). Water and the city, en Detwyler, T. R. y Marcus, M. G. (Eds.): *Urbanization and environment. The physical geography of the city*. Belmont (California), Duxbury Press, 97-133.
- Tompkins, E. y Adger, W. (2003). *Building resilience to climate change through adaptive management of natural resources*. Tyndall Centre for Climate Change Research. Working Paper 27. Recuperado de: <http://www.tyndall.ac.uk/sites/default/files/wp27.pdf>
- Tucci, C. (2007). *Gestión de inundaciones urbanas*. IPH/UFRGS – ABRH – OMM. Porto Alegre, Brasil, Instituto Superior de Recursos Hídricos, y Argentina Universidad Nacional de Córdoba, Recuperado de: <http://www.ina.gov.ar/pdf/Libro-Inundaciones-Urbanas-en-Argentina.pdf>
- Velázquez, G. (2016). *Geografía y calidad de vida en la Argentina: análisis regional y departamental 2010*. Tandil, Argentina, Editorial IGEHCS/CIG, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.

MODELO PREDICTIVO DE LA DISPONIBILIDAD DE BIOMASA DE *Spartina argentinensis* EMPLEANDO IMÁGENES ESPECTRALES DESDE UN DRONE

Emiliano Jozami^{1,2}; Néstor Di Leo^{1,2}; Ivana Barbona¹; Bárbara Civit^{2,3}; Susana Feldman¹

¹Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario, Zavalla, Argentina

² CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina)

³Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza, Argentina

ejozami@unr.edu.ar

Resumen

La producción mundial de biocombustibles está creciendo sostenidamente por distintos factores, entre los cuales se destacan las políticas de fomento para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas al uso de combustibles fósiles. Nuestro equipo analiza la posibilidad de obtener bioenergía a partir de espartillo, *Spartina argentinensis* Parodi (= *Sporobolus spartinus* (Trin.) P.M. Peterson & Saarela), una gramínea perenne con elevadas tasas de crecimiento aún en situaciones de stress por anegamiento o sequía, condiciones frecuentes en los Bajos Submeridionales (Santa Fe, Argentina). La región abarca aproximadamente 3 millones de hectáreas, por lo la cuantificación de la disponibilidad de biomasa requeriría herramientas de teledetección. Las imágenes satelitales presentan baja resolución espacial (Sentinel: 10 m; Landstat: 30 m) por lo cual correlacionar la disponibilidad de biomasa con los índices espectrales es muy complejo. Nuestro objetivo es desarrollar y validar un modelo de estimación de biomasa a partir de índices espectrales de drones que pueda luego extrapolarse a regiones más amplias con imágenes satelitales. Se tomaron 100 muestras de 1 m² en distintas fechas, previa obtención de las imágenes espectrales verde, rojo, borde rojo e infra rojo cercano, con un drone. Las muestras se procesaron separando hojas verdes y senescentes, determinando su peso seco. Se realizaron regresiones lineales en pos de encontrar un modelo predictivo de la biomasa en función de la reflectancia de la bandas evaluadas y de diversos índices derivados a partir de las mismas. Se encontró, para las fechas de primavera, una regresión lineal entre infrarrojo cercano y la biomasa verde ($R^2= 0,37$). Para las muestras otoñales, se encontraron regresiones también entre borde rojo y la biomasa senescente, y borde rojo y la biomasa total ($R^2= 0,47$ y $0,36$ respectivamente).

Palabras clave: vehículos aéreos no tripulados, biomasa disponible, índices espectrales

Introducción

La producción de biocombustibles se encuentra en expansión desde el inicio del siglo XXI a raíz de las distintas políticas de fomento a nivel global que instan a aumentar los cortes de biocombustibles en naftas y gasoil, o mediante la fijación de objetivos de porcentajes de energías renovables a nivel regional (Comunidad Europea) o nacional (Coelho et al., 2021). Incluso se ha dinamizado el comercio internacional de estos biocombustibles (biodiésel, bioetanol, pellets, etc.) en muchos casos con el requisito de demostrar que cumplen con determinados requisitos de sustentabilidad ambiental: i- bajas emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo de la cadena de suministro; ii- no provenir de áreas de reciente deforestación; y iii- no requerir de un cambio en el uso del suelo para su obtención.

Los pastizales naturales han sido evaluados con fines bioenergéticos por investigadores en distintos países, atendiendo a sus ventajas comparativas respecto a otras fuentes de bioenergía (Lu & Zhang, 2013; Sosa et al., 2019; Sulas et al., 2015; Tilman et al., 2006). Son comunidades resilientes que toleran disturbios, que determinan la remoción total de la biomasa como el fuego o la cosecha sin ver afectada la biodiversidad, debido a que las especies dominantes son perennes y presentan yemas de crecimiento debajo de las zonas afectadas por estos disturbios. Incluso muchos de estos pastizales crecen en zonas donde no es factible realizar una actividad productiva como la agricultura o la siembra de pasturas para sostener una mayor producción de ganado vacuno.

En el centro y norte de la provincia de Santa Fe, el sur de la provincia del Chaco y el este de Santiago del Estero se ubica una región denominada “Los Bajos Submeridionales” que abarca alrededor de 3 millones de hectáreas. Se trata de un área con baja densidad poblacional, poco desarrollada donde se dan con frecuencia situaciones de sequía o de anegamiento, dependiendo de las precipitaciones de ese año. La actividad productiva de mayor frecuencia en esta región es la ganadería bovina de cría con muy baja carga animal. En buena parte de esta región, existen comunidades denominadas espartillares donde la especie dominante es *Spartina argentinensis* Parodi (= *Sporobolus spartinus* (Trin.) P.M. Peterson & Saarela).

Comúnmente conocida como espartillo, esta gramínea de metabolismo fotosintético C4 acumula altas cantidades de biomasa de baja digestibilidad que, por consiguiente, no es muy aprovechada por el ganado vacuno. A su vez, esta biomasa dificulta el tránsito del personal (ya sea a pie o más comúnmente a caballo). Por ello, la quema sectorizada del espartillar es una práctica económica y frecuente que trae una serie de ventajas operativas para el manejo ganadero del pastizal: i) limpieza del lote para facilitar el tránsito; ii) estimula el crecimiento de rebrotes de mayor digestibilidad; iii) permite juntar el ganado con facilidad en un sector reducido (Casillo et al., 2013; González, 2004).

Sin embargo, las quemas del pastizal tienen consecuencias negativas tanto a escala regional por el material particulado que afecta a las poblaciones en las adyacencias a las zonas de quema, como a nivel global por la alta emisión de GEI derivada de la combustión de la biomasa. Una alternativa que permitiría a los productores ganaderos en pastizales naturales mantener las ventajas operativas de la quema sin afectar a la salud y al ambiente, sería el corte y remoción de la biomasa. Esa biomasa removida podría ser empleada con fines bioenergéticos agregando valor a este recurso actualmente subutilizado (Jozami et al., 2013; Luisoni, 2010; Luisoni & Bissio, 2014; Mendoza & Ugarte, 2015).

Los Bajos Submeridionales han sido evaluados fitogeográficamente por distintos investigadores encontrándose que en más de 1.600.000 ha (Lewis, Pire, et al., 1990; Lewis, Stofella, et al., 1990), el espartillo es la especie dominante. En un trabajo previo se observó que empleando la biomasa de un tercio de esta área para producir bioetanol, se podría satisfacer con creces la demanda de energía de gasolina para el transporte de la provincia de Santa Fe para lo cual obviamente se necesitarían vehículos adaptados a funcionar exclusivamente con este biocombustible (Jozami et al., 2013)

La biomasa puede ser estimada empleando herramientas de teledetección. Existen un sinnúmero de índices espectrales obtenidos a partir de imágenes satelitales (Friedl et al., 1994; Grigera et al., 2007; Guerini Filho et al., 2020), como desde sensores aerotransportados por vehículos aéreos no tripulados (UAVs – drones) (Villoslada Peciña et al., 2021; Wang et al., 2021; Zhang et al., 2018)

que tienen correlaciones elevadas con la biomasa acumulada. El espartillo, como otras gramíneas perennes, acumula gran cantidad de biomasa senescente, potencialmente aprovechable para la obtención de bioenergía, que queda en pie y que en una eventual cosecha podría ser recolectada junto con la biomasa verde y ser apta para opciones de bioenergía (pellets, gasificación, pirólisis).

Un problema que surge a la hora de intentar estimar biomasa con vegetación senescente, es que la misma resulta más difícil de sensar que la vegetación fotosintéticamente activa, ya que tiende a confundirse con el suelo por no presentar un patrón que pueda ser fácilmente detectable por las cámaras espectrales (C. S. T. Daughtry et al., 2004; Li & Guo, 2018; Tian et al., 2021). Por ello resultaría importante poder encontrar algún índice espectral o modelo que considere dichos índices y que permita estimar la biomasa total de estos ambientes (tanto la senescente como la fotosintéticamente activa)

Existen pocos reportes que evalúen a escala de lote y mucho menos a nivel de región, la biomasa de espartillo. Conocer la disponibilidad de este recurso, permitiría ayudar a la toma de decisión para explotarlo de forma más eficiente. En este contexto, hemos trabajado en espartillares con imágenes espectrales obtenidas desde un dron con el fin de encontrar un modelo que permita estimar la biomasa de esta especie a partir de estas imágenes. Este modelo una vez validado, podría ser escalado a nivel de región empleando imágenes satelitales.

Materiales y métodos

Se trabajó en un espartillar de la Reserva de Usos Múltiples Federico Wildermuth (32° 0,5'S; 61° 24,9' O) en tres fechas con 10 muestras obtenidas en cada una: 15/3/2018; 7/9/2018 y 20/2/2019 y en un espartillar de un establecimiento privado (32°05'11.2"S 61°21'33.6"O) en dos fechas, con 30 muestras obtenidas en cada una: 09/10/2019 y 12/03/2020. En cada fecha se colocaron 10 puntos de muestreo distanciados a 50 m entre sí y delimitados con 4 estacas a las cuales se sujetaron telas amarillas de 50 cm x 100 cm, fácilmente visibles desde el dron. Luego de producido el vuelo en el cual se obtuvieran las imágenes, se realizaron las cosechas de biomasa en algún punto cardinal respecto a la tela (este, norte u oeste) ya que el punto sur fue intervenido para transitar durante las operaciones de colocación de las estacas (Figuras 1 y 2).



Figura 1: Parcelas de muestreo al oeste del paño.

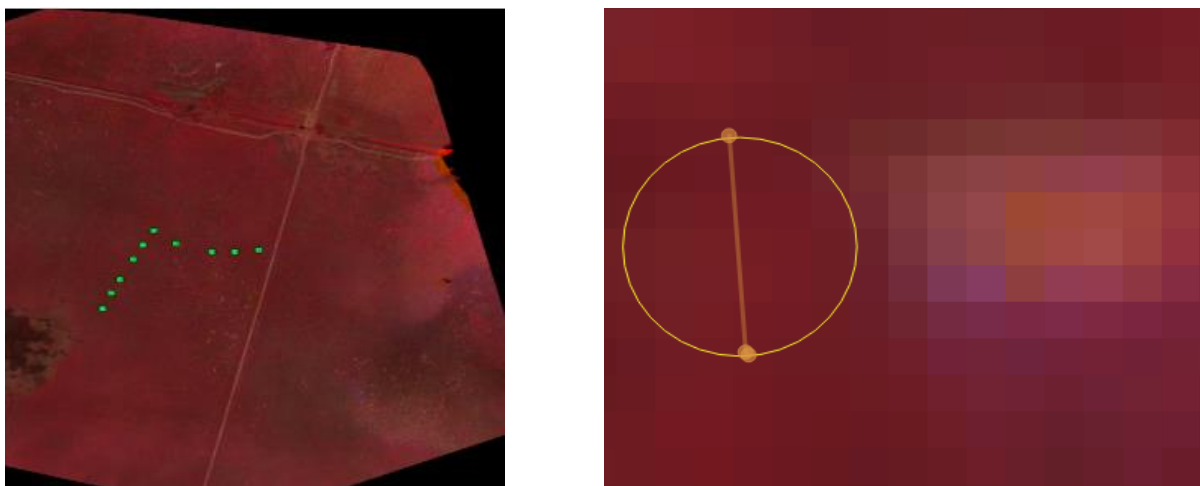


Figura 2: Parcelas de muestreo en Wildermuth (izquierda); imagen del paño y el sector que representaría al área cosechada (derecha)

Se utilizó un dron eBee sensefly de ala fija, realizando un vuelo a 121 m (resolución espacial de 12 cm) y una cámara modelo Parrot Sequoia con 4 canales espectrales: verde, rojo, borde rojo e Infra rojo cercano. En cada fecha se obtuvieron las imágenes del dron a partir del cual se pudieron calcular diversos índices espectrales: NDVI (normalized difference vegetation index); Green_NDVI; NDRE (Normalized difference red edge index); SR (Simple Ratio); GNDVI; GRVI (Green-Red Vegetation Index); CI_green (Chlorophyll Index Green); CI_re (Chlorophyll Red-Edge); PSRI (Plant Senescence Reflectance Index); OSAVI (Optimized Soil Adjusted Vegetation Index); TCARI (Transformed Chlorophyll Absorption Reflectance Index); TCARI/OSAVI; Meris CI (Medium Resolution Imaging Spectrometer - cyanobacteria index); NDWI (Normalized Difference Water Index).

La cosecha de biomasa de *S. argentinensis* en los puntos de muestreo se realizó por encima de los 15-20 cm, dentro de un aro de 1 m² ubicado a 20 cm de la tela amarilla en alguno de los tres puntos cardinales mencionados en el párrafo anterior. Se determinaron pesos húmedo y seco (72 h a 60 °C) de las dos fracciones (hojas verdes y senescentes, Foto 3). Se buscaron las correlaciones entre los índices espectrales mencionados previamente y los datos de biomasa usando el coeficiente de correlación de Pearson.



Foto 3: Muestra procesada en la cual se separaron y pesaron las hojas verdes y las senescentes

Se realizó el diagnóstico de la existencia de valores extremos e influyentes para su exclusión del análisis en base a la distancia de Cook y el gráfico de Residuals vs Leverage.

Resultados

En la tabla 1 se detallan las 4 bandas de las cámaras espectrales montadas sobre el dron y el rango de longitud de onda de las mismas. También se detallan los 15 índices espectrales que fueron considerados junto a las ecuaciones de cada uno y las respectivas referencias bibliográficas.

Tabla 1: bandas e índices espectrales obtenidas del espartillo

Banda/Índice espectral	Ecuación/rango de banda (nm)	Cita
Verde (Gr)	530-570	
Rojo (Rd)	640-680	
Borde Rojo (Re)	730-740	
Infrarrojo cerc. (NIR)	770-810	
i. NDVI	$(\text{NIR}-\text{Rd})/(\text{NIR}+\text{Rd})$	(Rouse et al., 1974)
ii. Green_NDVI	$(\text{Gr}-\text{Rd})/(\text{Gr}+\text{Rd})$	(Baret y Guyot, 1991)
iii. NDRE	$(\text{NIR}-\text{Re})/(\text{NIR}+\text{Re})$	(Barnes et al., 2000)
iv. SR	NIR/Red	(Jordan, 1969)
v. GNDVI	$(\text{NIR}-\text{Gr})/(\text{NIR}+\text{Gr})$	(Louhaichi et al., 2001)
vi. GRVI	NIR/Gr	(Sripada et al., 2005)
vii. CI_green	$(\text{NIR}-\text{Gr})-1$	(Gitelson et al., 2003)
viii. CI_re	$(\text{NIR}/\text{Re})-1$	(Gitelson et al., 2003)
ix. PSRI	$(\text{Rd}-\text{Gr})/\text{NIR}$	(Merzlyak et al., 1999)
x. OSAVI	$(1+0,61)+((\text{NIR}-\text{Rd})/(\text{NIR}+\text{Rd}+0,16))$	(Rondeaux et al., 1996)
xi. TCARI	$3*((\text{Re}-\text{Rd})-0,2*(\text{Re}-\text{Gr})*(\text{Re}/\text{Rd}))$	(Daughtry, 2000)
xii. TCARI/OSAVI	xi/x	(Haboudane et al., 2002)
xiii. Meris CI	$(\text{NIR}-\text{Re})/(\text{Re}-\text{Rd})$	(Dash y Curran, 2004)
xiv. NDWI	$(\text{Gr}-\text{NIR})/(\text{Gr}+\text{NIR})$	(Mc Feeters, 1996)

La disponibilidad de biomasa se encuentra entre 7 y 8 toneladas de materia seca por hectárea (Jozami et al., 2013). Las muestras obtenidas en primavera mostraron una mayor proporción de biomasa senescente (68%), producto de la alta senescencia provocada durante la estación invernal, mientras que en las muestras otoñales el porcentaje fue de 45%.

En ambas estaciones el indicador que mayor correlación presentó fue la banda espectral infrarrojo cercano (Figuras 1, 2 y 3). Llamativamente, en primavera la correlación fue significativa ($p < 0.01$) solo con la biomasa verde con una correlación positiva, mientras que en otoño la correlación fue alta y negativa con la biomasa senescente y la total ($p < 0.01$). En esa estación, la correlación con la biomasa verde fue significativa, pero al 5% ($r = -0,3$)

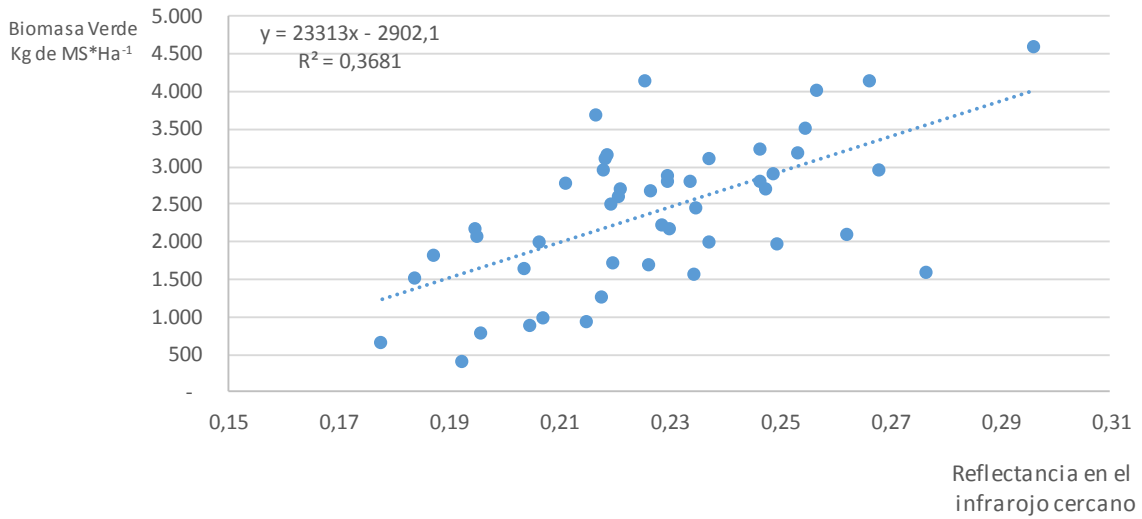


Figura 1: Relación entre la reflectancia en el infra rojo cercano y la biomasa verde en primavera

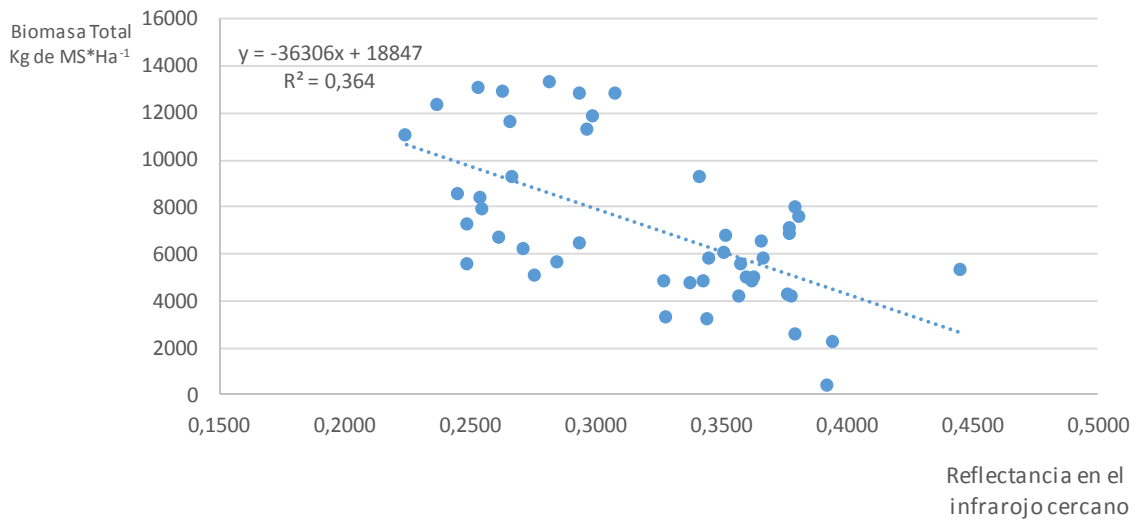


Figura 2: Relación entre la reflectancia en el infra rojo cercano y la biomasa total en otoño.

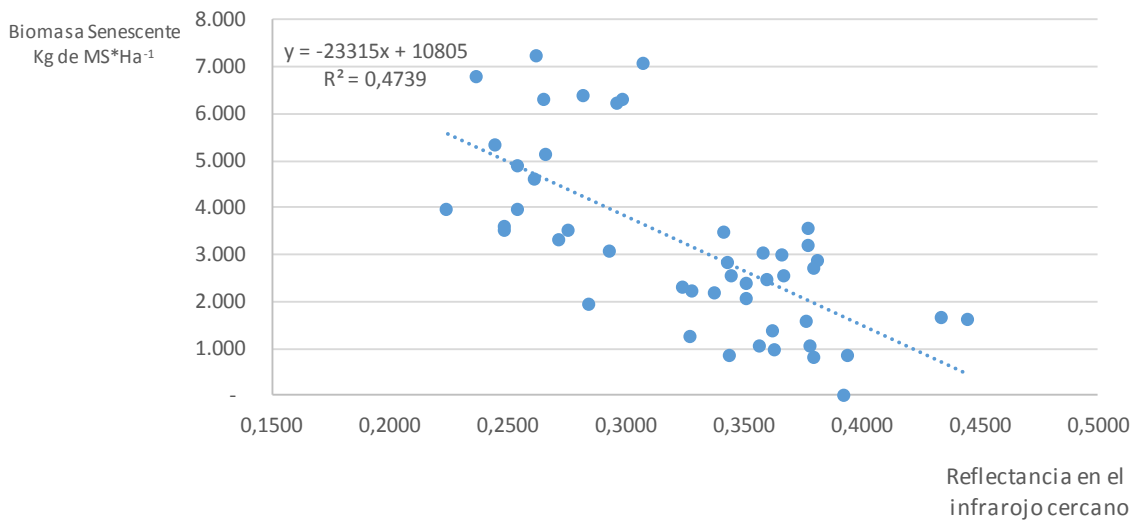


Figura 3: Relación entre la reflectancia en el infra rojo cercano y la biomasa senescente en otoño

Las tablas 2 y 3 muestran las correlaciones entre las bandas e índices espectrales y las fracciones de biomasa de espartillo para otoño y primavera, respectivamente. Se destacan en otoño las correlaciones negativas entre las bandas de borde rojo e infrarrojo cercano con la biomasa senescente y con la biomasa total. En primavera, se puede observar la baja correlación con la biomasa senescente y total de todas las bandas e índices espectrales. La banda infrarrojo cercano mostró correlación positiva significativa con la biomasa verde.

Tabla 2: Correlaciones entre las bandas e índices espectrales y las fracciones de biomasa de *S. argentinensis* en primavera. *Significancia al 5%; **significancia al 1%.

Índice	Biomasa verde	Biomasa Senescente	Biomasa Total
Verde	-0,07	0,26	0,18
Rojo	-0,03	0,18	0,13
Borde Rojo	0,34*	0,20	0,30
Infrarrojo cercano	0,52**	0,02	0,24
NDVI	0,23	-0,15	-0,02
Green_NDVI	-0,05	-0,03	-0,05
NDRE	0,44**	-0,28	-0,04
SR	0,19	-0,14	-0,03
GNDVI	0,47**	-0,22	0,02
GRVI	0,47**	-0,23	0,01
CI_green	0,47**	-0,23	0,01
CI_re	0,44**	-0,28	-0,04
PSRI	-0,03	0,06	0,04
OSAVI	0,30	-0,12	0,03
TCARI	0,20	0,01	0,09
TCARI/OSAVI	0,18	0,02	0,1
Meris CI	0,30	-0,13	0,02
NDWI	-0,47**	0,22	-0,02

Tabla 3: Correlaciones entre las bandas e índices espectrales y las fracciones de biomasa de *S. argentinensis* en otoño. *Significancia al 5%; **significancia al 1%.

Índice	Biomasa verde	Biomasa senescente	Biomasa Total
Verde	-0,35*	-0,28*	-0,35*
Rojo	-0,11	0,25	0,11
Borde Rojo	0,23	0,43**	0,39**
Infrarrojo cercano	-0,31*	-0,65**	-0,56**
NDVI	-0,16	-0,57**	-0,44**
Green_NDVI	-0,22	-0,52**	-0,44**
NDRE	0,01	-0,48**	-0,31*

cont. Tabla 3

SR	-0,19	-0,61**	-0,48**
GNDVI	-0,10	-0,55**	-0,40**
GRVI	-0,12	-0,58**	-0,43**
CI_green	-0,12	-0,58**	-0,43**
CI_re	0,00	-0,49**	-0,31*
PSRI	0,19	0,43**	0,36**
OSAVI	-0,22	-0,61**	-0,49**
TCARI	-0,28	-0,21	-0,27
TCARI/OSAVI	-0,23	-0,02	-0,12
Meris CI	0,20	-0,11	0,02
NDWI	0,08	0,55**	0,39**

Discusión

A pesar de su aparente homogeneidad, los pastizales presentan alta heterogeneidad debido a micro-diferencias del relieve, fenología de las especies dominantes y sus acompañantes, disturbios (herbivoría, fuego) y características de las especies perennes en relación a su capacidad, o no, de retener hojas senescentes a lo largo de períodos de distinta duración. Esta heterogeneidad podría ser uno de los principales factores que inciden en que las correlaciones entre diversos índices y la biomasa total no supere 0.6.

González Trilla et al. (2016), trabajaron con plantas de *Spartina densiflora* en la costa de la laguna de Mar Chiquita analizando la reflectancia con un espectrofotómetro sobre plantas individuales sometidas a cortes manuales de las mismas. Encontraron correlaciones significativas similares a las del presente trabajo, con la salvedad que en ese caso, los valores reportados corresponden a índices espectrales y no a bandas. En nuestra investigación, la mayor correlación se obtuvo tanto en primavera como en otoño, con la banda del infrarrojo cercano. Cabe resaltar que la resolución espectral del espectrofotómetro, analizada en el trabajo mencionado es muy superior a la de las cámaras espectrales montadas sobre el dron en presente trabajo.

Guerini Filho et al. (2020), trabajando en pastizales naturales del sur de Brasil, estimaron la biomasa verde y senescente con modelos lineales de regresión múltiple utilizando las bandas espectrales del satélite Sentinel como variables explicativas. El modelo pudo explicar el 51% y 65% de la variabilidad de la biomasa verde luego de 375 y 750 grados días luego del pastoreo, respectivamente. En ambos intervalos, los modelos presentaron valores de R^2 inferiores a 0,5 para la biomasa senescente en coincidencia con nuestros resultados. Las regresiones lineales obtenidas en nuestro trabajo permitieron obtener regresiones superiores a las del trabajo citado.

Conclusiones

En el presente trabajo se han encontrado correlaciones similares a las de otros trabajos pero trabajando en este caso a una escala de mayor resolución espacial y con una especie perenne nativa de la cual no existe información sobre su producción de biomasa más allá de ensayos de producción de pequeñas superficies. Este trabajo es una primera aproximación a escala de lote, que será de utilidad para futuros relevamientos que se puedan hacer en mayores superficies.

Este equipo de trabajo está analizando también mediante datos de espectrofotometría, la posibilidad de encontrar rangos de longitudes de onda dentro del espectro electromagnético, que sean sensibles a la disponibilidad de biomasa de espartillo (tanto verde como senescente). Esto

permitirá diseñar estrategias para lograr mejores estimaciones de biomasa de este valioso recurso actualmente subutilizado.

Referencias bibliográficas

- Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35(2-3), 161-173. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90009-U](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U)
- Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. R., Colaizzi, P. D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., Thompson, T., Lascano, R. J., Li, H., & Moran, M. S. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. En ASA-CSSA-SSSA (Ed.), *the fifth international conference on precision agriculture and other resource management* (pp. 1-15).
- Casillo, J., Di, A. G., Marino, G. D., & Kunst, C. R. (2013). *Quemas controladas en pastizales: Una herramienta para el manejo de conservacionistas*. <https://www.engormix.com/ganaderia-carne/articulos/quemas-controladas-pastizales-herramienta-t30447.htm>
- Coelho, S. T., Perecin, D., Rei, F., Escobar, J. F., Freiria, R. C., & Kimura, W. J. (2021). Bioenergy Policies Worldwide. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00040-6>
- Dash, J., & Curran, P. J. (2004). The MERIS terrestrial chlorophyll index. *International Journal of Remote Sensing*, 25(23), 5403-5413. <https://doi.org/10.1080/0143116042000274015>
- Daughtry, C. (2000). Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 74(2), 229-239. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00113-9)
- Daughtry, C. S. T., Hunt, E. R., & McMurtrey, J. E. (2004). Assessing crop residue cover using shortwave infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 90(1), 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.023>
- Friedl, M. A., Schimel, D. S., Michaelsen, J., Davis, F. W., & Walker, H. (1994). Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 15(7), 1401-1420. <https://doi.org/10.1080/01431169408954174>
- Gitelson, A. A., Viña, A., Arkebauer, T. J., Rundquist, D. C., Keydan, G., & Leavitt, B. (2003). Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophysical Research Letters*, 30(5), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2002GL016450>
- González, C., Abril, A., & Vollenweider, J. J. (2004). Efecto De Una Quema Prescripta De Pastizales Nativos Sobre Los Procesos Biológicos Del Suelo. *Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba*, 24, 207-215.
- González Trilla, G., Pratolongo, P., Kandus, P., Beget, M. E., Di Bella, C., & Marcovecchio, J. (2016). Relationship Between Biophysical Parameters and Synthetic Indices Derived from Hyperspectral Field Data in a Salt Marsh from Buenos Aires Province, Argentina. *Wetlands*, 36(1), 185-194. <https://doi.org/10.1007/s13157-015-0715-6>
- Grigera, G., Oesterheld, M., & Pacín, F. (2007). Monitoring forage production for farmers' decision making. *Agricultural Systems*, 94(3), 637-648. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.01.001>
- Guerini Filho, M., Kuplich, T. M., & Quadros, F. L. F. De. (2020). Estimating natural grassland biomass by vegetation indices using Sentinel 2 remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 41(8), 2861-2876. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1697004>
- Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P. J., & Dextraze, L. (2002). Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3), 416-426. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4)

- Jordan, C. F. (1969). Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*, 50(4), 663-666. <https://doi.org/10.2307/1936256>
- Jozami, E., Sosa, L. L., & Feldman, S. R. (2013). *Spartina argentinensis* as feedstock for bioethanol. *Applied Technologies & Innovations*, 9(2), 37-44.
- Lewis, J. P., Pire, E. A., Prado, D. E., Stofella, S. L., Franceschi, E. A., & Carnevale, N. J. (1990). Plant communities and phytogeographical position of a large depression in the Great Chaco, Argentina. *Vegetatio*, 86(1), 25-38. <https://doi.org/10.1007/BF00045133>
- Lewis, J. P., Stofella, S. L., Pire, E. F., Franceschi, E. A., Carnevale, N. J., & Prado, D. E. (1990). Dynamics and Development of Floristic Richness in the Vegetation of a Large Depressed Area of the Great Chaco. *Flora*, 184(1), 63-77. [https://doi.org/10.1016/s0367-2530\(17\)31590-6](https://doi.org/10.1016/s0367-2530(17)31590-6)
- Li, Z., & Guo, X. (2018). Non-photosynthetic vegetation biomass estimation in semiarid Canadian mixed grasslands using ground hyperspectral data, Landsat 8 OLI, and Sentinel-2 images. *International Journal of Remote Sensing*, 39(20), 6893-6913. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1468105>
- Louhaichi, M., Borman, M. M., & Johnson, D. E. (2001). Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat. *Geocarto International*, 16(1), 65-70. <https://doi.org/10.1080/10106040108542184>
- Lu, J. B., & Zhang, Y. (2013). Spatial distribution of an invasive plant *Spartina alterniflora* and its potential as biofuels in China. *Ecological Engineering*, 52, 175-181. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.107>
- Luisoni, L. H. (2010). Tecnología de utilización de pajonales para el mejoramiento de la cría y recría. En 3º Jornada IPCVA en Campo Hardy (S. Fe). *Cartilla*.
- Luisoni, L. H., & Bissio, J. C. (2014). *Producción y Calidad de Forraje de un Pajonal de Spartina argentinensis(Trin.) Parodí, Luego de la Quema*. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_produccion_y_calidad_de_forraje_de_pajonal_espar.pdf
- Mc Feeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mendoza, L. G., & Ugarte, C. C. (2015). Espartillo: una oportunidad de doble propósito. En *Voces y Ecos N°34*. INTA ediciones. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_voces_y_ecos_no_34_8espartillo_una_oportunidad_de_doble_proposito.pdf
- Merzlyak, M. N., Gitelson, A. A., Chivkunova, O. B., & Rakitin, V. Y. (1999). Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 106(1), 135-141. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x>
- Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 95-107. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation*. Recuperado de <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19740008955>
- Sosa, L. L., Jozami, E., Oakley, L. J., Montero, G. A., Ferreras, L. A., Venturi, G., & Feldman, S. R. (2019). Using C4 perennial rangeland grasses for bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 128, 105299. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105299>
- Sripada, R. P., Heiniger, R. W., White, J. G., & Weisz, R. (2005). Aerial Color Infrared Photography for Determining Late-Season Nitrogen Requirements in Corn. *Agronomy Journal*, 97(5), 1443-1451. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0314>

- Sulas, L., Franca, A., Sanna, F., Re, G. a., Melis, R., & Porqueddu, C. (2015). Biomass characteristics in Mediterranean populations of *Piptatherum miliaceum*—A native perennial grass species for bioenergy. *Industrial Crops and Products*, 75, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.07.014>
- Tian, J., Su, S., Tian, Q., Zhan, W., Xi, Y., & Wang, N. (2021). A novel spectral index for estimating fractional cover of non-photosynthetic vegetation using near-infrared bands of Sentinel satellite. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 101, 102361. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102361>
- Tilman, D., Hill, J., & Lehman, C. (2006). Carbon-Negative Biofuels from Low-Input High-Diversity Grassland Biomass. *Science (New York, N.Y.)*, 314(5805), 1598-1600. <https://doi.org/10.1126/science.1133306>
- Villoslada Peciña, M., Bergamo, T. F., Ward, R. D., Joyce, C. B., & Sepp, K. (2021). A novel UAV-based approach for biomass prediction and grassland structure assessment in coastal meadows. *Ecological Indicators*, 122, 107227. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107227>
- Wang, T., Liu, Y., Wang, M., Fan, Q., Tian, H., Qiao, X., & Li, Y. (2021). Applications of UAS in Crop Biomass Monitoring: A Review. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.616689>
- Zhang, H., Sun, Y., Chang, L., Qin, Y., Chen, J., Qin, Y., Du, J., Yi, S., & Wang, Y. (2018). Estimation of Grassland Canopy Height and Aboveground Biomass at the Quadrat Scale Using Unmanned Aerial Vehicle. *Remote Sensing*, 10(6), 851. <https://doi.org/10.3390/rs10060851>

PAISAJE E IN-CON-FORMIDAD: FRICCIONES ENTRE LA INTELIGENICA ARTIFICIAL Y LA HUMANA

Pedro Ferrazini; Ana Valderrama

*Facultad de Arquitectura Planeamiento y Diseño, Universidad Nacional de Rosario, Rosario,
Argentina.*

pedro.ferrazini@fapyd.unr.edu.ar

Resumen

El relato científico de la naturaleza ha modificado significativamente la idea de naturaleza y de paisaje en las últimas décadas, desplazando el paradigma de “equilibrio” por el paradigma “dinámico” asociado al actual concepto de Resiliencia (Valderrama, 2019). Este paradigma supone que la naturaleza es dinámica, que las disrupciones son parte de los sistemas y no accidentes, y que el estado normal de la naturaleza es un tránsito inestable con permanentes re-ajustes y re-adaptaciones. Si bien las disciplinas de la arquitectura y el urbanismo no han asimilado aún estas contribuciones, si lo han hecho la ecología del paisaje, la arquitectura del paisaje, las ingenierías hidráulicas, las cuales han desarrollado métodos, instrumentos y técnicas de medición, descripción y proyección, modelos matemáticos, simulaciones experimentales y diagramas.

El presente capítulo explora las posibilidades de modelos de inteligencia artificial en la detección y descripción de patrones, de configuración y evolución del paisaje. El objetivo es verificar si es posible concebir artefactos “responsivos” (arquitecturas, ciudades, elementos) capaces de catalizar procesos y propiciar una interacción mutua con el paisaje. El motivo de la investigación se asienta en la detección de un agotamiento de los modelos disciplinares referidos al proceso de determinación y producción de artefactos, al concepto de paisaje, y a la consecuente relación entre ambos. En este sentido, las disciplinas de la arquitectura y el urbanismo han sostenido una conceptualización del paisaje como naturaleza ordenada, completamente determinada, estable y predecible. Consecuentemente se ha recostado en el modelo de “composición formal” donde la relación entre artefactos y paisaje se reduce a una operación de “colocación”.

Palabras clave: inteligencia artificial, artefactos, responsabilidad, patrones

¿Que es una imagen? Relaciones entre datos y afectación.

Este capítulo está planteado como un esquema de conocimientos técnicos rizomáticos en el cual se puede partir casi de cualquier punto. La novedad, es la inserción de una herramienta y una técnica que logra hacer un aporte considerable en cuanto a calidad, tiempos, precisión, pero que paradójicamente no busca aportar optimización.

En estos últimos diez o quince años el fenómeno de las redes sociales, Instagram, Facebook, sistemas de mensajería tales como Whatsapp y Messenger, Google (el motor de búsqueda más

potente del mundo); han puesto a disposición de la humanidad una cantidad abrumadora y matemáticamente sublime de Imágenes (Kant, 1764). Estamos siendo todo el tiempo bombardeados por imágenes; que requeridas o no, están siendo expuestas frente a nuestros ojos afectando nuestro entendimiento de las cosas y por ende nuestra toma de decisiones.

Consideramos que para el entendimiento del capítulo es necesario establecer qué es una imagen digital. En este caso vamos a apelar a una reducción técnica: una imagen es una grilla de dos dimensiones (al menos en este caso), compuesta por píxeles, el valor final de cada pixel es la sumatoria de valores en RGB o en CMYK que va de 0 a 256 en cada letra, es decir 0 a 256 para R, 0 a 256 para G y así para cada letra. Además la imagen cuenta con una profundidad de bits y resolución específicos. Esta descripción se asemeja más a la descripción de una hoja de cálculos que a una fotografía, una diferencia que retomaremos más adelante en el capítulo. Así mismo, vale destacar que: quienes les otorgamos valor de imagen, quienes nos vemos afectados, quienes le otorgamos algún significado y entendimiento a esa hoja de cálculos que se muestra a través de una pantalla; somos quienes estamos del otro lado interpretándolas.

Esta cuestión técnica sin duda convierte estos archivos (de extensión sencilla: .jpg .png .jpeg) en imágenes que pueden ser matemáticamente calculables, tanto individualmente como en paquetes de millones. En líneas generales la Inteligencia Artificial basada en imágenes está relacionada a la identificación y evaluación de coincidencias de patrones matemáticos cuyas características técnicas acabamos de describir. Podemos decir que la “Inteligencia” del sistema es reconocer patrones matemáticos, pero que a su vez esos patrones signifiquen algo para quien interpreta la imagen. En otras palabras, si un modelo de IA entrena imágenes, pero luego ese resultado no tiene sentido para quien lo interpreta. Entonces será solo un buen cálculo matemático pero no contará con la cualidad de ser inteligente al conformar un diálogo o vínculo con su intérprete. La clave de estos sistemas es generar una “conversación” en lenguaje de imágenes con quien es el “curador” de los datasets que serán procesados por la inteligencia artificial. El rol del curador es alimentar el sistema con una intención latente que será procesada, en términos de datos. El sistema producirá la transformación necesaria para que vuelva a ser entendido por el intérprete. Quien interpreta deberá entender lo que está sucediendo técnicamente dentro del sistema para hacer los ajustes necesarios en los datasets para que el sistema vuelva a comprender la línea de transformación de patrones. Se trata de generar una inteligencia entre el sistema y curador/a capaz de lograr los objetivos planteados al principio del diálogo.

La cibernética forma parte de un paradigma científico más amplio que el de las máquinas mecánicas. A diferencia de las máquinas, en su concepción mecánica lineal, la cibernética se basa en una causalidad circular, es decir puede volver a relacionar etapas previas. Esto mediante estructuras recursivas. Similar a la inteligencia del ser humano que permite evaluar eventos, acumular experiencia y re-establecer nuevos modos de ejecutar procesos para llegar al objetivo deseado. (Hui, Y. y Lima, T. 2020).

CycleGan: Modelo de Inteligencia Artificial no supervisada.

Actualmente las ciencias exactas, sociales, naturales, artísticas, están siendo atravesadas por herramientas, códigos, sistemas, que contienen Inteligencia Artificial en sus procesos. Aún así, la mayor inversión en desarrollo de aplicaciones se encuentra ligada a la búsqueda de optimización, y la delegación en la toma de decisiones relacionadas al mundo corporativo empresarial, sistemas de seguridad de reconocimiento facial, sistemas de conducción asistidos/automatizados. La pregunta que emerge rápidamente es: ¿Qué puede hacer esta tecnología en nuestra disciplina?.

Desde 2018, hemos estado trabajando junto a colegas con una red neuronal de generación adversaria que se denomina CycleGAN²⁴ y que funciona en un ambiente de Anaconda y bajo el lenguaje python. Este modelo de IA tiene la principal característica de tener una doble entrada de

24 Zhu, J. Y., Park, T., Isola, P., & Efros, A. A. (2017). Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks. In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision (pp. 2223-2232).

alimentación pero con la particularidad de que, a diferencia de otros modelos como Pix2Pix, éste no funciona con sistemas de a pares. La red neuronal se encarga de la interpretación entre dos grupos abultados de imágenes (pueden entrenarse en una computadora tipo gamer (GPU: Nvidia Ge-force 2080ti 12gb Vram), hasta 2000 vs 2000 imágenes en menos de 24 hs y testearse aproximadamente en 3 minutos), de manera automática y calculando las relaciones entre sí mismo. Es decir, lo que se hace es llenar una carpeta “trainA” de imágenes, por ejemplo, de caballos y otra carpeta “trainB” de imágenes de zebras. El sistema intentará comparar, en términos matemáticos, una imagen de la carpeta A versus otra de la carpeta B y viceversa, sacará conclusiones y luego intentará realizar la transformación. De esta manera, el resultado de la imagen que sale de la carpeta A pueda insertarse en la carpeta B sin que el “discriminador” se de cuenta que en realidad pertenece a la carpeta A.

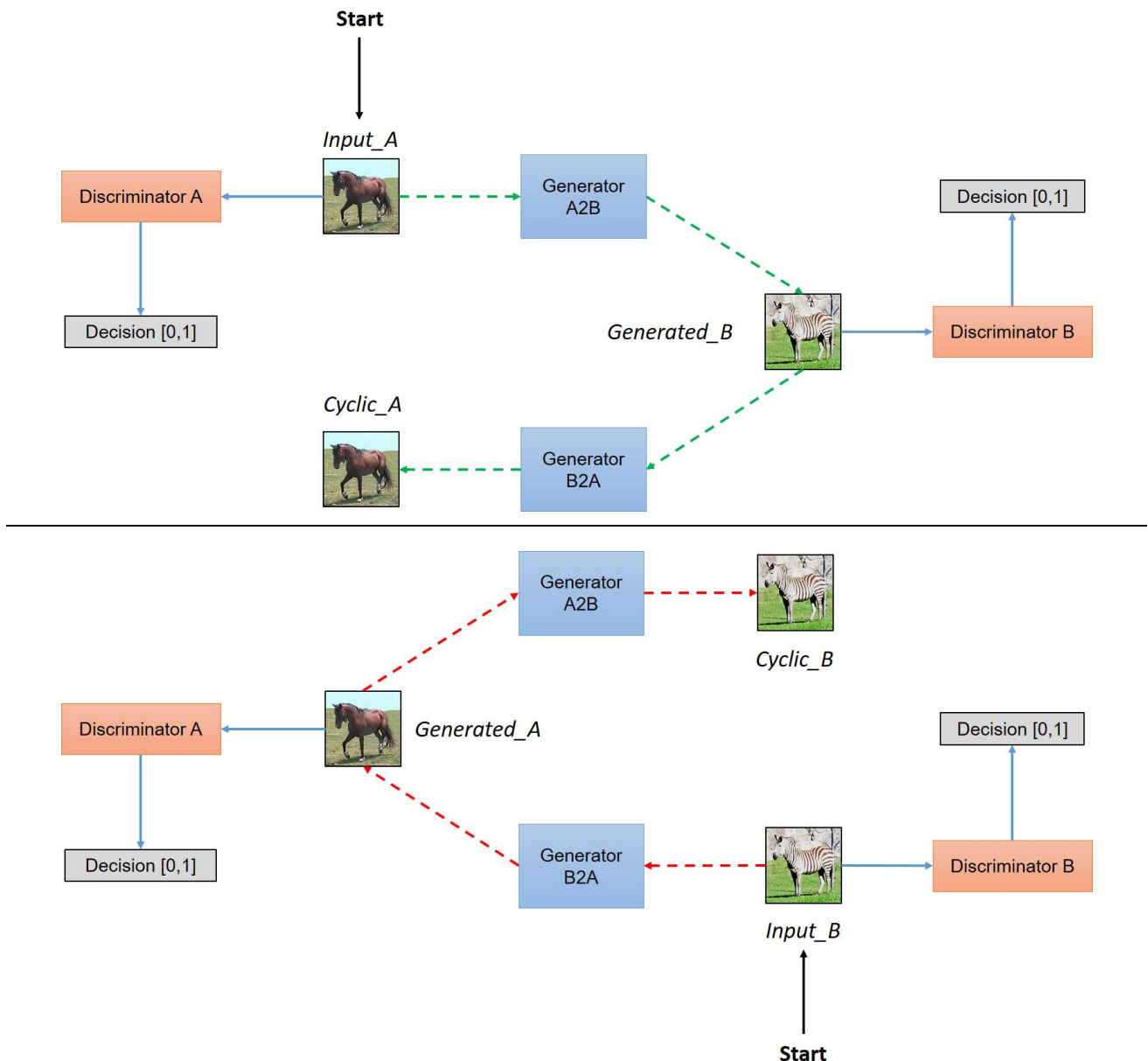


Figura 1: Vista simplificada de la arquitectura de CycleGAN. Fuente: <https://hardikbansal.github.io/CycleGANBlog/>

Cuando esta transformación sucede con éxito, lo que tenemos es un resultado en el cual la imagen de partida (en caso de que solo tomemos una sola) conserva rasgos de su patrones

originales pero una transformación suficiente para adoptar las características distintivas (en patrones numéricos) que el curador/a entenderá como imagen.

Si bien CycleGAN ha sido desde el 2017 en adelante una revolución dentro de los modelos sencillos de Inteligencia Artificial, al mismo tiempo permitió democratizar el acceso a esta tecnología, y funcionó como un punto de acceso para disciplinas como la Arquitectura, Arquitectura del paisaje, y todas las ramas del diseño. La novedad subyace principalmente en la capacidad de producir cientos de miles de imágenes de manera muy sencilla y rápida, pero no por eso imprecisas. Justamente lo que sorprende en este caso es el nivel de nitidez y precisión con la que podemos controlar estas transformaciones sin necesidad de acceder al código del modelo de inteligencia artificial, lo que hace para las disciplinas mencionadas previamente que, contrario a lo que se supone, no se utilice la IA como una herramienta de optimización, sino como una herramienta de evaluación de posibilitantes y procesos proyectuales.

Paisaje y artefactos

Esta corriente de disciplinas reflexionando y operando sobre el paisaje interpelan constantemente las definiciones tradicionales de naturaleza e invitan a repensar nuestra disciplina. Es decir, el paisaje ya no es más considerado una cosa terminada, estable y quieta, sino un PROCESO que evoluciona en el tiempo, producto de negociaciones permanentes. Este modo de “operar” gestionando una negociación entre los procesos naturales y los artefactos marcaron el desarrollo de la arquitectura del paisaje en los últimos años. A partir de esta irrupción, diversos arquitectos del paisaje tales como James Corner, han desarrollado una serie de métodos y herramientas para estudiar, medir, describir, ilustrar y proyectar procesos en el tiempo.

A partir de la conceptualización del proyecto y el paisaje, ambos como procesos, el equipo de ha llevado adelante sucesivas investigaciones desde el año 2011, desarrollando diferentes metodologías y herramientas que han permitido acercar las brechas formales y procesuales entre artefactos y paisajes, propiciando mayores interacciones y contaminaciones. Desde el año 2013 comenzamos a transferir diferentes técnicas de lecturas del paisaje extraídas de las disciplinas de Ecología del Paisaje y Morfodinámica de Ríos, incluyendo fases experimentales de simulación de la evolución de procesos, así como catálogos, colecciones, mapas y diagramas para detectar patrones. Las conclusiones de estos estudios fueron luego volcadas como material de base para el desarrollo de artefactos que intentaron incorporar, en los procesos de gestación, las lógicas de formación y transformación de los paisajes. Si bien a partir de los proyectos de investigación anteriores se había logrado una mejor adecuación de los proyectos al lugar, advertimos que para lograr una mejor organicidad o responsividad en los artefactos respecto a los paisajes es necesario avanzar en una mayor precisión de la descripción de los patrones y procesos que configuran los paisajes y una mayor sistematización del proceso de determinación de los artefactos.

Tanto el proyecto de investigación, como el espacio curricular optativo sugieren que es posible desarrollar artefactos, sistemas y arquitectura “responsivos/as” en la medida que estos se conciben desde las propias lógicas de formación y transformación de los paisajes. Los/as estudiantes pudieron optar entre trabajar en imágenes satelitales, fachadas o plantas y secciones, todas ellas traducidas en imágenes. En paralelo, pero relacionado al entendimiento técnico de la herramienta y a los resultados de las primeras especulaciones, se desarrolla un argumento o línea de investigación que les permite profundizar la exploración acerca de los límites del sistema de Inteligencia Artificial. Los resultados de los estudiantes han sido amplios en temas y variados en sus escalas, demostrando diversas posibilidades de imágenes, arquitecturas e infraestructuras que trans-forman los paisajes intervenidos. Abarcando problemáticas que tienen que ver con recursos naturales, adaptación de tramas urbanas, cultura, tipologías, desarrollo de herramientas.

Casos

Caso 1: Carrera de Arquitectura y Estudios Urbanos – Universidad Torcuato Di Tella. Materia: Imágenes e Ideas. Título del Curso: OxymoronShake. Profesor: Marcos Dana. Adjunto: Pedro Ferrazini. Título del Trabajo: Configuraciones Territoriales. Subtítulo del Trabajo: Magnificación Transcalar. Estudiantes: Delfina Fernandez, Lorenzo Lacava. Año: 2021

El ejercicio propone trabajar con tres cánones. Cada canon representa un elemento a ser interpretado por la inteligencia artificial en relación al resto de los cánones, estableciendo de ese modo un ejercicio no lineal.

La línea de investigación está centrada principalmente en el proceso de configuración y transformación de un territorio. Partiendo de imágenes satelitales rurales se intenta entender sus topografías mediante la transformación hacia un dataset de morfologías finas de hilos de seda, permitiendo así mapear el territorio y, de alguna manera simular su configuración.

En el siguiente paso, se añade una variante arquitectónica, plantas circulares de arquitectura, esperando que los patrones que existen en el paisaje de alguna manera permitan la inserción de elementos geométricos que permitan definir la inserción de plantas de arquitecturas a la antropización arquitectónica del paisaje.

Canon 01_Plano 00_Geografías Satelitales_Land's Arena: tramas y patrones de distintos tipos de geografías naturales y rurales, entendiendo a las mismas como plantas de extensa magnitud, donde sus topografías generan flujos de tierra ondeantes, picos quebradizos, canales de agua, campos rurales, etc.

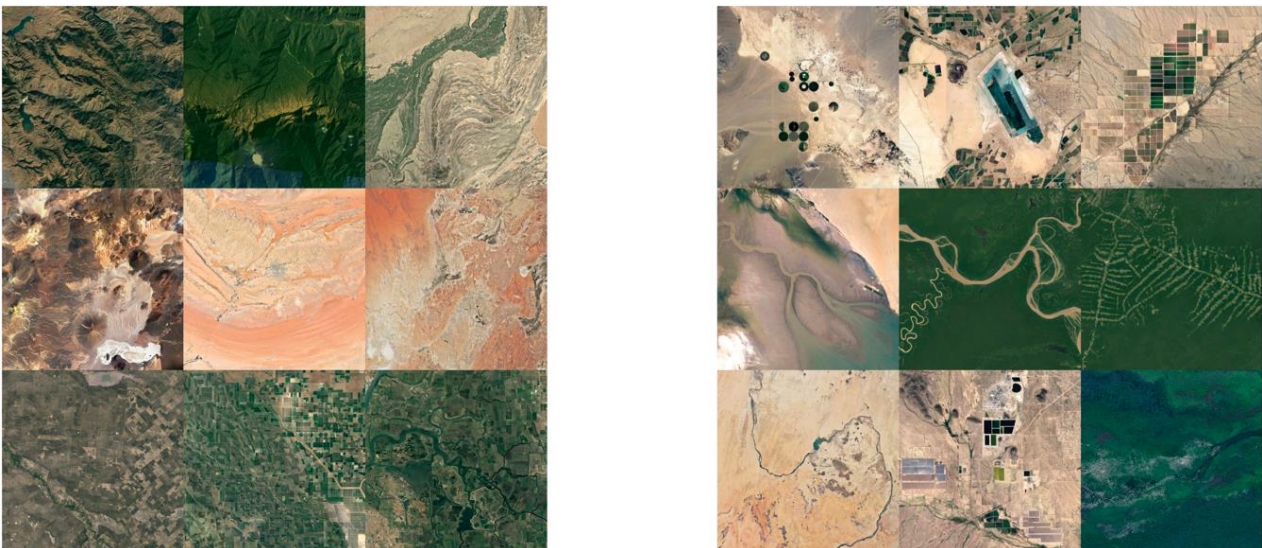


Figura 2: Delfina Fernandez, Lorenzo Lacava. (2021). Imagen/es: Canon 01. Plano 00. Geografías Satelitales. Land's Arena. Imágenes representativas de dataset.

Canon 02_Canon Analógico_Hilos de Seda_Fluidity: recopilación de imágenes con un fondo muy marcado, por lo general negro, de figuras ondulantes como hilos blancos de seda. Esto nos permite entender la formación topográfica de las distintas geografías satelitales.

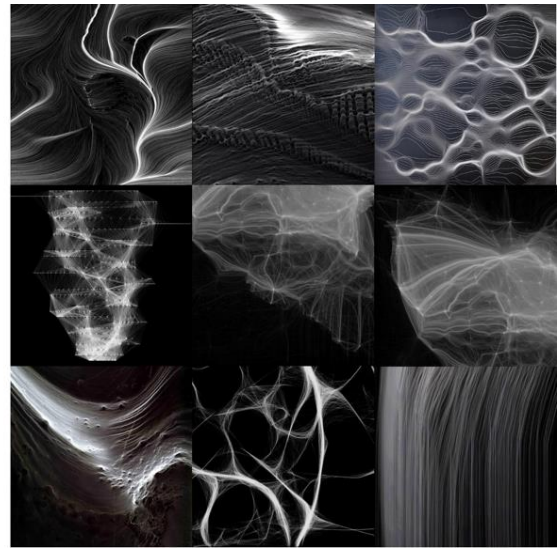
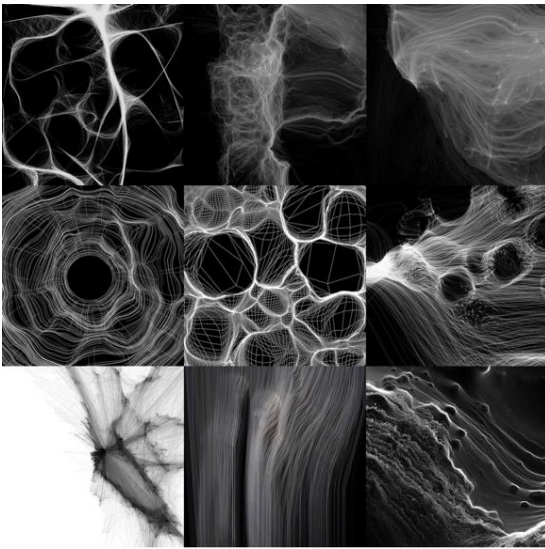


Figura 3: Delfina Fernandez, Lorenzo Lacava. (2021). Imagen/es: Canon 02. Canon Analógico. Hilos de Seda. Fluidity. Imágenes representativas de dataset.

Canon 03_Canon Arquitectónico_Plantas Arquitectónicas_Divisional Organization: plantas arquitectónicas de un perímetro definido, de forma pura, circular o regular.

Además, identificamos distintos tipos de organizaciones dentro de ellas: organizaciones radiales, concéntricas, partitivas, de muros perpendiculares al perímetro, en porciones, picudas, etc.

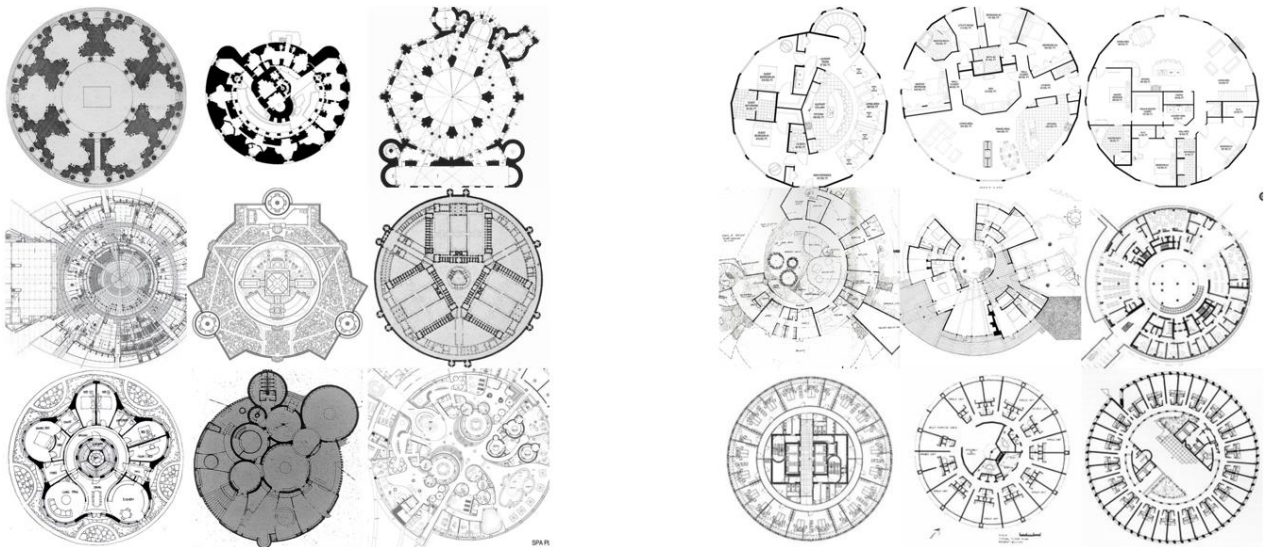


Figura 4: Delfina Fernandez, Lorenzo Lacava. (2021). Imagen/es: Canon 03. Canon Arquitectónico. Plantas Arquitectónicas. Divisional Organization. Imágenes representativas de dataset.

Canon 01 + 02: De las distintas geografías sacamos ventaja de los patrones y flujos de materia para mapear y configurar los territorios topográficos. Los resultados que obtenemos son como mapas de cotas de nivel, de mapeos territoriales casi analógicos.

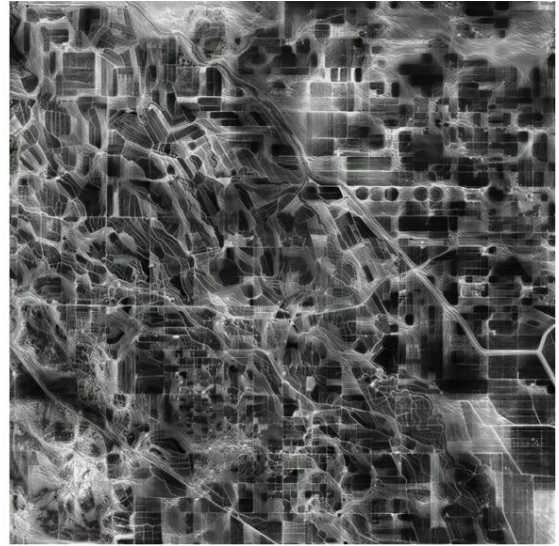


Figura 5: Delfina Fernández, Lorenzo Lacava. (2021). Imagen/es: Canon 01 + 02. Transcanon 01.

Transcanon1 + Canon 03: Se agrega al dataset la variante arquitectónica y ahora esta configuración territorial la convertimos en organizaciones murarias. El resultado que obtenemos es más que una arquitectura urbana, configurando así nuevos espacios arquitectónicos a partir de organización agrícola. El resultado es una masa continua de organización arquitectónica, habiendo perdido el carácter o cualidad de la solamente de una topografía geográfica antropizada, perdimos las pasturas, la tierra, el agua. Creamos civilizaciones, sociedades, ciudades.

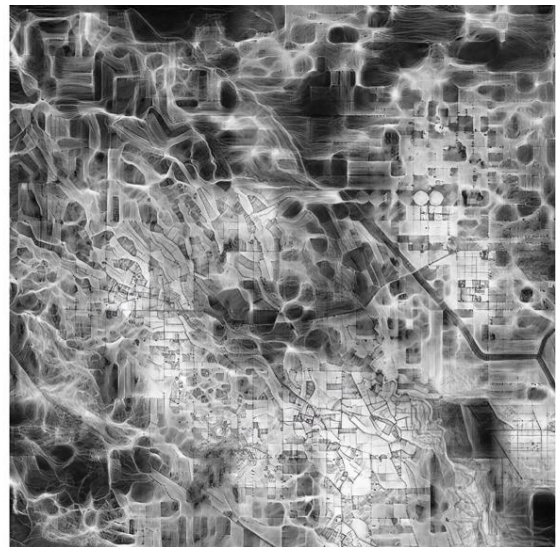
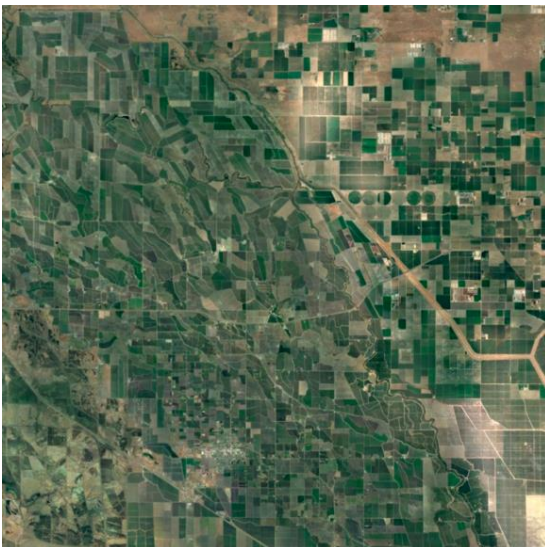


Figura 6: Delfina Fernandez, Lorenzo Lacava. (2021). Imagen/es: Canon 02 + Transcanon 02. Transcanon 03.

Caso 2: Espacio Curricular Optativo, Facultad de Arquitectura Planeamiento y Diseño - Universidad Nacional de Rosario. Título del Curso: Inteligencia Artificial Aplicada al proceso proyectual de Arquitectura y Paisaje. Profesor: Pedro Ferrazini. Adjunto: Marcos Dana. Título del Trabajo: Antropoceno. Estudiantes: Azul Colleti, Juan Ignacio Pignatta, Julián Leguizamón, Martín Alemañ, Cindi Fiori. Año: 2020

Antropoceno: Del griego anthropos, por humano, y cene, que significa nuevo. Época geológica actual, refleja lo que está ocurriendo en el planeta, principalmente porque la Tierra está cambiando aceleradamente por la actividad humana.

La línea de trabajo surge desde el reconocimiento de un contexto global con perspectiva a la superpoblación, y futura escasez y alta explotación de recursos naturales. Trabajamos sobre el paisaje modificado por la humanidad. En el rediseño del paisaje intervenido para la extracción de materiales. En este caso una mina de cobre a cielo abierto.

El grupo de trabajo partió de dos interrogantes: ¿Podemos repensar el paisaje y nuestros modos de habitar, convirtiendo nuestras ecologías en ciclos como lo son los procesos naturales? ¿Somos capaces de volver a poner a disposición las porciones de territorio que ya fueron utilizadas y descartadas por el ser humano debido a un sistema de producción y explotación vertiginoso?

La elección una mina de cobre a cielo abierto abandonada, nos entregó paisaje adecuado para nuestra hipótesis más literal: ¿Llegaremos al momento en el que tengamos que diseñar una ciudad dentro de un pozo hecho por nosotros mismos? Y si es así ¿Esta ciudad es posible?

Partiendo desde el análisis de las ciudades y cómo estas responden a diversos procesos, determinamos ciertas potencialidades y problemáticas, tales como aquellos de las ciudades medievales amuralladas. Por eso, inducimos nuestra mirada hacia la búsqueda de una heterogeneidad de información entre áreas construidas y espacios verdes para realizar nuestra simulación de “Ciudad Pozo”.

Encontramos en la Inteligencia Artificial, una herramienta que nos da la posibilidad de obtener resultados relativamente inmediatos para diseñar, pre-visualizar y simular núcleos urbanos lo suficientemente diversos.

Creemos que, con este ejercicio, enfrentándonos a esta realidad alarmante, podemos obtener respuestas sobre la posibilidad, llegado el caso de ser necesario, de urbanizar una porción de territorio jamás pensada: un pozo, un espacio que no fue pensado para que la configuración de una ciudad, sino para dejar una marca más del modelo extractivista que sigue la economía global.

Estamos convencidos de que nuestro suelo debe ser concebido como un recurso valioso y, sobre todo, escaso. Mediante la Inteligencia Artificial, planteamos una hipótesis extrema pero posible, con el fin de hacer explícita nuestra postura frente a la forma de intervenir los territorios y, consecuentemente, poder cambiar un sistema que usa y descarta. Un sistema que nos demuestra haber fracasado.



Figura 7: Azul Colleti, Juan Ignacio Pignatta, Julián Leguizamón, Martín Alemañ, Cindi Fiori. (2020). Antropoceno.

Caso 3: Delta City River. Master of Sciences in Architectural Technologies, Edge Program – SCI_Arc (Southern California Institute of Architecture) Título del Curso: Cyborg Misprision.

Profesor: David Ruy. Auxiliar Docente: Maxime Lefebvre. Título del Trabajo: Delta River City. Estudiante: Pedro Ferrazini. Año: 2019

El curso se focalizó en la experimentación que surgiría de la manipulación de herramientas de Inteligencia Artificial basada en imágenes. En este caso con un interés focalizado en la transformación de territorios inestables tales como el delta medio del Río Paraná. Esta herramienta permitió el cruce de dos sistemas altamente dinámicos como el delta versus porciones de ciudades informales: La Paz, Bolivia; Buenos Aires, Argentina; Complejo Alemão, Río de Janeiro, Brasil; con cierta formalidad de ciudades como Nueva York, Estados Unidos.

El objetivo principal del trabajo fue verificar si era posible simular una ciudad de 5 millones de habitantes en uno de los territorios más dinámicos en cuanto a transferencia de sedimentos y velocidad de transformación, pero además complejo morfológicamente hablando. El resultado es una ciudad altamente compleja que conserva patrones y características urbanísticas de las ciudades que le dieron forma.

El análisis de la imagen final nos muestra que, si bien el trabajo realizado es una provocación a pensar un contexto de sobrepoblación en el cual hemos tenido que ocupar hasta los territorios de los recursos naturales más preciados, las cualidades que hacen que entendamos una imagen de una ciudad que no existe se transfieren de manera exitosa con el fin de engañar al observador y especular acerca de la potencia de estas nuevas herramientas.



Figura 8: Pedro Ferrazini (2019). Delta Paraná River.

La técnica, la tecnología

Según los 3 axiomas que plantea John May en *Everything is Already an Image*: 01_No hay formas pre-técnicas de pensamiento, 02_Nada técnico es siempre meramente técnico y 03_La concepción específica del tiempo incrustada en un sistema técnico es inseparable de las formas de pensamiento e imaginación que la hacen posible o imposible (May, 2017). Estos tres axiomas son además una versión contemporánea de la esencia de lo que es técnica para Heidegger sería la búsqueda de aquello que en ella está siendo y perdurando, de lo que en la técnica se deja ser, la manifestación de la verdad, su desocultamiento. Sugiriendo que hay una relación directa en el

hacer y que no hay manera de prefigurar un resultado sin al menos conocer la técnica, que la imaginación sobre nuevos campos de conocimiento y relaciones inabordadas se abre a medida que la verdad se desoculta, es decir que la técnica se emplea (Heidegger, 1977).

A partir de esto John May deja en claro la diferencia entre fotografía e imagen, estableciendo que la fotografía es un proceso químico de captura de luz o como lo nombra “la escritura del sol” explicando que la fotografía es un proceso mecánico-químico donde la luz es controlada por un sistema que permite un flujo determinado por un tiempo determinado para desencadenar un proceso químico en un film. Mientras que por otro lado la imagen es el almacenamiento de cargas eléctricas a través de varios métodos estadísticos. En resumidas cuentas, esta energía teledetectada se almacena como datos en algo mucho más similar a una planilla de excel que a algo que esté relacionado, en nuestra conciencia, a las fotografías químicas o a los dibujos realistas. Por esta razón técnica las fotografías y las imágenes no tienen absolutamente nada que ver unas con otras y son pertenecientes a visiones emistémicas del mundo que compiten entre si mismas.

Ahora bien, la base de datos que subyace detrás de la imagen es lo que hace calculable, transformable y manipulable la imagen. Cualquiera que haya utilizado photoshop estaría entendiendo que para aumentar el contraste en las propiedades de una imagen lo que en realidad estamos haciendo es matemáticamente aumentar la distancia entre los valores máximos y mínimos de la base de datos de la imagen, lo que se traduce a la lectura del intérprete en un aumento del contraste. Cuando aumentamos el brillo lo que hacemos es elevar los valores de dichas base de datos de manera uniforme, y así con cada opción que nos permite trabajar el programa. Queda en quien interpreta dicha herramienta cuando el ajuste está a punto para lograr la afección deseada quien lee la imagen.

La lectura del artículo de May como de Heidegger ha sido fundamental para establecer un diálogo con los estudiantes en etapas varias de los ejercicios. En primer lugar para entender que una imagen es calculable, como venimos describiendo al momento, pero también para hacer consciente el proceso de interpretación y empleo de herramientas transformadoras de imágenes (photoshop). Finalmente para entender que la manipulación de herramientas de IA, al ser noveles, es necesario indagar en el funcionamiento y generar argumentos sólidos para el empleo y establecer de manera directa la necesidad de la manipulación de la técnica para despertar nuevos imaginarios posibles de alcance de la misma.

Acerca de autoría

¿Cuál es el rol del autor/a en este nuevo paradigma? Es una pregunta clave ya que pareciera que el proceso consiste solamente mezclar patrones de imágenes ya creadas y con autorías establecidas. Pero ¿Estamos creando nuevos mensajes?, ¿Estamos creando nuevas estéticas?, ¿Estamos generando una nueva capa de autoría?, ¿Cuál es el original?, ¿Puede la IA generar autoría por si misma?.

Es complejo pensar en autoría con la velocidad, potencia y cantidad de imágenes que puede llegar a producir los modelos de inteligencia artificial basados en imágenes, pero esto no se resume a una ecuación proporcionalmente inversa de: a mayor cantidad menor calidad, o a menor cantidad mayor calidad. Pero si podemos decir que existe la originalidad en términos de imágenes digitales y es sabido que hoy en día, incluso certificados a través de tecnología blockchain, podemos certificar la autoría de una imagen y establecer que tal imagen digital es un “original” de tal autor/a.

Ahora bien, ¿Que significa ser autor? Foucault se preguntaría, ¿Es autor alguien que escribe una cuenta de lavandería? ¿Tienen autoría los cuadernos de anotaciones? sostiene que para ser autor se necesita tener una intención de comunicar algo para el cual debe existir un contexto y que tiene que tener cierta finalidad de modificar algo o afectar a su lector de algún modo (Foucault, 1997). Entonces retomando lo expuesto en párrafos introductorios del capítulo, entendemos que una imagen en términos técnicos crudos es básicamente una base de datos, tal como Foucault se pregunta acerca de la cuenta de lavandería. Incluso cuestionándose la relación entre obra y autor,

es decir, cuestionarse acerca de si es necesario que para que haya una obra tiene que haber un autor y eso haría que todas las cosas que produzca con o sin intención dicho autor, se transforman automáticamente en obra.

Entonces bajo la mirada de Foucault es necesario que, para que la producción masiva de imágenes mediante modelos de Inteligencia Artificial pueda transformarse en obra y tener autoría una intención y una mirada que pueda transferir un mensaje, es vital que el diálogo entre curador y modelo de IA pueda lograr una imagen legible en términos de figuras y elementos identificables. Pero aun más importante es poder establecer un criterio de investigación y definición de “línea” de trabajo. Tanto en términos técnicos otorgando escalas, tamaños, colores, patrones, bordes duros, contenido, como en términos teóricos o de criterio es necesario ser claros y poder conformar este diálogo entre ambas inteligencias (artificial y humana). Esas serán las claves para diferenciar entre: un cálculo matemático de una base de datos resuelto por un sistema de IA y una imagen producida por IA. Este punto es clave para entender porque estamos hablando de IA aplicada al proceso proyectual de Arquitectura y Paisaje y la consecuente relación entre ambos, y no de la optimización de datos per se.



Figura 10: Renata Berta, Sara Nakatsuka y Julián Sales. (2021). “Cementerios Habitables”.

Así como Barthes sostiene que la muerte del autor/a, de alguna manera está ligado a que la escritura es la destrucción de toda voz, de todo origen; a la separación del relato escrito de su posibilidad de operar sobre lo real y sobre la voz; pero que fundamentalmente el/la autor/a es un personaje moderno producto del capitalismo. Además también conlleva una herencia de su contexto histórico, social, cultural el cual establece que su obra es producto nunca original y siempre anterior. El único poder que tiene es el de mezclar estas escrituras provenientes de un diccionario establecido. Barthes explica que esto hace un loop infinito entre diccionario, no autores y tejidos de cosas (Barthes, 1987). Un loop que cae en una imitación perdida que retrocede infinitamente. Así como en la inteligencia artificial se crean datasets de un repertorio de imágenes

extraídas del sin-fín y el sin-sentido de la masividad de internet para la posterior extracción quirúrgica de patrones que se toman de herencias inconexas.

Es interesante pensar que, tanto en los textos como en la producción de imágenes con modelos de IA, hay distintos niveles de autoría, es decir nos tomamos la licencia de tomar mensajes, estéticas, significados y hasta patrones, que en nuestra producción final puedan llegar a completar un sentido que tenga que ver con la línea de trabajo que se planteó al comenzar a utilizar este tipo de herramientas. Como todo salto tecnológico, pero fundamentalmente este, al atravesar absolutamente todas las disciplinas y al emplearse una nueva técnica, establece un nuevo desocultamiento de la verdad. Pauta nuevas formas post-técnicas de pensamiento, nuevas cuestiones técnicas a resolver y nuevas relaciones de tiempo-técnica que harán posible o imposibles estas formas de imaginación y pensamiento.

Referencias bibliográficas

Barthes, R. (1987). La muerte del autor. *El susurro del lenguaje*, 65-71.

Foucault, M.; Rabinow, P. (1997). *Essential works of Foucault, 1954-1988*, 205-222.

Heidegger, M. (1977). The question concerning technology.

Hui, Y.; Lima, T. (2020). *Fragmentar el futuro: ensayos sobre tecnodiversidad*. Cajanegra Editora.

Kant, I. (1991). *Observaciones sobre el sentimiento de lo bello y lo sublime*, México, Editorial Porrúa, pp. 139.

May, J. (2017). Everything is already an image. *Log*, (40), 9-26.

Valderrama, A. (2019). "Ciudades resilientes" en *A&P Investigaciones N 1*. Rosario: A&P, 14-18. ISBN: 978-987-702-314-5

Zhu, J. Y., Park, T., Isola, P., & Efros, A. A. (2017). Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision* (pp. 2223-2232).

EL FUNCIONAMIENTO ECOSISTÉMICO DE LOS HÁBITATS DE VILLARINO Y PATAGONES A PARTIR DE PRODUCTOS MODIS

Leandro Palmeyro¹; Alejandra Geraldi¹²; Federico Barragán¹

¹*Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina*

³*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina.*

ageraldi@criba.edu.ar

Resumen

El presente trabajo caracteriza funcionalmente los hábitats naturales de los partidos de Villarino y Patagones que actúan como reservorios de carbono. Debido a que estos hábitats se encuentran propensos al desmonte, causado principalmente por el avance de la frontera agropecuaria, el propósito de este trabajo es analizar el funcionamiento ecosistémico de los hábitats que permita la planificación de dichos cambios en los usos y coberturas del suelo en pos de la estabilidad funcional y estructural de los ecosistemas del área y su consecuente provisión de Servicios Ecosistémicos.

El área de estudio se caracteriza por presentar una marcada variación interanual entre periodos secos y húmedos que le otorgan cierta inestabilidad ambiental. Dentro de las consecuencias reconocidas se puede nombrar la pérdida de biodiversidad, intensificación de eventos meteorológicos perjudiciales para los grupos humanos de la región o procesos de desertificación. Primar la conservación de los ecosistemas que brinden una mayor cantidad de servicios ecosistémicos, principalmente vinculados a la regulación, daría la posibilidad de menguar dichas consecuencias y aumentar la resiliencia ambiental del área de estudio.

Teniendo en cuenta el avance inminente de la frontera agropecuaria sobre dichos reservorios, se procedió a caracterizar funcionalmente estos hábitats para distinguir a aquellos que presenten un mejor funcionamiento ecosistémico y, por lo tanto, una mayor provisión de servicios ecosistémicos de interés. Para esto se utilizaron como variables el promedio anual y la variabilidad anual del fPAR presentado por cada parcela correspondiente a los hábitats analizados. Por último, se clasificaron los resultados en 3 clases y se sumaron ambas variables para lograr la caracterización funcional de cada parcela.

Palabras clave: *usos y coberturas del suelo, servicios ecosistémicos, funcionamiento ecosistémico*

Introducción

El hombre transforma el paisaje para obtener alimentos, fibras, combustibles y otros bienes que brindan los ecosistemas (Baeza & Paruelo, 2014). A través del tiempo la humanidad fue modificando la distribución de las cubiertas naturales de los distintos territorios, con el fin de satisfacer diversas necesidades. Dichas intervenciones fueron aumentando en cantidad e intensidad durante los últimos siglos, especialmente a partir de la segunda mitad del siglo XX, producto de distintos avances técnicos y tecnológicos. Estas alteraciones desembocan, en mayor o menor medida, en consecuencias funcionales y estructurales para los ecosistemas, por lo que “el estudio de la dinámica espacial a través de la dimensión temporal constituye una tarea de gran importancia en la investigación científica” (Humacata & Buzai, 2018: 1001).

El uso y cobertura del suelo es una preocupación de importancia nacional e internacional. Cambios experimentados en bosques, tierras de cultivo y cursos de agua están siendo impulsados por prácticas basadas en la extracción intensiva de recursos naturales para obtener beneficios en el corto plazo. En este escenario, “nos enfrentamos al desafío de gestionar las compensaciones entre las necesidades humanas inmediatas y mantener la capacidad de la biosfera para proporcionar bienes y servicios a largo plazo” (Foley, 2005: 570). La mayoría de los ecosistemas actuales están intervenidos directamente por la humanidad y ningún ecosistema de la superficie terrestre está libre de la influencia humana generalizada (Vitousek, Mooney, Lubchenco, & Melillo, 1997). Esta interacción constante entre los seres humanos y el medio físico altera las características y funcionalidades naturales de los ecosistemas. En palabras de Meyer & li (1992: 39): “El cambio en el uso del suelo contribuye (...) a cambios sistémicos como la acumulación de gases traza y a impactos acumulativos o en mosaico como la pérdida de biodiversidad, la degradación del suelo y el cambio hidrológico”. El bienestar y sustento de vida de las sociedades dependen del equilibrio de los ecosistemas planetarios, tanto de aquellos naturales como de los manejados por el ser humano. Es así, que entender el funcionamiento de estos sistemas y los servicios que nos brindan vehiculiza un manejo sostenible, que favorece tanto la demanda económica como la social y cultural, promueve la resiliencia y adaptación de los territorios ante las variaciones espaciales y permite estar en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Estos objetivos, también conocidos como Objetivos Globales, fueron adoptados por las Naciones Unidas en 2015 como un llamamiento universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que para el 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad. Los 17 ODS están integrados: reconocen que la acción en un área afectará los resultados en otras áreas y que el desarrollo debe equilibrar la sostenibilidad social, económica y ambiental. Los países se han comprometido a priorizar el progreso de los más rezagados. Dentro de estos objetivos se encuentran por ejemplo los vinculados a la acción por el clima, que buscan abordar las necesidades de los países en desarrollo en cuanto a adaptación al cambio climático e inversión en el desarrollo bajo en carbono, así como también objetivos vinculados a la vida de los ecosistemas terrestres, para reducir la pérdida de hábitats naturales y biodiversidad que forman parte de nuestro patrimonio común.

Los ecosistemas han alcanzado niveles de alto deterioro, encontrando los cambios más importantes e intensos durante los últimos 50 años (Metzger, Rounsevell, & Acosta-michlik, 2006). Esto ha generado una gran necesidad de monitorear las estructuras y el funcionamiento de los ecosistemas a escala local y global, y de incorporar su valor dentro de los procesos de toma de decisiones (Daily, Ehrlich, Lubchenco, & Mooney, 1997). En todo el planeta las sociedades obtienen grandes beneficios de la naturaleza: suelos para cultivar, agua dulce, alimentos, materias primas, paisajes, entre otros. A estos provechos de la naturaleza recibidos por los humanos se los conoce como Servicios Ecosistémicos. Cuando ocurre un cambio o alteración en las coberturas de suelo, la integridad de las funciones ecosistémicas es afectada y en consecuencia, la capacidad de los sistemas para proveer servicios ecosistémicos se reduce. Cabe aclarar que, sin estos servicios el progreso y la supervivencia humana no serían posibles dado que la mayoría de individuos, familias, empresas e industrias dependen de ellos de alguna manera para su bienestar y crecimiento económico.

Argentina presenta una considerable variedad de ecosistemas como resultado de su extensión latitudinal y longitudinal. Cada uno de estos sistemas presentan diversas estructuras y funcionalidades que ofrecen oportunidades a los grupos humanos que los habitan. Los beneficios otorgados por los servicios ecosistémicos son particularmente importantes para territorios que presentan climas áridos y semiáridos, como ocurre con los partidos bonaerenses de Villarino y

Patagones. Estos climas generan una cierta fragilidad ambiental en sus territorios, caracterizados por la variabilidad climática que dan lugar a intensas sequías, las cuales han aumentado en ocurrencia e intensidad en las últimas décadas, tal como fue la sequía ocurrida en la región para los años 2008-2009 (Figura 1).

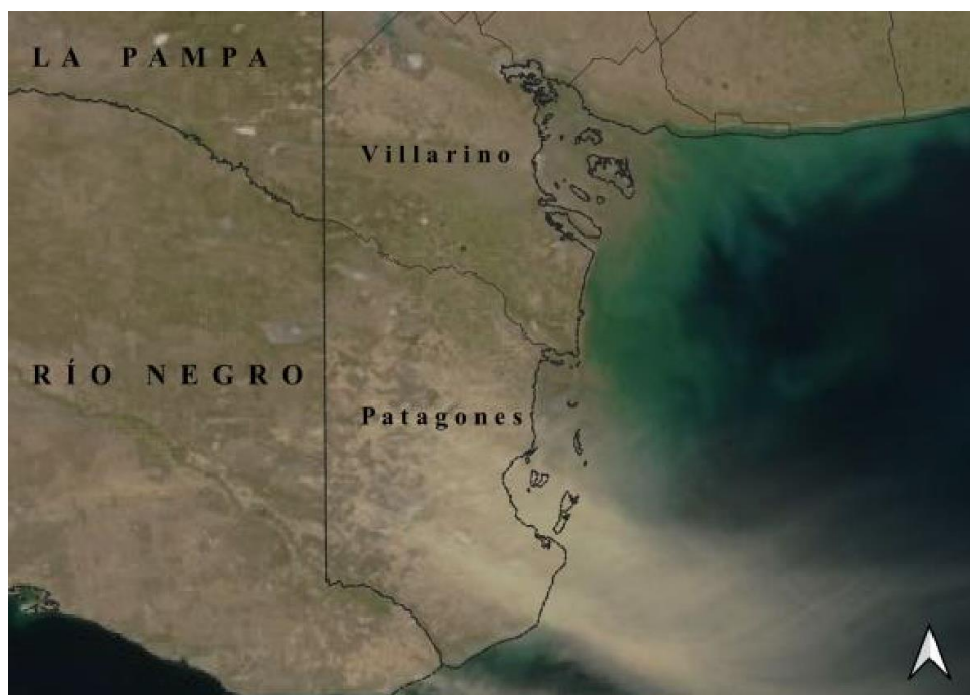


Figura 1: Voladura de suelos en Villarino y Patagones durante la sequía del 2008-2009. Fuente: Palmeyro, L. 2021, sobre la base de NASA, 2009

Los partidos de Villarino y Patagones se encuentran en el extremo sur de la provincia de Buenos Aires y presentan un clima semiárido que se manifiesta con mayor intensidad de norte a sur y de este a oeste. El río Colorado atraviesa la región oficiando de límite político-administrativo entre los dos municipios y generando una zona de riego que abarca el sur de Villarino y el norte de Patagones: el Valle Bonaerense del río Colorado. Los territorios de cada partido fuera del área de riego conforman el secano de Villarino y Patagones. En las últimas décadas extensas áreas del monte y los arbustales de la región fueron desmontados y transformados para abrir espacio a la agricultura, modificando la estructura original de los ecosistemas.

“... a medida que varían los atributos del suelo, principalmente en zonas que presentan característica de fragilidad como las zonas con climas áridos, semiáridos y subhúmedos, este se comienza a degradar quedando reducido en nutrientes y materia orgánica. Esto resulta en un suelo cada vez menos productivo, siendo la consecuencia inmediata la aparición de áreas desértificadas...”(Winschel, 2017: 23).

Durante los últimos 20 años, esta región acumuló la mayor cantidad de días con emergencia agropecuaria por la alta recurrencia de sequía meteorológica, agrícola e hídrica (Ochiuzzi, 2011). Ambos partidos son considerados “como de alta fragilidad ambiental, con gran exposición climática, excesivo refinamiento de los suelos producto de una agricultura anual con inadecuada mecanización y una alta tasa de desmonte de la vegetación natural” (Sanchez, 2011: 371). Teniendo en cuenta esta situación de vulnerabilidad, la planificación y gestión de políticas públicas municipal, provincial y nacional orientada al desarrollo sustentable de los espacios son una herramienta clave para evitar o menguar las consecuencias ya mencionadas. Lograr una sostenibilidad ambiental permite mantener los ecosistemas en equilibrio y garantizar así los beneficios que éstos brindan a los grupos humanos y a los mismos ecosistemas. A esos beneficios ofrecidos por los ecosistemas se los conoce como Servicios Ecosistémicos (SSEE). La implementación del concepto de sostenibilidad y sustentabilidad ambiental en las políticas públicas se ve facilitada con la consideración de la provisión sostenida de SSEE como principio

integrador de los múltiples beneficios que ofrecen los ecosistemas a la sociedad (Cork & Proctor, 2005). El concepto de SSEE proporciona un marco clave para evaluar los impactos humanos en la naturaleza (Staiano, Camba, Baldassini, Gallego, & Texeira, 2021).

“El no considerar el valor del capital natural, como tampoco tenerlo en cuenta en la toma de decisiones políticas y económicas relacionadas a la planificación, ha desembocado en varias ocasiones en la degradación de los ecosistemas y la pérdida de la biodiversidad como resultado de este proceso (...) Factores como el cambio climático y un número creciente de desastres naturales están empeorando el escenario. Además, el aumento en la demanda de costosas tecnologías de avanzada y los caros esfuerzos por restaurar los paisajes degradados, demostraron en muchos casos, las ventajas económicas de las soluciones basadas en la gestión sostenible de los ecosistemas. El uso pleno de los servicios ecosistémicos y la consideración de los valores de la biodiversidad para hacer frente a desafíos globales como el cambio climático, no solo tiene sentido desde el punto de vista ecológico, sino también económico. Por lo tanto, es de vital importancia asegurar que se incorporen los servicios ecosistémicos en la planificación y en las medidas para el desarrollo en todos los sectores” (Kosmus et al., 2012: iv).

Como afirma Carvajal (2010) la Geografía, desde su consolidación como disciplina científica, ha estudiado las relaciones sociedad-naturaleza considerando siempre que el entorno en el que se desenvuelven las distintas sociedades, es vital para entender la vida humana y la organización del espacio. En este contexto, analizar los cambios de usos y coberturas de los suelos de un territorio desde un enfoque ecosistémico se convierte en un campo de acción para el quehacer geográfico, como una forma de identificar los beneficios que obtiene la sociedad humana a partir de los diferentes procesos ecológicos desarrollados al interior de los ecosistemas, evidenciando de una u otra manera esa relación entre la sociedad y la naturaleza que tanto se ha preocupado por describir dicha disciplina.

El objetivo del presente capítulo es analizar los cambios en el uso y cobertura del suelo desde un enfoque ecosistémico que colabore en la planificación con el fin de preservar los hábitats presentes y los Servicios Ecosistémicos que estos brindan. Se pretende además, analizar procesos ecológicos de los reservorios de carbono del área a través de teledetección y SIG; y representar mediante productos informativos los resultados obtenidos como aporte a la toma de decisiones.

Área de estudio

El área de estudio de la presente investigación corresponde a los partidos de Villarino y Patagones (Figura 2), al sur de la Provincia de Buenos Aires. La misma limita al norte con el partido de Bahía Blanca (Pcia. de Buenos Aires), al oeste con las provincias de La Pampa y Río Negro y al este y sur con el Mar Argentino. Villarino (1.140.000 ha), con capital en la localidad de Médanos, y Patagones (1.360.000 ha), con capital en la ciudad de Carmen de Patagones, son los dos partidos más extensos de la provincia, con una superficie total de 2.500.000 ha. Está atravesada por el río Colorado, un río de régimen nival que nace en la cordillera de los Andes, por confluencia de los ríos Barrancas y Grande. El mismo oficia de límite entre los dos partidos y permite el desarrollo de un área de riego artificial hacia ambas márgenes del río que posibilita y potencia el perfil agropecuario del territorio.

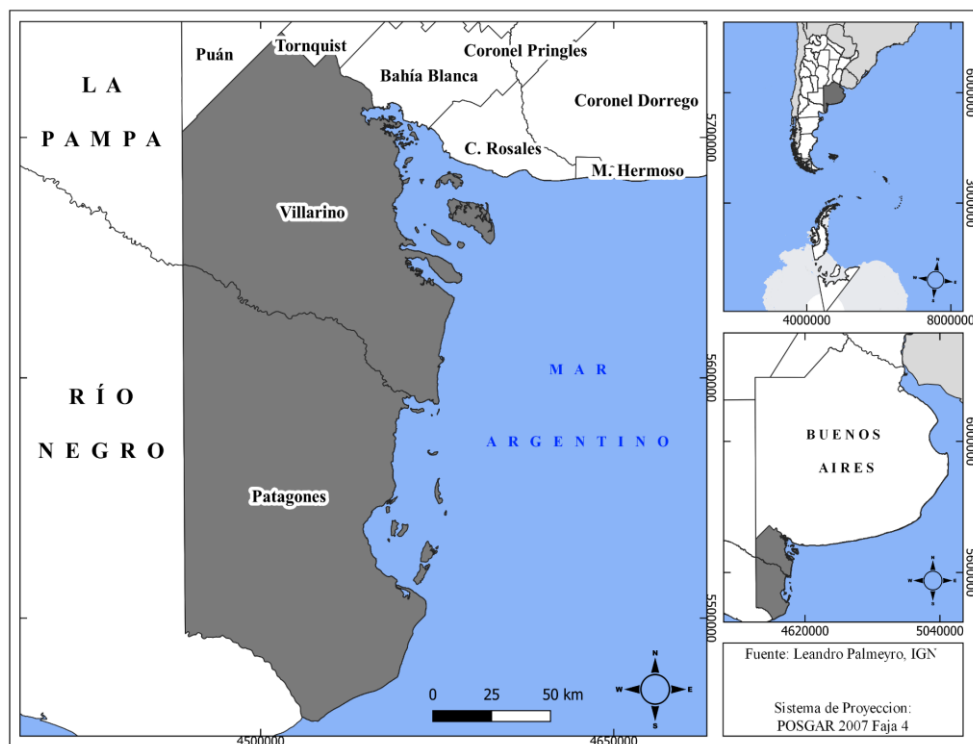


Figura 2: Localización del área de estudio. Fuente: Palmeyro, L. 2021

El área de riego (Figura 3) es administrada por la Corporación de Fomento del Valle Bonaerense del Río Colorado (CORFO), un ente autárquico con capacidad de derecho público y privado creado por Ley Provincial 6245, el 3 de febrero de 1960. Según CORFO, el área de riego comprende una superficie de 516.641 ha, distribuidas hacia ambos márgenes del río Colorado; de los cuales 211.297 están en Patagones y 305.344 en Villarino y 137.145 se encuentran empadronadas para concesión de riego. Los sembradíos fuera del alcance de esta área corresponden a cultivos de secano y representan aproximadamente unas tres cuartas partes del total de los cultivos del área de estudio.

Esta área forma parte de la Pampa seca, que junto con la Pampa húmeda conforman la Región Pampeana. Según la clasificación climática de Köppen el área de estudio se clasifica dentro del clima árido estepario. Se trata de una región ventosa (Sanchez, Pezzola & Cepeda, 1998) por lo que la predominancia de los suelos franco-arenosos de textura gruesa presentan un escenario propenso a la erosión eólica, intensificada en los períodos de sequía al disminuir la presencia de cobertura vegetal natural. Se estima que una velocidad de 13 Km/h es suficiente para provocar erosión en aquellos suelos cuya estructura está alterada, y si éstos están desprovistos de vegetación pueden producirse voladuras hasta con vientos de 5 Km/h. Debido al régimen pluviométrico escaso y variable de la región como uno de principales factores formadores de suelo, el desarrollo que han adquirido los mismos es relativamente escaso en términos de cantidad de horizontes o estratos componentes de un perfil, contenido de nutrientes y presencia abundante de carbonato de calcio, lo cual no sólo muestra una historia de la escasa precipitación, sino su temperatura promedio en la que fue concebido (Sanchez, 2011).

Desde el punto de vista fitogeográfico, el partido de Villarino está ubicado en la provincia del Espinal (distrito del Caldén) y Patagones en la provincia del Monte (Cabrera, 1951). En la provincia del Espinal se encuentran especies arbustivas xerófilas tales como la jarilla (*Larrea divaricata*), el chañar (*Geoffroea decorticans*), el caldén (*Prosopis caldenia*), el piquillín (*Caldenia microphylla*) y el algarrobo (*Prosopis flexuosa*). También es posible observar comunidades vegetales asociadas con las características edáficas, tal es el caso de las especies que se desarrollan en las zonas de salitres y salinas y las propias de los suelos arenosos que se adaptan a lo largo de los cordones de médanos (Cabrera, 1976). En la zona correspondiente a la provincia del Monte la vegetación es la estepa arbustiva xerófila y halófila. Es posible encontrar la

presencia de un estrato arbustivo compuesto por jarillas (*Larrea divaricata*) y piquillines (*Caldenia microphylla*) y un estrato herbáceo de escasa cobertura, con predominio de gramíneas bajas. Los límites entre estos dos territorios no se pueden determinar con exactitud debido a que existe entre ambos un amplio ecotono (Cabrera, 1976).

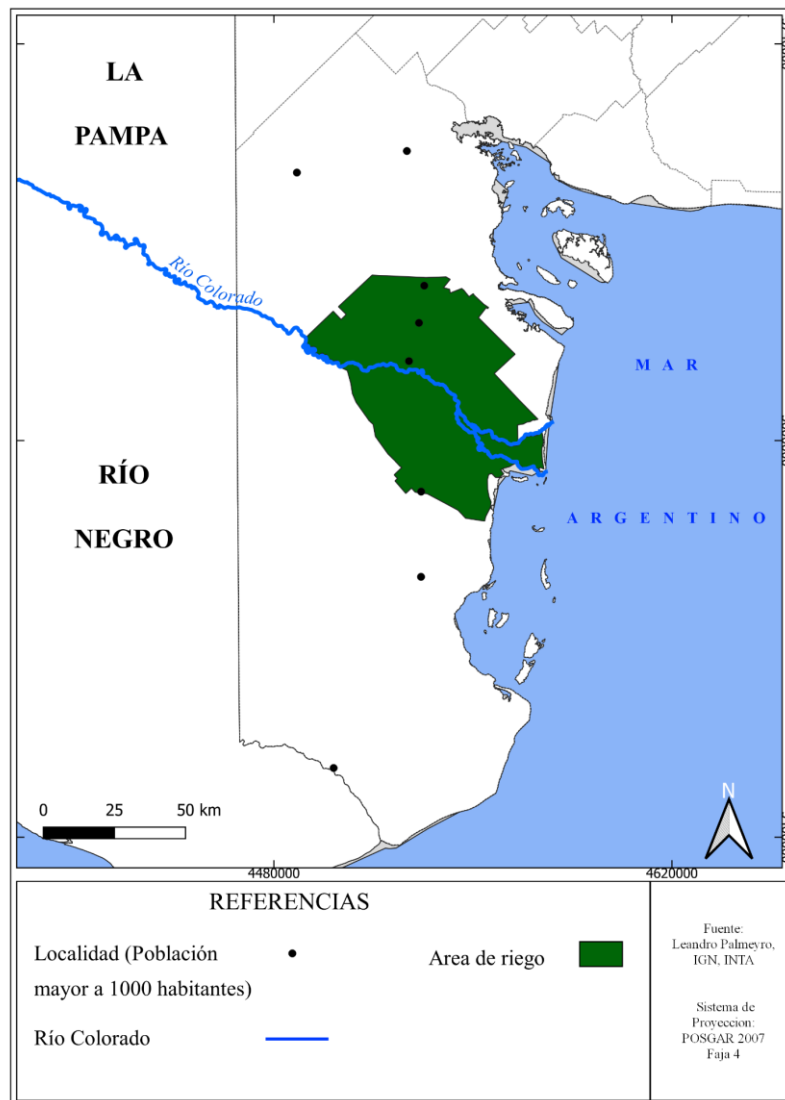


Figura 3: Área de riego del Valle Bonaerense del Río Colorado. Fuente: Palmeyro, L. 2021

La estructura socioeconómica de la región se caracteriza por ser un área dedicada a la agricultura y la ganadería tradicional concentrada en la producción de trigo y la explotación ganadera basada principalmente en verdes invernales. Dentro de los cultivos, predomina el trigo en el N de Villarino y en el E de Patagones. Este cultivo representa la mayor área cultivada en ambos partidos a pesar de su reducción constante desde los últimos años. Otra de las actividades importantes que se realizan en la zona es la ganadería vacuna. Dentro de los cultivos más significativos de la zona de riego del Valle Bonaerense del Río Colorado está el de la cebolla, que constituye una de las principales actividades económicas de la región. En menor medida, se practica además la apicultura y el cultivo de girasol y alfalfa. Los establecimientos rurales aumentan de tamaño, hacia la costa y hacia el SO, donde las condiciones físicas se tornan adversas para las prácticas agrícolas intensivas y las redes de comunicación son escasas. Estas regiones son las que se dedican principalmente a la ganadería extensiva (Dumrauf, 2008).

La región registra un grado de deterioro y degradación ambiental muy elevado debido al modelo de producción presente, orientado a la explotación de los recursos naturales. Esto se manifestó no

solo en la destrucción del medio físico y biológico sino también en la calidad de vida de sus habitantes (Gabella, Luorno y Campo, 2013). Dentro de los aspectos naturales, se evidencian frecuentes e intensos períodos de sequías, ocurrencia de fuertes heladas durante períodos prolongados e incremento de los vientos en épocas donde los suelos se encuentran sin cobertura. Si bien desde el punto de vista climático y edafológico se trata de una región transicional sujeta a una alta fragilidad, protagonizada por intensas sequías, heladas y fuertes vientos, se asocia a este escenario una actividad antrópica importante, dando origen a diversos conflictos dentro del territorio. Como dato ilustrativo, más del 70 % de la superficie con monte natural se ha perdido en los últimos 30 años realizando sobre esos suelos cultivos anuales con un alto grado de refinamiento y pulverización (Sánchez, 2008).

Para Gómez Orea (1994) existen 8 problemas derivados de los conflictos territoriales: 1. Desequilibrio territorial; 2. Impactos ecológicos y paisajísticos debidos a localizaciones incompatibles con el medio; 3. Despilfarro de recursos naturales tanto por falta como por exceso de actividad; 4. Ignorancia de los riesgos naturales en la localización de actividades; 5. Mezcla y superposición desordenada de usos; 6. Incoherencia entre la localización de residencia y empleo y déficit de infraestructuras y equipamientos colectivos; 7. Conflictos entre actividades y sectores; 8. Descoordinación entre organismos públicos. Los territorios rurales de los partidos de Villarino y Patagones son escenario de varias de estas situaciones, producto de los cambios en los usos y coberturas de los suelos experimentados en las últimas décadas. La ordenación territorial se presenta como un instrumento en la gestión de recursos naturales si lo que se busca es equilibrar los usos del suelo en función de su capacidad, prevenir impactos negativos y revertir los procesos de degradación actuales (Recalde & Zapata, 2007). Considerar lo que Gomez Orea (1994) define como “capacidad de acogida de los ecosistemas”. Una estrategia de ordenamiento territorial implica “prever con antelación los impactos en el ambiente que ocasionan las actividades humanas [...] de manera que se puedan tomar medidas de mitigación o evitarlos antes de que ocurran” (Gross, 1998:116). El Ordenamiento Territorial Rural (OTR) se presenta como una opción clave para mitigar o disminuir dichos conflictos en el área de estudio. Es un proceso político-técnico-administrativo que busca organizar, planificar y gestionar el uso y la ocupación del territorio rural, en función de las características biofísicas, culturales, socioeconómicas y político-institucionales. Este proceso debe fomentar el uso inteligente y justo del territorio, aprovechando oportunidades, reduciendo riesgos, protegiendo los recursos en el corto, mediano y largo plazo. Así debe asegurar que los futuros habitantes puedan disfrutar de los beneficios de los mismos.

Con el propósito de medir y visibilizar no sólo la extensión y estado actual de los ecosistemas, sino también entender cómo su funcionamiento afecta el bienestar humano, surge en la literatura de los últimos años, y en especial a partir de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA 2005), el concepto de Servicios Ecosistémicos que son la parte más importante del capital natural con que cuenta una comunidad (Ruth Martínez-Rodríguez, Viguera, Donatti & Harvey, 2017). Son esenciales para el ser humano y funcionan de una manera tan compleja e interconectada entre sí que no pueden ser reemplazados por la tecnología (Daily et al., 1997). A pesar de su importancia, su provisión se ve afectada por diversas presiones sobre dichos espacios. Un desafío clave para el ordenamiento territorial rural es disminuir dichas presiones con el objetivo de mantener los servicios brindados por los espacios rurales y naturales de los territorios.

Por lo anteriormente descrito es de vital importancia la caracterización funcional de los ecosistemas, complementaria a la estructural, debido a que presenta características particularmente atractivas en estudios ecológicos, especialmente a escala regional. Por un lado, permiten una valoración cuantitativa directa de los servicios ecosistémicos, en especial aquellos definidos como de soporte y de regulación, por otro, los atributos funcionales suelen responder más rápido a los cambios en las condiciones ambientales debido a la inercia en la respuesta de los atributos estructurales. El funcionamiento ecosistémico se refiere al intercambio de materia y energía entre la comunidad biótica y la atmósfera, por lo tanto, su caracterización involucra la medición de flujos (Paruelo, 2008). Estas funciones son el resultado de los procesos ecológicos y las estructuras de los ecosistemas y son de una enorme importancia para el bienestar humano. Una de las principales dificultades a la hora de incorporar indicadores funcionales en la caracterización de los ecosistemas es la cuantificación de propiedades involucradas en los flujos de materia y energía. Mientras que las clasificaciones estructurales se ayudan de elementos visibles (composición específica de comunidades vegetales, aspectos fisionómicos, etc.), las

propiedades funcionales son elementos “intangibles” más difíciles de percibir (Fernandez & Piñeiro, 2008). Este problema puede abordarse de manera efectiva mediante el uso de técnicas específicas de teledetección capaces de detectar flujos de energía entre la superficie terrestre y la atmósfera. La teledetección brinda la posibilidad de ir más allá de lo estructural y describir aspectos funcionales de los sistemas ecológicos, particularmente a nivel de ecosistemas (Cabello et al., 2008). Así, la respuesta espectral captada por sensores remotos proporciona información acerca de patrones de captación y reflexión óptica y térmica directamente relacionados con las propiedades funcionales ecosistémicas (Paruelo, 2008).

Metodología y técnicas

La metodología de trabajo utilizada en la presente investigación tiene su base en la Geografía Aplicada. Según Levi (1970), Stamp y Phlipponneau, autores de las primeras dos obras importantes sobre Geografía Aplicada, toman como tales a aquellas investigaciones geográficas que resuelvan los problemas que se presentan en beneficio de la sociedad, aquellas que han sido directamente pedidas por el usuario o son susceptibles de serlo. Considerando el avance de la frontera agrícola y el desmonte como un proceso inminente, se caracterizó funcionalmente los bosques mixtos, arbustos cerrados y arbustos abiertos del área de estudio, debido a que son los tres hábitats que actúan como reservorios de carbono del área y es sobre estos sistemas naturales que avanzan los dos procesos nombrados. Dicha caracterización consistió en calcular el promedio anual de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación (fPAR) y su variabilidad anual para el año 2019 de cada parcela correspondiente a dichos hábitats. Estos son dos aspectos de la dinámica de la ganancia de carbono que muestran una relación estrecha con la provisión de servicios ecosistémicos.

Para la construcción de las variables se descargaron 16 productos MODIS MDC15A2 (LAI/fPAR) de un servidor USGS en formato. HDF correspondientes a distintas fechas distribuidas a lo largo del año. Con el software HEGTools se extrajo archivo correspondiente a fPAR de cada producto y se convirtió a formato .TIFF para poder procesarlo en el software QGIS v.3.16. Una vez incorporados al QGIS, los rasters fueron combinados (el área de estudio corresponde a dos gránulos por fecha) y recortados con el vector del área de estudio descargado del IGN. Como los valores de fPAR varían entre 0 y 100, se eliminaron los valores superiores a 100, que corresponden a coberturas particulares determinadas por MODIS. Luego, se recortaron las capas rasters de modo que solamente queden en la matriz los valores correspondientes a las parcelas de los 3 hábitats analizados. Del análisis preliminar de los resultados obtenidos se detectaron valores atípicos que no mantenían una correspondencia espacial con los que lo rodean y fueron corregidos utilizando el plugin Serval de QGIS. Para la corrección de dichos píxeles con valores anómalos se aplicó un filtro de 3x3, asignándoles el valor promedio de los 8 que lo rodean. Luego de estos procesos quedan los ocho rasters en condiciones de ser integrados al modelo y de esta manera realizar los cálculos de las dos variables de interés.

Para calcular el *promedio anual de fPAR* se realizó la sumatoria de las capas y se dividió al resultado por 8. En el caso de la *variabilidad anual de fPAR* fue necesario calcular el coeficiente de variación de las capas (Desvío estándar/Promedio). Para esto, se obtuvo en primera medida el desvío estándar del conjunto de datos. A la capa resultante se la dividió por el promedio y se obtuvo el coeficiente de variación. A continuación, se calculó el valor promedio que cada parcela perteneciente a los hábitats analizados presenta respecto al *promedio anual de fPAR* y la *variabilidad anual de fPAR*. Luego las parcelas fueron reclasificadas por separado en 3 clases, con base en ambas variables. Dichas clases fueron obtenidas a partir del cálculo del histograma de los valores obtenidos en cada parcela para ambas variables y sus valores cuantiles. En el caso del promedio anual de fPAR, los valores anteriores al primer cuantil se los consideró de *clase 1*, entre el primer y segundo cuantil de *clase 2* y mayores al segundo cuantil de *clase 3*. Para el histograma de la variabilidad anual, los valores mayores al segundo cuantil se los consideró de *clase 1*, entre el primer y segundo cuantil de *clase 2* y menores al primer cuantil de *clase 3*. Por último, se sumaron las capas reclasificadas correspondientes a cada variable, generando la capa final de caracterización funcional de los hábitats analizados. Las parcelas que hayan dado como

resultado valores 6 o 5 se las considero de *mayor funcionamiento ecosistémico*, las de valor 4 como de *funcionamiento ecosistémico intermedio* y las de valor 3 o 2 como de *menor funcionamiento ecosistémico*.

Resultados y discusión

Para el caso de esta investigación la caracterización funcional se realizó a través de dos variables derivadas de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación (fPAR). Dichas variables fueron el promedio anual de fPAR y la variabilidad anual de fPAR. El espacio funcional así identificado permite describir la variabilidad ecosistémica de un territorio, dado que las variables usadas están relacionadas con la respuesta que los ecosistemas muestran frente al gradiente ambiental completo de una región (Cabello et al., 2008). El fPAR define la cantidad de radiación solar que ingresa al sistema y que es absorbida por la cubierta vegetal. Es un parámetro utilizado en la detección remota y en el modelado de ecosistemas, dado que representa el intercambio de energía, vapor y CO₂ (Fang et al., 2005a en Vega-Araya & Alvarado-Barrantes, 2019).

En la figura 4 se presenta la media de valores de fPAR para el producto MCD15A3H.v6 para el año 2019. El fPAR de un lugar varía entre 0 y 100. Al ser una fracción, el valor hace referencia al porcentaje de la radiación fotosintéticamente activa que incide en la superficie y es absorbida por la biomasa. En el partido de Villarino los valores variaron entre 10,75 y 65,75, mientras que en el partido de Patagones lo hicieron entre 13,87 y 75,88. Cuanto mayor sea el valor de fPAR, mayor es el porcentaje de la fracción de la radiación incidente fotosintéticamente activa que es absorbida por ese hábitat. Los territorios que presentan altos valores de fPAR promedio están asociados a una alta provisión de servicios ecosistémicos.

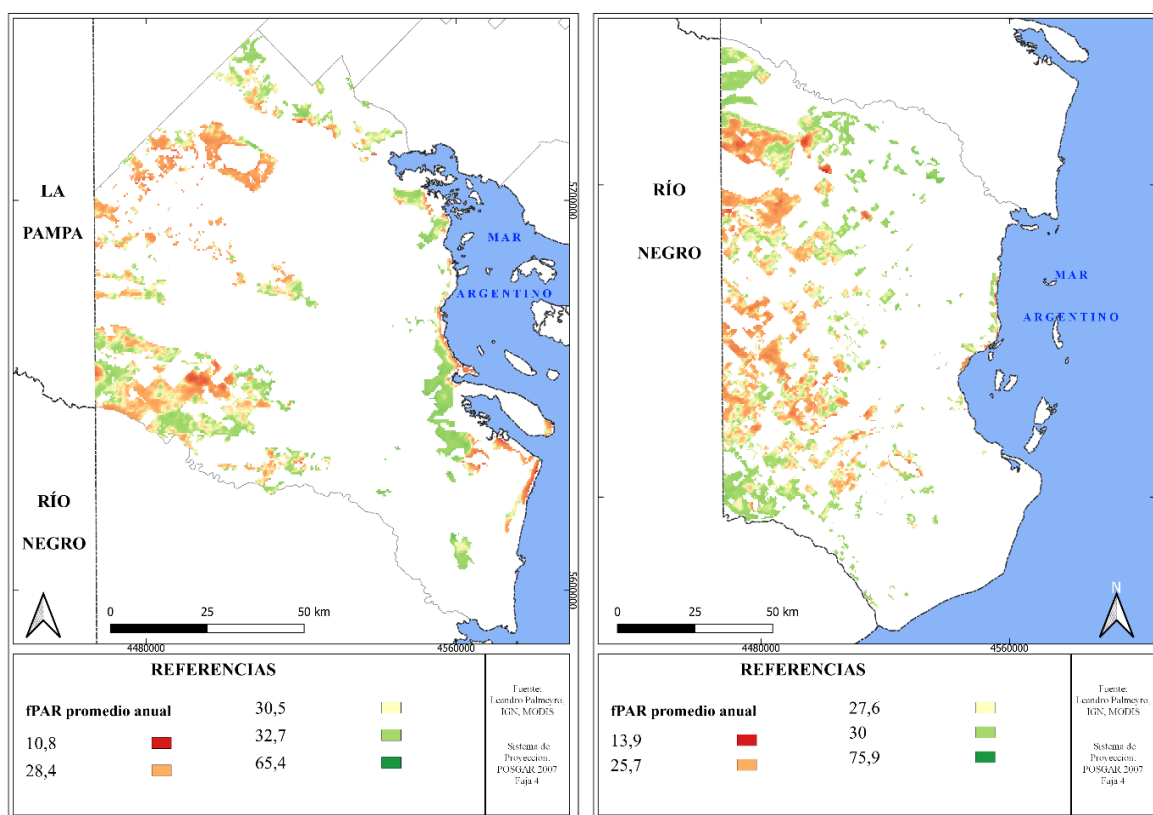


Figura 4: Promedio anual (2019) de fPAR para los hábitats seleccionados de Villarino y Patagones. Fuente: Leandro Palmeiro, 2021

Como se explicó en la metodología, se obtuvo una clasificación de las parcelas compuesta por 3 clases, siendo la clase 3 la que mayor fPAR promedio anual presenta. En la figura 5 se observa la distribución de las clases tanto en los partidos de Villarino como de Patagones.

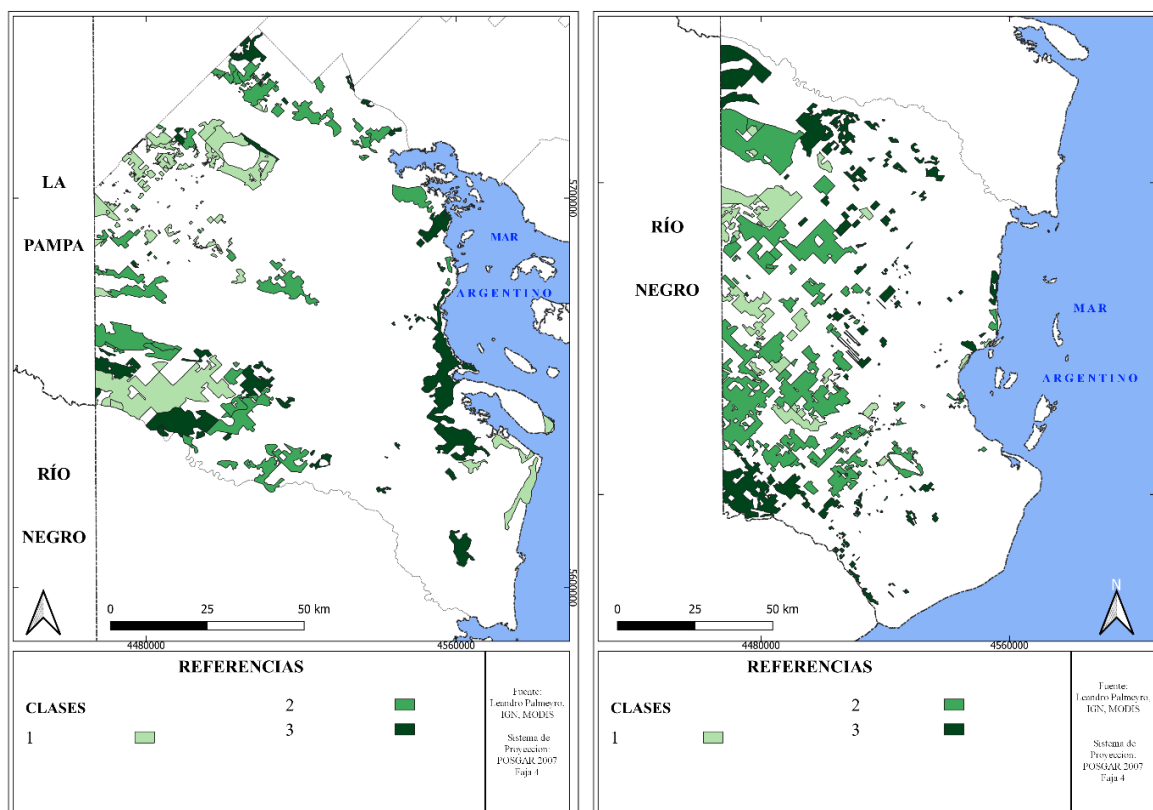


Figura 5: Clases correspondientes al fPAR promedio anual para los partidos de Villarino y Patagones. Fuente: Leandro Palmeyro, 2021

En la figura 6 se presenta la variación anual de fPAR para el producto MCD15A3H.v6 para el año 2019. La variabilidad anual obtenida a través del cálculo del coeficiente de variación fluctúa entre 0 y 100. En Villarino los valores variaron entre 1,82 y 63,79, mientras que en Patagones lo hicieron entre 3,10 y 74,98. Cuanto mayor sea el valor del coeficiente, mayor será el rango de variación de fPAR a lo largo del año. Los territorios que presentan altos valores de fPAR promedio están asociados a una menor regularidad, estabilidad y capacidad de respuesta frente a cambios ambientales con respecto a territorios con una variación anual estable.

Se obtuvo una clasificación de las parcelas compuesta por 3 clases, siendo la clase 3 la que menor variabilidad anual presenta. En la figura 7 se presenta la distribución de las clases tanto en los partidos de Villarino como de Patagones. Se observa que la mayor variabilidad de fPAR está restringida a unas pocas parcelas, en el caso de Villarino hacia el área costera y en el caso de Patagones hacia el noroeste y sur.

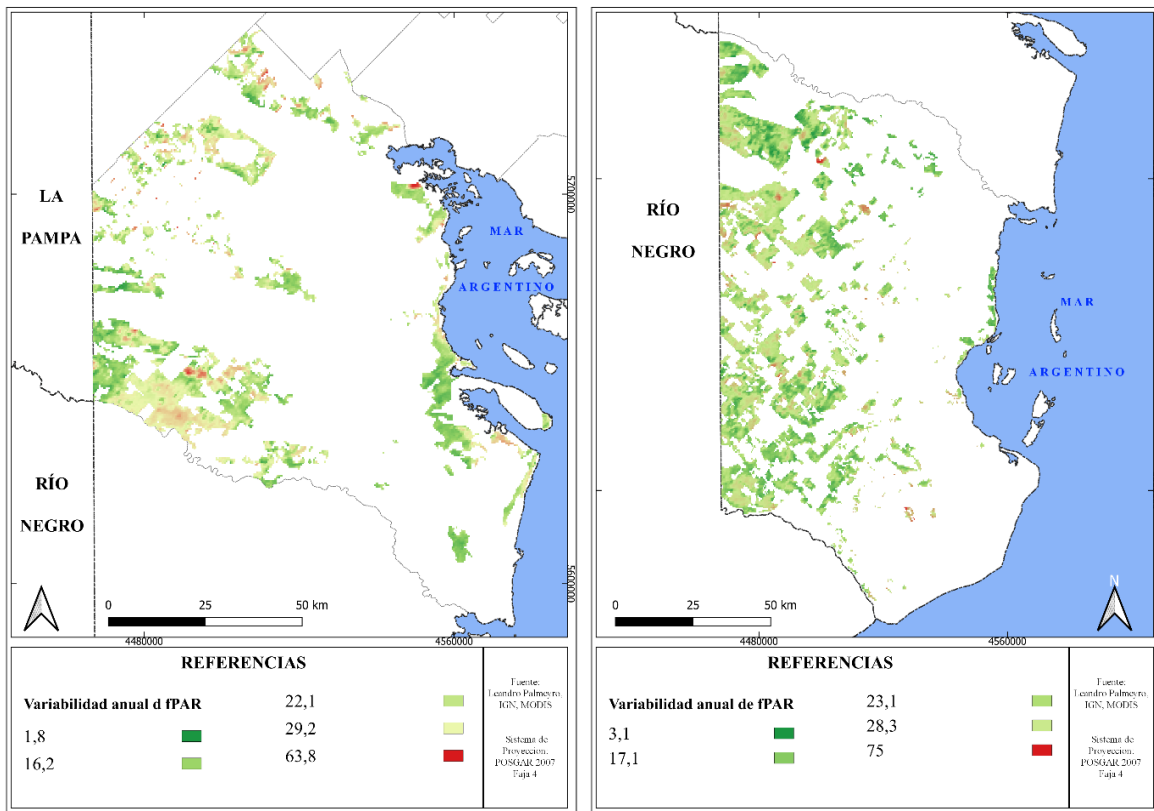


Figura 6: Variabilidad anual (2019) de fPAR para los hábitats seleccionados de Villarino y Patagones. Fuente: Leandro Palmeyro, 2021

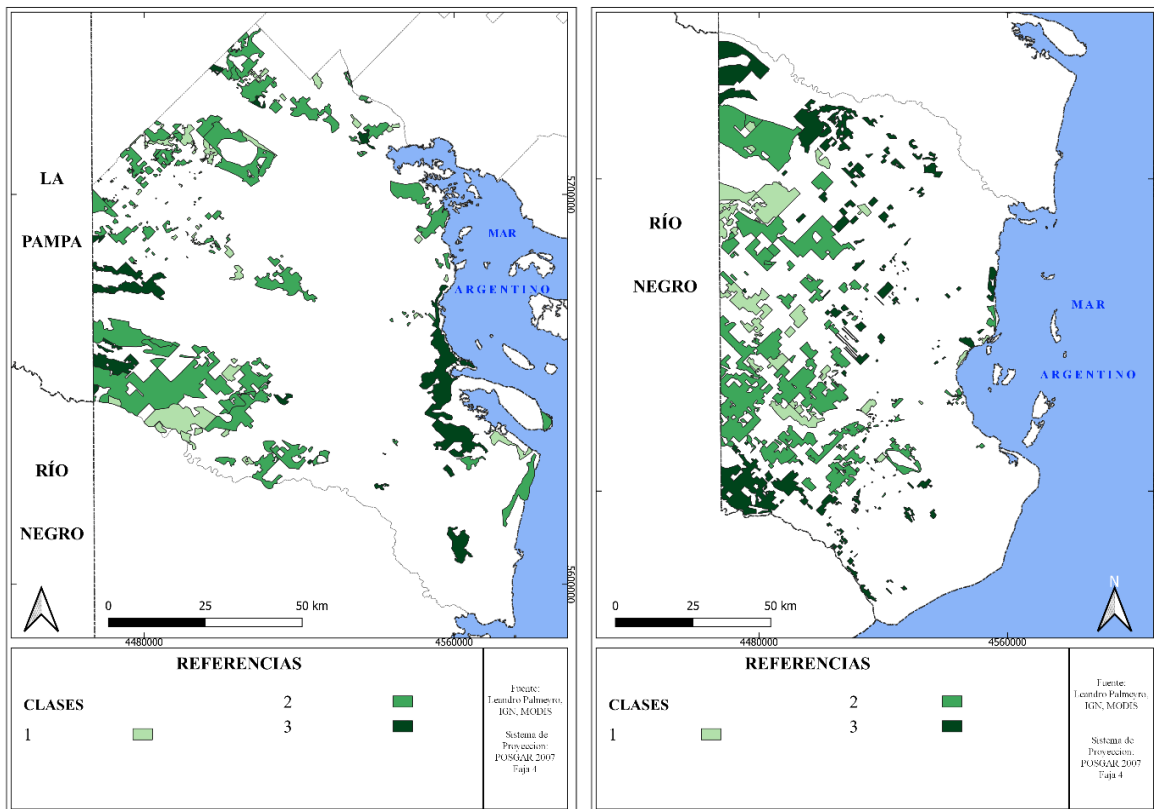


Figura 7: Clases correspondientes a la variabilidad anual de fPAR para los partidos de Villarino y Patagones. Fuente: Leandro Palmeyro, 2021

En la figura 8 se presenta la caracterización funcional de las parcelas pertenecientes a los hábitats seleccionados en cada partido. Las parcelas clasificadas con valores 6 y 5 son las que presentan un *mayor funcionamiento ecosistémico*, debido a que tienen altos valores de fPAR a lo largo del año, con una baja variación anual lo que indicaría un sistema natural estable a lo largo del año. La conservación de estos espacios contribuye a disminuir el impacto de los cambios en las coberturas del suelo en los servicios ecosistémicos brindados por el área. Las parcelas de valor 4 presentan un *funcionamiento ecosistémico intermedio*, debido a que al menos una de las dos variables analizadas presenta valores de 1 o ninguna de las dos llega a valor 3. Por último, las parcelas de valores 3 y 2 son las que presentan un *menor funcionamiento ecosistémico* ya que sus valores promedio de fPAR anual son bajos o son muy variables a lo largo del año, representando cierta inestabilidad anual.

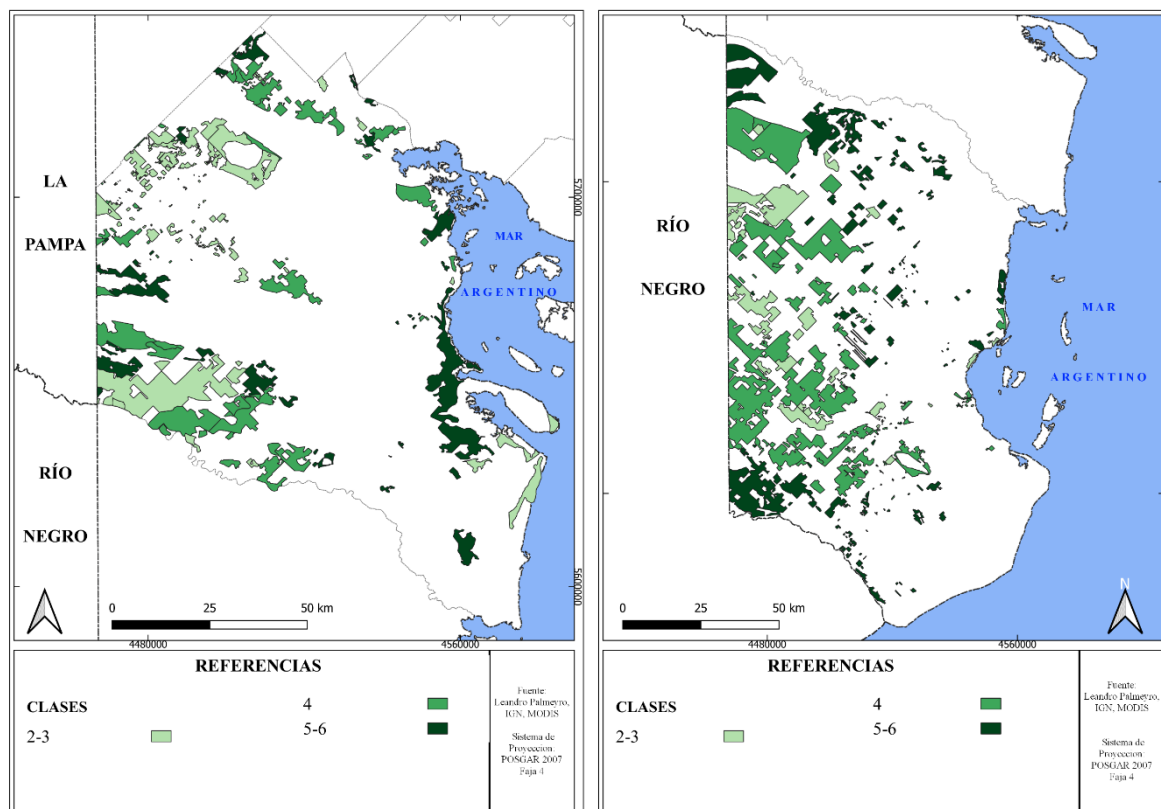


Figura 8: Clasificación del funcionamiento ecosistémico de los hábitats seleccionados del Partido de Villarino. Fuente: Leandro Palmeiro, 2021

Conclusiones

A partir de mediados del siglo XX el avance de la frontera agrícola y el desmonte para combustibles o ganadería han sido las principales causas que rigen los cambios en los usos y las coberturas de los suelos de los partidos de Villarino y Patagones. Tanto dentro del área de riego como en secano numerosas hectáreas de arbustos cerrados y abiertos han sido desmontados alterando la biodiversidad de estos hábitats. Su intervención no sólo trajo consecuencias estructurales a la flora y la fauna de estos ambientes, sino que también modificó su funcionamiento al alterar los flujos de energía y materia que presentaba la cobertura de origen. Estas alteraciones dan como resultado una merma en la provisión de ciertos servicios ecosistémicos, principalmente los de regulación, soporte y culturales, en pos de un aumento de servicios de provisión materializados en las cosechas y la leña utilizada como combustible.

El contexto de vulnerabilidad que presenta la región debido a sus variaciones climáticas interanuales y sus suelos de textura franco-arenosa propensos a la erosión hídrica y eólica,

aumenta la necesidad de conservación de hábitats naturales que puedan regular el clima y fijar los suelos. El Ordenamiento Territorial posee instrumentos que permiten planificar los cambios en el uso y la cobertura de los suelos, brindando la posibilidad de controlar y minimizar las consecuencias ya expuestas.

Tras la estimación del estado plausible se pudo confirmar que durante la próxima década la superficie destinada a cultivos aumentará aproximadamente en 50.000 hectáreas. Este avance de la frontera agrícola se estima que ocurra principalmente sobre coberturas naturales que almacenan la mayor parte de carbono almacenado por hectárea como son los bosques mixtos (102 tC/Ha), los arbustos cerrados (73 tC/Ha) y los arbustos abiertos (56.5 tC/Ha). Con respecto a dichos hábitats, se localizan principalmente en la franja longitudinal oeste del área de estudio, mayormente en áreas de secano y alejados de las vías de transporte principales presentes en el área.

La conservación de estos ecosistemas permitiría que el carbono que almacenan no sea liberado a la atmósfera en forma de CO₂ y que los suelos no queden descubiertos y propensos a ser erosionados. Sin embargo, como quedó expuesto en el estado plausible, el avance de la frontera agrícola y desmonte de estos hábitats es inminente, por lo que caracterizarlos funcionalmente permite incluir dentro de la planificación territorial del área de estudio la prioridad de conservación de los hábitats que almacenen mayor carbono y que estén brindando una mayor y mejor provisión de servicios ecosistémicos, principalmente de soporte y regulación.

La teledetección y los SIG ofrecen la posibilidad de obtener, integrar y procesar cuantiosa y compleja información geográfica que permitió el desarrollo de un modelo de la realidad. Esto dio la facultad de obtener la localización y extensión de los hábitats a analizar y los flujos de energía entre los ecosistemas y la atmósfera que presentó cada cobertura. El indicador utilizado para realizar la caracterización funcional fue el fPAR del año 2019, usando como variables el promedio y la variabilidad anual.

Tras el análisis realizado, se reconocieron en los partidos de Villarino y Patagones las parcelas de los hábitats que presentaron un mayor carbono almacenado y un mejor funcionamiento ecosistémico, representados en las salidas cartográficas como clase "5-6". Estos se encontraron en su mayoría cerca de los ríos o del mar, probablemente beneficiados por la humedad que provee dicha localización. Con respecto a la extensión de las parcelas, las de menor extensión, principalmente en Villarino, presentaron un menor funcionamiento ecosistémico, atribuido probablemente a las consecuencias propias de la fragmentación de los ecosistemas y su consecuente alteración de estructura y funcionamiento.

Si bien es cierto que el Ordenamiento Territorial implica un análisis integral y multifactorial del territorio en cuestión y los procesos que en él ocurren, la construcción del modelo geográfico de esta investigación permitió un primer acercamiento a una planificación de los cambios en los usos y coberturas del suelo desde un enfoque ecosistémico. Por lo expuesto, se corroboran las hipótesis planteadas en el inicio de la investigación. En este contexto, la opción de tomar un enfoque ecosistémico al planificar estos cambios podría prevenir o menguar las consecuencias ecosistémicas de dichas variaciones, evidenciando un enorme potencial para la conservación de los ecosistemas y sus servicios proporcionados.

Referencias bibliográficas

- Baeza, S. & Paruelo, J. (2014). Land Use / Land Cover Change (2000 – 2014) in the Rio de la Plata Grasslands : An Analysis Based on MODIS NDVI Time Series. *Journal of Remote Sensing* 72, 381: 1–22.
- Cabello, J., Alcaraz-Segura, D., Altesor, A. & Delibes, M. (2008). Funcionamiento ecosistémico y evaluación de prioridades geográficas en conservación. *Ecosistemas* 17(3), 53-63.
- Carvajal, A. (2010). Servicios Ecosistemicos: Su relacion con la geografía y la toma de decisiones ambientales. *Nadir: revista electrónica de Geografía austral*. 2(1), 43–50.

- Corks, S. & Proctor, W. (2005). Implementing a Process for Integration Research: Ecosystem Services Project, Australia. *Journal of Research Practice* 1(2), 1–25.
- Daily, G., Ehrlich, P., Lubchenco, J. & Mooney, H. (1997). Ecosystem Services: Benefits Supplied to Human Societies by Natural. *Journal of Issues in ecology* 2. Spring 1997. Ecological Society of America.
- Dumrauf, V. (2008). Evolución de la frontera agrícola en los partidos de Villarino y Patagones, período 1975-2005 y su implicancia en el deterioro ambiental. Tesis de grado. Universidad Nacional del Sur.
- Fernandez, N. & Piñeiro, G. (2008). La caracterización de la heterogeneidad espacial de los ecosistemas: el uso de atributos funcionales derivados de datos espectrales. *Ecosistemas* 17(3), 64-78. ISSN:1132-6344. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54017106006>
- Foley, J. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science* 309, 570. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Gabella, J., Luorno, M. & Campo, A. (2013). Análisis integral de un sistema territorial degradado. El caso del partido de Patagones, Buenos Aires, Argentina. *Proyección* vol. VIII: 68-91.
- Gomez Orea, D. (1994). Ordenación del Territorio. Una aproximación desde el Medio Físico. Ed. Instituto Tecnológico Geo-Minero de España-Ed. Agrícola Española, S.A. 238 p.
- Gross, F. (1998) Ordenamiento Territorial: El manejo de los espacios rurales. *Eure*, vol. XXIV, núm. 73, diciembre, 1998, p. 0. Pontificia Universidad Católica de Chile Santiago, Chile.
- Humacata, L., & Buzai, G. (2018). Análisis espacial de los cambios de usos del suelo con Sistemas de Información Geográfica. Recuperado de: <https://ri.unlu.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/rediunlu/791/buzai.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Kosmus, M., Renner, I. & Ullrich, S. (2012). Integración de los servicios ecosistémicos en la planificación del desarrollo: Un enfoque sistemático en pasos para profesionales basado en TEEB. *Deutsche Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)*.
- Levi, S. (1970). Capítulo 8. Concepto de Geografía Aplicada. *Investigaciones Geográficas (MX)*, Num. 03. Disponible en: <http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/58855/51843>
- Martínez, M., Viguera, B., Donatti, C. & Harvey, C. (2017). La importancia de los servicios ecosistémicos para la agricultura. *Materiales de Fortalecimiento de Capacidades Técnicas Del Proyecto CASCADA (Conservación Internacional-CATIE)*. 40 páginas. <https://doi.org/10.7818/re.2014.22-1.00>
- Metzger, M., Rounsevell, M., Acosta-Michlik, L., Leemans, R. & Schröter, D. (2006). The vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agriculture Ecosystems & Environment* 114, 69–85. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.025>
- Meyer, W. & Turner, B. (1992). Human population growth and global land-use/cover change. *Annual Review of Environment and Resources* 23, 39–61.
- Ochiuzzi, S. (2011). Herramientas para la evaluación y gestión del riesgo climático en el sector agropecuario. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación.
- Paruelo, J.M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*, vol. 17, núm. 3, septiembre-diciembre, 2008, pp. 4-22. Asociación Española de Ecología Terrestre Alicante, España.
- Recalde, D. & Zapata, R. (2007). La Ordenación del Territorio Recursos Naturales. Ediciones INTA. Serie publicaciones del Área de Investigación del INTA EEA La Rioja. ISSN 1669-323X.

- Sanchez, R. (2011). Historia de la evolución de las condiciones ambientales de los partidos bonaerenses Villarino y Patagones. Jornada sobre "Evolución y Futuro del Desarrollo de Producciones Agrícola-Ganaderas en el S.O. Bonaerense". pp.362–372. ISSN: 0327-8093.
- Sánchez, R., Pezzola, A. & Cepeda, J. (1998) Caracterización edafo climática del área de influencia del INTA EEA Hilario Ascasubi. Partidos de Villarino y Patagones. INTA EEA Hilario Ascasubi. Boletín de divulgación N°18, 1998.
- Staiano, L., Camba Sans, G. H., Baldassini, P., Gallego, F., Texeira, M. A., & Paruelo, J. M. (2021). Putting the ecosystem services idea at work: Applications on impact assessment and territorial planning. *Environmental Development*, 38, 100570. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100570>
- Vega-Araya, M. & Alvarado-Barrantes, R. (2019). Análisis de las series de tiempo de variables biofísicas para cuatro ecorregiones de Guanacaste, Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales* 53(2), 60–96. DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.53-2.4>
- Vitousek, P., Mooney, H., Lubchenco, J. & Melillo, J. (1997). Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science* 277 (5325): 494-499. DOI:10.1126/science.277.5325.494
- Winschel, C. (2017). Integración por medio de geotecnologías de la información ambiental en estudios de degradación de los suelos para los partidos de Villarino y Patagones, Provincia de Buenos Aires, Argentina. (Tesis doctoral). Universidad Nacional del Sur.

INVESTIGACIONES Y DESARROLLOS EN TEMAS DE FÍSICA DE COMPONENTES ATMOSFÉRICOS, RADIACIÓN SOLAR, CAMBIO CLIMÁTICO Y CLIMA ESPACIAL

Rubén Piacentini; María Micheletti; Adriana Ipiña; Ivan Novara; Daniel Berdichevsky

Grupo de Física de la Atmósfera, Radiación Solar y Astropartículas, Instituto de Física Rosario (CONICET – Universidad Nacional de Rosario), Rosario, Argentina

ruben.piacentini@gmail.com

Resumen

En el Instituto de Física Rosario, CONICET-Universidad Nacional de Rosario, se realizan desde hace décadas investigaciones y desarrollos en temas de Física de la Atmósfera y afines, tales como Radiación y Aprovechamiento solar, Cambio climático y sus impactos y Astropartículas, en este último tema, dado que la Atmósfera es el detector natural de las partículas que provienen del espacio exterior. Se describen en el presente Capítulo, las actividades realizadas y en curso en los siguientes temas: a) Física de los componentes atmosféricos: Aerosoles (partículas microscópicas en suspensión atmosférica) y su impacto en el ambiente de la zona de Rosario, Argentina e islas del río Paraná y en la detección de astropartículas realizadas en el Observatorio Auger, situado en Malargüe, Argentina y Componentes gaseosos en particular Dióxido de azufre y su posible impacto en la zona de los Andes de Argentina; b) Radiación solar y su relación con la salud de la piel humana, el índice de riesgo solar y la síntesis de vitamina D₃; c) Posibilidad de Aprovechamiento solar fotovoltaico en diferentes sitios de Argentina, que presentan significativos recursos solares para implementar centrales solares de potencia, superando aún emplazamientos similares de Africa y Asia; d) Cambio climático y su relación con: i) la temperatura subsuperficial (hasta unos cientos de metros de profundidad), ii) los cánceres de piel no-melanoma (baso celulares y espinocelulares), iii) la seguridad alimentaria, iv) los criterios de Sustentabilidad para que los desarrollos tecnológicos puedan ser realizados cuidando los recursos naturales y minimizando la contaminación ambiental y el calentamiento global y v) El clima espacial. Los principales Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas a ser llevados a cabo hasta 2030, que están relacionados con estas actividades son: Objetivo 3. Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades, Objetivo 7. Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos y Objetivo 13. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

Palabras clave: *radiación solar, atmósfera, cambio climático, clima espacial*

Introducción

El Grupo de Física de la Atmósfera, Radiación Solar y Astropartículas viene realizando investigación, desarrollo y extensión desde la creación del Instituto de Física Rosario (IFIR), dependiente de CONICET y de la Universidad Nacional de Rosario, hacia comienzos de la década de 1980.

En sus inicios, las investigaciones se centraron en la radiación solar Ultravioleta que llega a la superficie terrestre (rango 280-400 nm) y más específicamente la componente UVB más energética (rango 280-320 nm), dado el poco conocimiento que se tenía de esta parte del espectro solar en Argentina y la región. Teniendo en cuenta que principalmente el Ozono (O₃) estratosférico (o capa de ozono) y los aerosoles (material particulado en suspensión atmosférica) atenuaban en gran proporción a la componente UVB solar, se decidió profundizar en estos temas. De este modo, se realizaron en el Grupo varias tesis doctorales relativas a Radiación solar UV, sus efectos biológicos y al comportamiento del Ozono y los aerosoles a estas latitudes del hemisferio Sur. Fue así posible participar en importantes proyectos de investigación internacionales y nacionales (con investigadores de instituciones tales como NASA y National Center for Atmospheric Research (NCAR) de Estados Unidos, Colaboración internacional del Observatorio de Astropartículas Pierre Auger, CNRS de Francia, Fundación RUAJ de Países Bajos, CONAE y CEILAP de Argentina) y de Universidades (de Paris/Francia, Gent/Bélgica, Coventry/Gran Bretaña, Utrecht/Países Bajos, Federale de Pernambuco/Brasil, Yachay Tech Ciudad del Conocimiento/Ecuador y Universidad Autónoma de Nuevo León en México, entre otras). Además, en Comisiones de Especialistas que redactaron los informes mundiales sobre Scientific Assessment of Ozone Depletion de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Estos informes fueron la base de las decisiones que debían tomar los países firmantes del Tratado de Montreal y sus Enmiendas, promovido por Naciones Unidas, para reducir las emisiones de los contaminantes del Ozono estratosférico.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en estas investigaciones, el Dr Rubén Piacentini fue invitado a participar de investigaciones del equipo TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer), instalado en diferentes satélites del Goddard Space Flight Center de la NASA, medidor durante más de un cuarto de siglo de la columna total de Ozono atmosférico, de la radiación solar Ultravioleta de acción eritémica (alerta de daño a la piel) y de la profundidad óptica de aerosol, entre otras variables atmosféricas. Además, por las investigaciones realizadas sobre Cambio climático y afines, fue invitado como Jurado Experto de Informes redactados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en Inglés) de Naciones Unidas.

Se ha desarrollado el Índice UV, indicador del riesgo solar, el cual fue transferido al Servicio Meteorológico Nacional y difundido diariamente durante más de una década.

Otros temas investigados fueron el Cambio climático en relación al comportamiento de la temperatura ambiente, al impacto en los cánceres de piel no-melanoma y el efecto del calentamiento del aire ambiente en la temperatura sub-superficial. Se ha comenzado a investigar también en temas de Sustentabilidad y en el Clima espacial (en este último tema, con la participación como invitado a formar parte del Grupo, del Dr Daniel Berdichevsky, investigador del Goddard Space Flight Center, NASA).

Física de los componentes atmosféricos

Aerosoles y su impacto en el ambiente

Los aerosoles tienen incidencia y aplicación en múltiples problemas científico-tecnológicos. Los aerosoles tienen incidencia y aplicación en múltiples problemas científico-tecnológicos relevantes. En nuestro Grupo analizamos morfológica y elementalmente dichas partículas colectadas mediante diversas técnicas experimentales, registramos valores de concentraciones, obtenemos datos satelitales de AOD (espesor óptico de aerosoles), analizamos mediante modelización la dirección de arribo de las masas de aire que transportan los aerosoles atmosféricos, así como la influencia de las variables meteorológicas en los resultados sobre el tipo y concentración de aerosoles. Se analizaron aerosoles urbanos y rurales, cuya incidencia es de importancia en

problemas de salud, contaminación urbana y desgaste de obras de arte, edificios, etc., en el caso de los aerosoles urbanos y en problemas de astronomía/astrofísica así como conservación del hábitat y las especies vivas, en el caso de los aerosoles rurales.

En la ciudad de Rosario se investigaron los aerosoles en situación atípica de alta contaminación, como el arribo de cenizas volcánicas del volcán Puyehue (Micheletti et al., 2013), así como la primera medición de material particulado local en situación estándar de polución urbana, la cual se complementó con datos satelitales.

Tabla 1: Instrumentos/sensores tenidos en cuenta para el análisis de la variación temporal de los aerosoles

Instrumento/ sensor satelital	Satélite	Misión		Resolución espacial del producto AOD	Longitud de onda
		Inicio	Fin		
MODIS	Terra & Aqua	2002	-	1° x 1°	550 nm
MISR	Terra	2002	-	0.5°x 0.5°	555 nm
SeaWifs	SeaStar	1997	2010	0.5°x 0.5°	550 nm

La Dra. María Isabel Micheletti condujo estos primeros estudios acerca de la situación de aerosoles típica de Rosario, mediante mediciones y análisis de datos satelitales. En conjunto con la Dra. Lara Della Ceca, se obtuvieron valores promedios de AOD para la ciudad de Rosario y alrededores con distintas plataformas satelitales (ver tabla 1 y figura 1). Para el período 2005-2015, se obtuvo un comportamiento estacional del AOD en el área de estudio, con valores máximos en el rango 0.05-5.1 durante los meses de primavera (particularmente en Septiembre) y valores más bajos, en el rango 0-0.15, en los meses de invierno (Junio-Julio). Este comportamiento indica que las variables meteorológicas y las fuentes de material particulado modulan el comportamiento de la carga de aerosoles a lo largo de las estaciones del año.

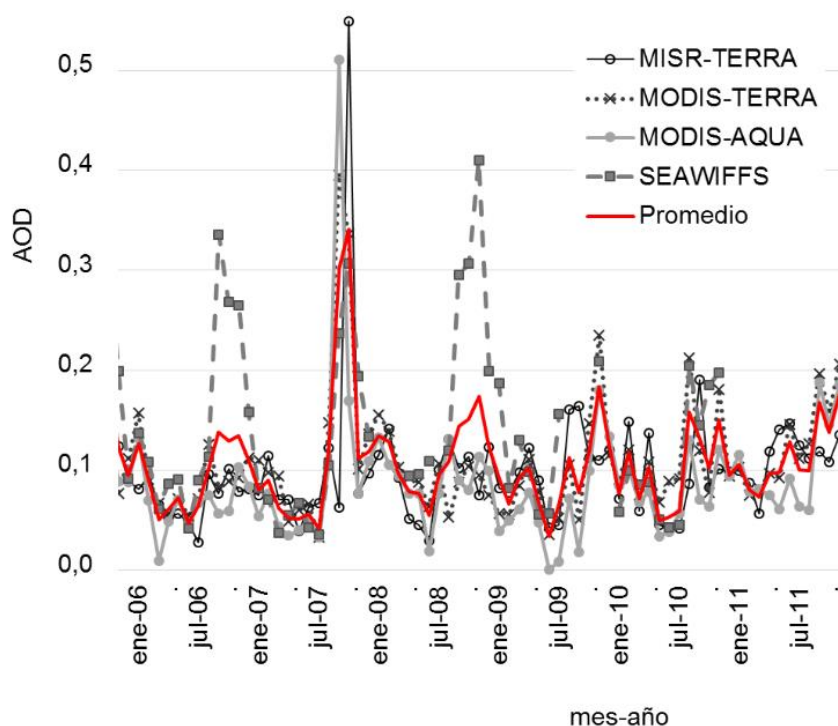


Figura 1. Serie temporal de la media mensual de AOD obtenida de distintas plataformas satelitales y su valor promedio. La figura presenta una porción del período completo analizado (2005-2015).

Por otra parte, un análisis espacial para Rosario, con el producto satelital AOD-MAIAC (con resolución espacial de 1 km), mostró alta concentración de aerosoles en las zonas portuarias de Rosario (que bordean a la ciudad en el Este, desde el NE hasta el SE), así como en las avenidas de mayor tránsito vehicular, en particular, a lo largo de la Avenida de Circunvalación (la cual, es además, una zona de emplazamiento de diversas industrias).

Se realizaron en Rosario los primeros muestreos de material particulado, cuantificando concentración de PM_{2.5} (partículas de dimensiones menores o iguales a 2.5 micrones) y concentración elemental en dichas muestras. Estos muestreos se efectuaron en los meses de vacaciones de verano y también en otoño, encontrando mayores valores de concentración en este último caso, en coincidencia con la mayor actividad laboral, comercial y de circulación urbana. Este trabajo se realizó en colaboración con el grupo de la Dra. Hebe Carreras, de IMBIV (CONICET-Universidad Nacional de Córdoba). El muestreador de PM_{2.5} utilizado fue el Impactador Harvard modelo ChemComb™ 3500.

En Rosario se colectaron también muestras con el equipo Lanzoni VPPS 2000 del IFIR, analizándose cenizas volcánicas provenientes del volcán chileno Puyehue, que entró en erupción en junio de 2011, esparciendo sus cenizas por gran parte de Argentina (Micheletti et al., 2013). También se colectaron muestras con dicho equipo, para estudios de material particulado aerobiológico (polen, esporas).

En Malargüe, Provincia de Mendoza, se viene trabajando desde hace años en la colección y análisis del material particulado atmosférico. Esto es de importancia, tanto para estudios de aerosoles en la región y su transporte y deposición en el Atlántico Sur, como para estudios de transferencia radiativa atmosférica de la luz de fluorescencia producida durante el pasaje de lluvias de *astropartículas* (también denominadas *rayos cósmicos*), dado que allí se encuentra situado el Observatorio Pierre Auger de rayos cósmicos ultraenergéticos, correspondiente a la Colaboración Internacional Pierre Auger (www.auger.org). Dicho sitio geográfico es de especial importancia para estudios atmosféricos en la región, ya que consta de una vasta red de monitoreo, tanto de aerosoles atmosféricos como de nubes y variables meteorológicas. La Dra. Micheletti, en colaboración con científicos de distintas instituciones nacionales e internacionales, viene llevando a cabo un proyecto de caracterización de aerosoles en el sitio. Para ello, se han colectado aerosoles in-situ y se los han analizado, mediante técnicas experimentales avanzadas como gravimetría, PIXE, SEM/EDX (Micheletti et al., 2012). En ese ambiente mayormente natural de tipo desértico, los aerosoles más abundantes hallados fueron los aluminosilicatos, con distintas proporciones de elementos químicos representativos de los componentes minerales típicos del suelo, lo que indica que la mayoría de los aerosoles son polvo del lugar, en suspensión. Esto también condice con los valores de concentraciones obtenidos mediante gravimetría aplicada a las muestras, que presentaron valores especialmente bajos durante días de nieve, que cubrió el suelo dejando sepultado el polvo e impidiendo su resuspensión en el aire. Una fracción de los aerosoles (atribuible a elementos químicos por debajo del límite de detección) puede deberse a materia orgánica.

También se han analizado para Malargüe, datos de concentración de aerosoles obtenidos mediante el espectrómetro de aerosoles Grimm 1.109 del Instituto de Física Rosario y se han correlacionado con trayectorias de masas de aire que llegan al sitio de medición. Para ello se ha empleado el programa HYSPLIT (Draxler y Rolph, 2013), obteniéndose una correlación entre los valores de concentraciones por rango de tamaños de los aerosoles y las direcciones de los vientos (Micheletti, Louedec, Freire, Vitale y Piacentini, 2017).

Se analiza, además, la distribución horizontal de los aerosoles en el Observatorio Auger, que consta de una superficie de 3000 Km², para evaluar las inhomogeneidades laterales (u horizontales) en la distribución de los mismos, de importancia para los estudios de transferencia radiativa de la luz de fluorescencia de rayos cósmicos en dicho Observatorio.

En colaboración con científicos del Instituto Miguel Lillo, U.N.Tucumán, se analizó el material particulado en la ciudad de San Miguel de Tucumán y alrededores, mediante mediciones in-situ y análisis satelital (García et al., 2018). Se investigó la variabilidad espacio-temporal, encontrándose patrones estacionales relacionados con la actividad de la caña de azúcar y posterior quema del

residuo vegetal para generar energía. Se analizó un período de 7 años (septiembre 2006 – agosto 2013) de aerosoles colectados en San Miguel de Tucumán, con un muestreador de tipo Hirst, modelo Burkard, instalado en el techo del edificio de Botánica de la Fundación Miguel Lillo (26°49'53.19" S, 65°13'18.74" W, 452 m asl). Las partículas atmosféricas de todos los tamaños quedaban capturadas en cintas transparentes (Melinex), que fueron luego preparadas según las recomendaciones de la Red Española de Aerobiología (Aira, Jato e Iglesias, 2005) y observadas con microscopio Carl Zeiss Axiostar Plus (100X de objetivo) equipado con cámara digital. Se analizaron los días domingos de 22:00 a 23:00 hs (hora local, UT – 3 hs), para obtener la situación de base de los aerosoles (valores mínimos), que aumentan durante los días hábiles y horarios de máxima actividad. Esto permite analizar la influencia de las variaciones de los aerosoles para las distintas estaciones del año en la región analizada, en situación de mínima exposición a las fuentes antropogénicas urbanas locales. Las concentraciones de partículas (partículas/m³) obtenidas a partir de estas mediciones, presentan un pico en la época de primavera (meses de septiembre, octubre), en coincidencia con lo encontrado en otros sitios de Argentina, como Malargüe. En el caso de Tucumán, durante fines de invierno y comienzos de primavera ocurre la quema de los restos de la caña de azúcar y plantas de cítricos, que conlleva a un aumento de material particulado en la atmósfera, con predominio de carbón orgánico y carbono negro (*black carbon*). Además de los ciclos estacionales dominados por la actividad humana (urbana y rural) y las variables climatológicas en relación con la topografía del lugar (como la dirección de los vientos y circulación de las masas de aire), se encontró una tendencia positiva en los niveles de material particulado atmosférico a lo largo de los 7 años analizados, lo que indica un aumento de emisiones que puede resultar perjudicial para la salud de la población y para el Cambio climático (Piacentini y Micheletti, 2015).

Los casos de estudio mencionados muestran la amplitud que abarca el campo de investigación de los aerosoles atmosféricos y sus aplicaciones con impacto en el ambiente y la calidad de vida de la población, así como en problemas científicos-tecnológicos relevantes, dado que los aerosoles intervienen en la transferencia radiativa atmosférica y, por consiguiente, en las áreas astronómica/astrofísica/solar. En Argentina, los estudios todavía son mayormente segmentarios y centrados en grandes urbes. Por ello, la Dra. María Isabel Micheletti está desarrollando tareas de investigación en colaboraciones científicas tendientes a articular datos y ampliar el conocimiento de los aerosoles atmosféricos en zonas más extensas de Argentina, para ir completando el panorama de dichas partículas en el país y la región Sur del subcontinente.

Otro de los temas investigados, comparando mediciones terrestres y datos satelitales, fue la variabilidad del material particulado atmosférico (aerosoles) durante 2014 en la ciudad de Buenos Aires (Della Ceca, Micheletti y Piacentini, 2017).

Se investigó la deposición de polvo atmosférico sobre las hojas de diferentes vegetales y la correspondiente reducción de masa vegetal por disminución de la fotosíntesis, medida a través del comportamiento de los parámetros de intercambio de gases (González, Prado y Piacentini, 2014). Dada la relación existente entre la contaminación ambiental por material particulado y el desarrollo de la pandemia de COVID 19, producida por el coronavirus SARS-CoV-2 (ver por ejemplo Wu, Nethery, Sabath, Braun y Dominici, 2020), uno de los miembros del Grupo (Rubén D Piacentini) integrante de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, fue invitado por dicha Academia a escribir en colaboración, un artículo sobre Energía y contaminación en grandes ciudades y su impacto en la salud, principalmente en relación a la mencionada pandemia (Laborde y Piacentini, 2020).

Gases atmosféricos

Teniendo en cuenta la numerosa cantidad de volcanes en la zona de los Andes, que pueden llegar a afectar al erupcionar los posibles sistemas de observación astrofísica/astronómica y las centrales solares de potencia, se investigó la evolución del Dióxido de azufre (SO₂) y de los aerosoles sobre la muy limpia atmósfera de los sitios San Antonio de los Cobres y El Leoncito, en Argentina (Della Ceca, Michelletti, Freire, Garcia y Piacentini, 2017).

Radiación y aprovechamiento solar

Radiación solar espectral e Índice UV

El Sol emite radiación electromagnética, principalmente en los rangos de longitudes de onda (λ): Ultravioleta (UV), Visible (V) e Infrarrojo (IR). La intensidad de la radiación solar que llega a nivel del suelo, depende de la ubicación geográfica, la composición atmosférica, las horas del día y los días del año. El rango ultravioleta (UV) es el más energético por fotón incidente que llega a la superficie terrestre. La componente UV superficial se subdivide en dos rangos: UVB (290-320 nm) y UVA (320-400 nm).

Efectos de la radiación solar UV en la salud humana

La radiación solar UV interactúa con sistemas biológicos, desencadenando cambios en su conformación, según la sensibilidad de dichos sistemas a radiaciones UV de distintas longitudes de onda. En Fotobiología, se describe un efecto de este tipo a partir del espectro de acción biológica $S(\lambda)$ y la intensidad de la fuente incidente (CIE, 2014).

El espectro de acción eritémica representa la sensibilidad de una piel caucásica (Fototipo II en la clasificación de Fitzpatrick) para producir eritema (Fitzpatrick, 1988). La capacidad de una fuente UV para generar enrojecimiento de la piel, define la irradiancia eritémica

$$E_{er} = \int_{290nm}^{400nm} E(\lambda, t) S_{er}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Donde $E(\lambda, t)$ es el espectro solar (que depende del tiempo y de la longitud de onda) y $S(\lambda)$ es el espectro de acción eritémica. La representación más popular de esta definición es el Índice UV (IUV), que se obtiene al multiplicar E_{er} por $40 \text{ m}^2/\text{W}$. El IUV es una cantidad adimensional e internacionalmente reconocida para medir el riesgo de producir eritema en una escala de 0 a 20 (o más) (WHO, 2002). Por otro lado, la Dosis Eritémica Mínima (DEM) representa la energía por unidad de superficie para producir eritema en un intervalo de tiempo. La fórmula para obtener la DEM es

$$DEM = 1/40 \int_{t_1}^{t_2} IUV dt \quad (2)$$

Donde $t_2 - t_1$ es el Tiempo de Exposición Solar (TES) para alcanzar una DEM (CIE, 2014). La DEM de un fototipo II se encuentra en el rango $250\text{-}350 \text{ J/m}^2$ para radiación UVB y en el rango $300\text{-}450 \times 10^3 \text{ J/m}^2$ para radiación UVA (Fitzpatrick, 1988). De manera análoga, se define la irradiancia UV ponderada para la síntesis de vitamina D_3 en la piel humana en el intervalo 290-400nm (CIE, 2014). La Dosis mínima de pre-vitamina D_3 diaria (DDM) requerida para mantener los niveles adecuados de esta vitamina, con una exposición solar del 25% del cuerpo (brazos, manos y cara) se puede aproximar a un valor de $\frac{1}{4}$ DEM (Dowdy, Sayre y Holick, 2010). En el presente estudio se utilizan como referencia: a) el valor de la DEM como 2.5 veces la Dosis Eritémica Estándar (SED por su acrónimo en inglés; CIE 2014) y b) la relación $1 \text{ DDM} = \frac{1}{4} \text{ DEM} = 63 \text{ J/m}^2$.

El conocimiento de la radiación solar a nivel de la superficie terrestre es de fundamental importancia, por la gran cantidad de aplicaciones en: aprovechamiento energético, acciones biológicas, procesos atmosféricos y salud humana, entre otras. Nuestro Grupo viene investigando desde hace décadas la radiación solar y artificial en el rango 290-400 nm. Algunos de los trabajos realizados en los últimos años incluyen: a) Las extremas condiciones climáticas y de radiación solar en la Puna de Atacama donde se han desarrollado microorganismos extremófilos que se originaron al comienzo de la vida en la Tierra (hace miles de millones de años) (Albarracín et al., 2015), b) El desarrollo de un algoritmo y plataforma de cálculo *online* para calcular los Tiempos de Exposición Solar (TES) adecuados en el tratamiento de Psoriasis (López-Padilla, 2020), c) El desarrollo de un algoritmo para la modelización y el control de la radiación solar total, empleando el método de la derivada (Salum y Piacentini, 2015), d) La comparación de tres métodos de derivación de la irradiancia solar efectiva para la producción de pre-vitamina D_3 en la piel, en la ciudad de Rosario, Argentina (Dávalos, Ipiña y Piacentini, 2020) y e) La elaboración del primer

protocolo en Argentina y su aplicación por medio de la técnica de fotoparches, para el diagnóstico de Dermatitis por Contacto Fotoalérgica (Russo et al., 2018)

Se desarrollaron estudios sobre el Índice UV y componentes atmosféricos que lo atenúan en distintos lugares geográficos: Santiago de Chile (Cabrera, Ipiña, Damiani, Cordero y Piacentini, 2012), Ibarra, Ecuador (Huaca et al., 2018) y Ciudad de México (Ipiña, López-Padilla, Retama, Piacentini y Madronich, 2021). Además, se efectuó una propuesta de modificación de la escala cualitativa de este índice (Zaratti et al., 2014).

En relación al coronavirus SARS CoV-2 responsable de la pandemia de COVID 19, se realizó una investigación para determinar la relación entre el Índice UV (que es medido e informado diariamente en muchos lugares del planeta) y el tiempo de inactivación de dicho coronavirus, expuesto en su propagación en el exterior a la radiación solar ultravioleta, en unos 270 lugares geográficos de ambos hemisferios (Herman y Piacentini, 2021).

Síntesis de pre-vitamina D₃ e incidencia de casos de COVID-19: sus afectaciones por los incendios en el Delta del río Paraná

Se estima que entre el 80-95% de los incendios forestales que ocurren a nivel mundial, derivan de actividades antropogénicas (Balch et al., 2015; Leys, Marlon, Umbanhowar y Vannièrre, 2018; SINAGIR, 2021). La quema de pastizales como método de barrido para la explotación ganadera y agrícola, se ha implementado desde hace más de dos siglos en regiones tropicales y subtropicales del continente americano (Allen y Palmer, 2011; Portillo-Quintero, Sanchez-Azofeifa y do Espirito-Santo, 2013; Hoyos et al., 2017; Aragão et al., 2018; Jiang, Li, Liang y Yung, 2021).

En el año 2019, la combinación de incendios clandestinos y la extrema sequía, devastaron miles de hectáreas del Amazonas (World Resources Institute, 2019; Marengo et al., 2021). La prolongación de esta sequía durante el año 2020, el nivel más bajo del río en los últimos 50 años y el uso del fuego para eliminar los pastos nativos, provocaron cifras récord de incendios en la zona de los humedales del Delta del río Paraná (Borús et al., 2020). Si bien esta problemática no es reciente, creció a finales del siglo XX cuando en Argentina se aplicaron cambios del uso de suelo, desplazando el pastoreo hacia los humedales del río Paraná. A partir de la introducción de ganado a las islas, el rebrote de especies forrajeras se generalizó, al igual que la quema de la vegetación nativa. Esta práctica se lleva a cabo en los meses invernales y al comienzo de la primavera (Boné, Casa, Mataloni y Sfara, 2019). Una referencia sobre la gran magnitud de las densas columnas de humo, la biomasa quemada y los aerosoles emitidos hacia las ciudades del cordón Rosario-Buenos Aires, data de un evento en el año 2008 (Ipiña, Salum, Crinó y Piacentini, 2012).

Esta problemática trae como consecuencia directa el deterioro de la calidad del aire, que a su vez afecta la salud de la población. A pesar de que la quema de las islas es un problema que atañe a diversas disciplinas, la falta de un sistema de monitoreo ambiental ha obstaculizado la prevención, pero sobre todo, la atención del problema de manera integral. Actualmente los incendios en la región del Delta del río Paraná son captados satelitalmente (a una dada hora del día) o por alcance del humo a las zonas pobladas. La Figura 2 muestra una imagen satelital FIRMS-NASA, obtenida por el instrumento VIIRS-NOAA-20, donde se observan los incendios ocurridos durante el invierno del año 2020 sobre la región del Delta del río Paraná.

Los gases y las partículas emanadas por las quemas de pastizales, atenúan la radiación solar UV. Este hecho trae como consecuencia la reducción de la energía UV disponible para llevar a cabo la síntesis de pre-vitamina D₃ a través de la piel. Para cuantificar este efecto, se utilizaron mediciones del Índice UV durante el periodo de incendios del año 2020. El IUV fue medido a lo largo del día por la estación meteorológica Davis, ubicada en el IFIR (CONICET-Universidad Nacional de Rosario).

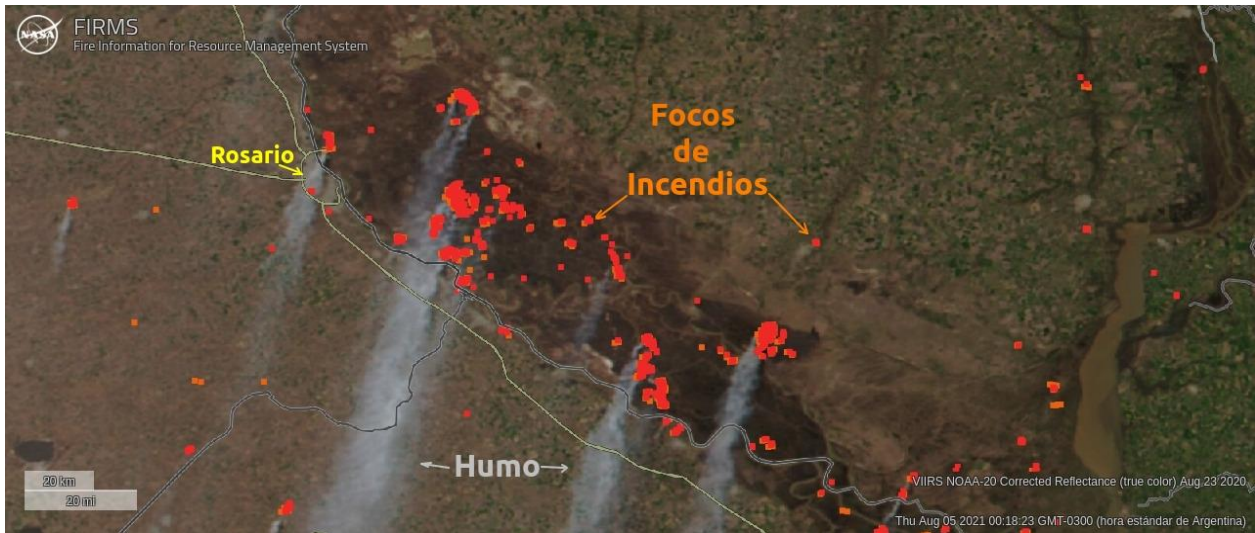


Figura 2: Imagen satelital FIRMS-NASA adaptada, mostrando los focos de incendios (puntos rojos) detectados por el instrumento VIIRS NOAA-20, el 23 agosto del 2020 en la región del Delta del río Paraná. La dirección del viento proveniente del Noreste, arrastró el humo (zonas grises) hacia las zonas pobladas.

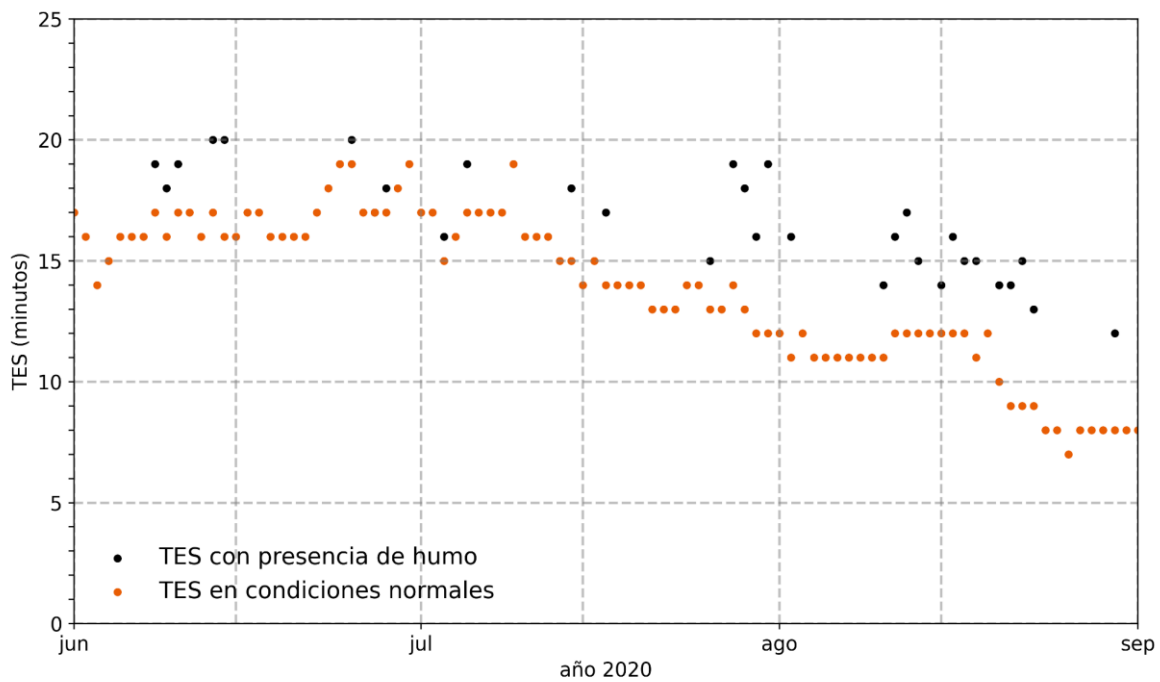


Figura 3: Tiempos de Exposición Solar (TES) en Rosario para acumular una DDM (=1/4DEM), con presencia de humo (puntos negros) y en condiciones normales sin humo (puntos naranjas) durante el periodo Junio-Agosto 2020.

Para calcular el IUV en condición libre de humo, se utilizó el modelo TUV (Madronich 1987). El conjunto de mediciones diarias durante los meses de incendios: junio, julio y agosto del 2020, se analizaron para seleccionar únicamente las mediciones con cielo sin nubes. Posteriormente se identificaron y seleccionaron 31 días con mayor presencia de humo y cielo libre de nubes, en la ciudad de Rosario. Los valores de Índice UV medidos y obtenidos con el modelo TUV, fueron utilizados para calcular las DDM al mediodía solar y se estimaron los TES correspondientes, empleando la ecuación (2).

En la figura 3 se representan los TES para alcanzar las dosis necesarias en la síntesis de vitamina D₃ diariamente, en condiciones normales (libre de humo) y con presencia de humo. En

este último caso, los TES aumentan debido a la atenuación de la radiación solar ocasionada por la contaminación atmosférica. La diferencia relativa porcentual (DR) es significativa respecto a los TES calculados en condiciones normales. El promedio de la DR para los días seleccionados fue de 28.1% es decir, los TES para acumular una DDM se extienden casi un tercio más, con presencia de humo.

Focos de incendios, PM2.5 y casos de COVID-19 en Rosario

Múltiples estudios relacionan de manera directa los pacientes con afecciones respiratorias y cardiovasculares, a la exposición a altas concentraciones de partículas provenientes de incendios forestales (Black, Tesfaigzi, Bassein y Miller, 2017; Marfori et al., 2020; Aguilera, Corringham, Gershunov y Benmarhnia, 2021). Esto adquiere relevancia en el contexto de la pandemia de COVID-19, con evidencia de que el material particulado (grueso y fino) contribuye a la transmisión aérea del virus SARS-CoV-2 causante de dicha enfermedad (Zhang, Li, Zhang, Wang y Molina, 2020; Wathore, Gupta, Bherwani y Labhasetwar, 2020; Frontera, Cianfanelli, Vlachos, Landoni y Cremona, 2020; Comunian, Dongo, Milani y Palestini, 2020; Zoran, Savastru, Savastru y Tautan, 2020; Mehmood, et al., 2021). Aunque continúa el análisis de los modelos de transmisión dominantes: de humano a humano y de los aerosoles como vehículo del virus (Chen, Jia and Han, 2021), se ha documentado que las ciudades altamente contaminadas vulneran el sistema respiratorio de los habitantes, haciéndolos más propensos al riesgo de contraer la enfermedad (Coccia, 2020; Zhu, Xie, Huang y Cao, 2020; Martelletti y Martelletti, 2020). Estrechamente vinculados a los incendios existen proyecciones de otras enfermedades respiratorias (como el asma o la influenza), cuyo comportamiento ante la quema de biomasa genera un incremento de las mismas. De ahí que se prevea una respuesta algo similar para los casos de COVID-19 (Henderson, 2020).

En el contexto de los incendios récord del año 2020 en las islas del río Paraná, se realizó un análisis para la ciudad de Rosario y alrededores, considerando: el número de focos de incendios, la concentración promedio de PM2.5 y el número de casos de COVID-19. Las fechas examinadas son del 12 de julio al 16 de agosto 2020. El criterio de selección de este periodo tiene dos características relevantes: 1) Permanencia en la restricción de movilidad para evitar contagios masivos y 2) El periodo comprende 3 eventos, donde el número de incendios es alto al igual que las concentraciones de PM2.5, formando tres “olas” de valores máximos.

Se consideraron las siguientes bases de datos y criterios:

- *Número de focos de incendios*: a partir de mediciones satelitales del equipo satelital VIIRS-NOAA-20 (FIRMS- NASA), fueron contabilizados con un código propio los focos de incendio en la región del Delta del río Paraná, frente al cordón poblacional Villa Constitución – Granadero Baigorria.
- *Promedios diarios de PM2.5*: fueron obtenidos de las mediciones del Sistema de Monitoreo de Alerta Temprana (SAT) ubicado en Granadero Baigorria y el sensor plume Labs Flow 2 ubicado en la ciudad de Rosario.

Número de casos de COVID-19: cuya información fue proporcionada por la Municipalidad de Rosario.

La figura 4 muestra el comportamiento del número de focos de incendios, la concentración de PM2.5 y la tendencia de los casos de COVID-19 en la zona de Rosario. Las quemadas de pastizales impactaron directamente en el incremento de las concentraciones de PM2.5, generando también valores máximos.

En este periodo se registraron dos eventos de precipitación, reduciendo los niveles de PM2.5 y apagando los focos de incendio. Estos puntos de inflexión dividen los tres eventos (cada uno con duración aproximada de dos semanas) que marcan una diferencia en el ascenso de los casos de COVID-19. En la Figura 4 se observa como la pendiente del número de casos positivos de SARS-

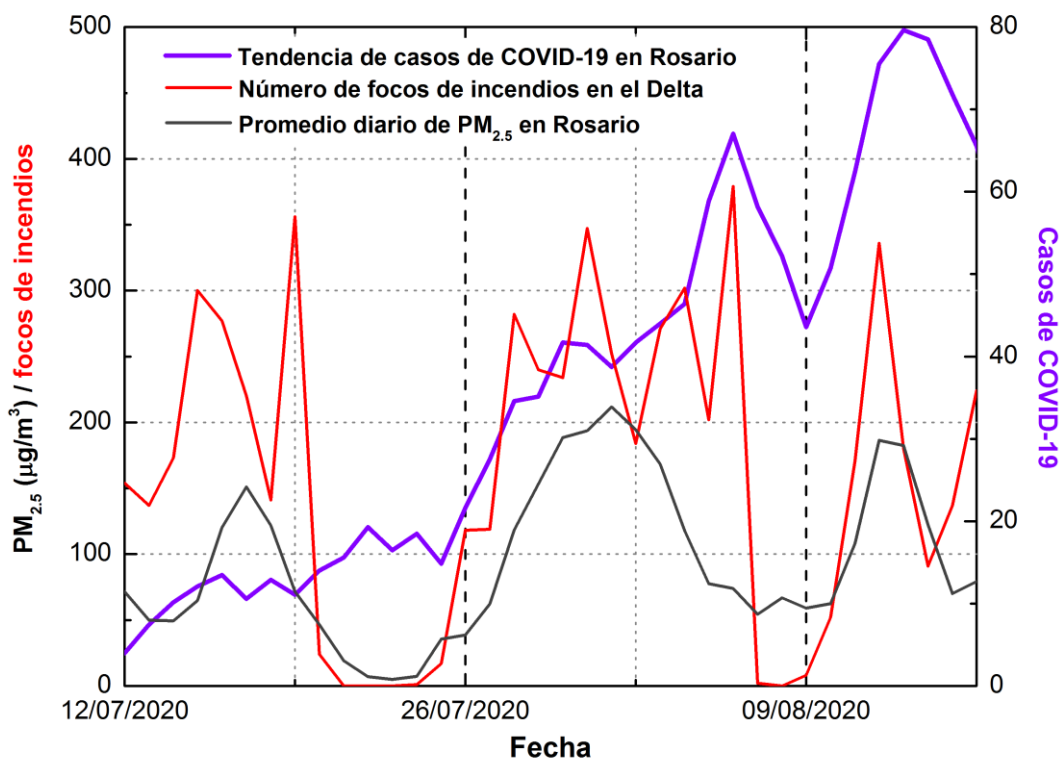


Figura 4: Número de focos de incendios a partir de mediciones satelitales VIIRS-NOAA-20, promedios de PM_{2.5} y tendencia de los casos de COVID-19 reportados en la ciudad de Rosario, en el periodo del 12 de julio al 16 de agosto 2020.

CoV-2 aumenta en cada periodo delimitado. Estos resultados sugieren que las altas concentraciones de PM_{2.5} pudieran influir en Rosario, en el incremento de la velocidad de contagios de COVID-19. Las quemadas de pastizales en la región del Delta del río Paraná, impactan a múltiples sistemas. Sin embargo, existen pocos estudios realizados de manera integral donde se relacionen sus efectos con la salud de las personas. Por lo anterior, es necesario extender estos estudios por medio del monitoreo de la concentración de PM_{2.5}, para emitir una alerta temprana, prevenir complicaciones ambientales y de salud pública.

Energía solar fotovoltaica

En relación a este tema, se analizó la relación entre la radiación solar espectral (en los rangos ultravioleta, visible e infrarrojo) y los componentes atmosféricos que la atenúan (principalmente Ozono, Dióxido de Carbono y aerosoles), con la producción de corriente solar fotovoltaica (Salum, Videla, Pedrosa, Cruceño y Piacentini, 2015). Además, se investigaron los sitios de los Andes de Argentina favorables para la ubicación de Observatorios astrofísicos/astronómicos/solares y de centrales solares fotovoltaicas (Piacentini et al., 2013; Piacentini et al., 2016; Freire et al., 2019; Della Ceca et al., 2019).

Como integrante del Proyecto Internacional ICLEI (Local Governments for Sustainability)-Municipalidad de Rosario, denominado "Rosario 100% Sustentable", el Dr Rubén Piacentini realizó una investigación sobre la posibilidad de dotar a la ciudad con Energía solar fotovoltaica para producción de electricidad, tanto con empleo de sistemas distribuidos ubicados en los techos y lugares de razonable disponibilidad solar, como con grandes centrales externas de potencia solar (Piacentini, 2020).

Cambio climático y sus impactos y Clima espacial

Se desarrollaron diversas líneas de investigación:

Cambio climático y cánceres de piel no-melanoma

En esta línea de investigación, se analizó (en colaboración con investigadores de diversas instituciones nacionales e internacionales) el impacto que está teniendo y puede tener en el futuro, el Calentamiento global (producido esencialmente por la actividad humana) en la salud y las posibles acciones que pueden llevarse a cabo para mitigar sus efectos. En relación con la salud, se ha analizado el incremento que pueden tener los cánceres de piel no-melanoma (carcinomas de células escamosas y de células basales) por aumento de la temperatura ambiente debida al Cambio climático, según distintos escenarios de comportamiento de la actividad humana (*optimista*, con bajas emisiones de los gases de efecto invernadero y por consiguiente baja pendiente en las curvas de crecimiento de la temperatura ambiente, *intermedio* y *pesimista*, este último con muy pocas acciones para evitar el calentamiento global). Este análisis fue realizado para el presente siglo y el siglo 22 (ya que jóvenes que hayan nacido a comienzos de este siglo, tendrán la posibilidad de vivir en el siglo próximo, según extrapolaciones que se realizan en relación a esperanza de vida) (Piacentini, Della Ceca e Ipiña, 2018). Es de señalar que la radiación solar ultravioleta sigue siendo el factor principal de desarrollo de este tipo de cánceres de piel, pero en una publicación anterior (van der Leun, Piacentini y de Gruijl, 2008), se demostró que también la temperatura ambiente afecta esta enfermedad.

Relación entre Cambio climático y producción de alimentos

Los integrantes del Grupo redactaron por invitación, el capítulo: “Climate change and food security” (Piacentini et al., 2019), como parte del libro: “Food security: Impact of climate change and technology”, donde describieron el impacto que puede llegar a tener el Cambio climático en la seguridad alimentaria del planeta.

Temperatura subsuperficial y su relación con el Cambio climático

El clima global está cambiando y el indicador principal que es la temperatura ambiente, está 1.1 °C por encima del valor que tenía antes de la Revolución industrial (hacia 1750), como se detalla en el Informe 2021 del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021). Existen diferentes fuentes que demuestran que la temperatura ambiente media para el hemisferio Norte (Jones y Mann, 2004; Piacentini y Mujumdar, 2009) y para todo el mundo (Nazarenko et al, 2015; Weart, 2018) ha ido aumentando significativamente en las últimas décadas. La evidencia de este aumento puede verse en el efecto que la temperatura del aire de la superficie ha tenido sobre la temperatura del subsuelo durante los primeros cientos de metros (Jessop, 1990; Weart, 2018).

Cuando la atmósfera de la Tierra experimenta un cambio de temperatura, el suelo en contacto con la atmósfera experimentará este cambio, tal como ocurre en una pared cuando incide sobre ella aire de un frente cálido o un frente frío. Luego, la perturbación térmica de la superficie de la Tierra se propaga al subsuelo por conducción de calor a través del suelo. Dicha perturbación térmica se propaga hacia abajo como un tipo de onda térmica (Carslaw y Jaeger, 1959). De acuerdo con la teoría de la conducción de calor, la temperatura disminuye su amplitud exponencialmente con la profundidad y esta atenuación depende de la frecuencia. Las ondas de frecuencia más bajas se propagan a mayores profundidades que las ondas de frecuencia más alta. Las variaciones de alta frecuencia (diurnas y anuales) en la temperatura de la superficie del suelo desaparecen en los primeros metros (hasta alrededor de 20 m) debajo de la superficie, y las variaciones de baja frecuencia en la temperatura de la superficie del suelo desaparecen alrededor de los primeros cien metros (Pollack y Huang, 2000). El cambio en el flujo de calor del suelo introduce una curvatura en el comportamiento del régimen térmico de estado estable de temperatura lineal. Además, en esta tendencia a largo plazo, una variedad de procesos en o cerca de la superficie del suelo, pueden perturbar la temperatura del subsuelo debida al calor que se propaga hacia abajo y puede enmascarar la magnitud del cambio de temperatura atribuido al Cambio climático. Esos procesos

son: cambio en la capa de nieve (Groisman et al., 1994), cambios en el uso y cobertura del suelo (Lewis, 1998; Skinner y Majorowicz, 1999) y urbanización (Kalnay y Cai, 2003). Por tanto, para atribuir la temperatura transitoria del subsuelo al Cambio climático (también denominado Calentamiento global), es necesario descartar esos procesos, al menos en el período de tiempo en estudio que se lleva a cabo en nuestro Grupo FARA/IFIR, 1880-1970 para los sitios geográficos cercanos a Kapuskasing, Canada y 1880-1976 para Juazeiro, Brasil.

Se modelizó la conducción de calor unidimensional en el subsuelo utilizando la condición de frontera variable en el tiempo, identificada en ambos sitios [Kapuskasing (49.41°, -82.47°), entre 1880 y 1970, y Juazeiro (-9.47°, -39.83°), entre 1880 a 1976] mediante un enfoque de modelado hacia adelante, ajustando la temperatura medida en ambos pozos.

La temperatura a una profundidad z dada está determinada por la superposición de la solución de estado estacionario y la perturbación transitoria dependiente del tiempo.

$$T(z) = T_{ss}(z) + T_t(z, t) \quad (3)$$

donde $T_{ss}(z)$ es la solución estacionaria, sin perturbaciones debidas al Cambio climático y para nuestro caso corresponde al año 1880 para ambos sitios, para Kapuskasing (Beltrami, 2003), y para Juazeiro (Hamza and Vieira, 2011). $T_t(z, t)$ es la solución transitoria.

La temperatura transitoria del subsuelo se calcula a partir de la siguiente versión simplificada de la ecuación de conducción de calor unidimensional dada por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4)$$

Donde k es la difusividad térmica del lugar.

La modelización de la temperatura transitoria subsuperficial se llevó a cabo con el método utilizado por Mareschal y Beltrami (1992). En este método, el cambio de temperatura en la superficie puede ser aproximado por una función escalón, de M escalones de temperatura constante

$$T_t(z) = \sum_{m=1}^M T_m \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z_m}{2\sqrt{kt_m}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{z_m}{2\sqrt{kt_{m-1}}} \right) \right] \quad (5)$$

Donde T_m es el valor medio de la temperatura superficial en cada intervalo de tiempo (t_m, t_{m-1}) , y erfc es la función error complementaria:

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du. \quad (6)$$

Las figuras 5 y 6 muestran no sólo el ajuste a datos medidos de la temperatura sub-superficial del modelo de evolución de dicha temperatura para el año 1970, para Kapuskasing y para el año 1976, para Juazeiro (Jessop, 1990; Cermak, 1971), sino también la extrapolación futura del escenario de Calentamiento global pesimista, que implica continuación de la contaminación por gases de efecto invernadero y otros efectos negativos para el planeta, denominado RCP8.5 por el IPCC (2021).

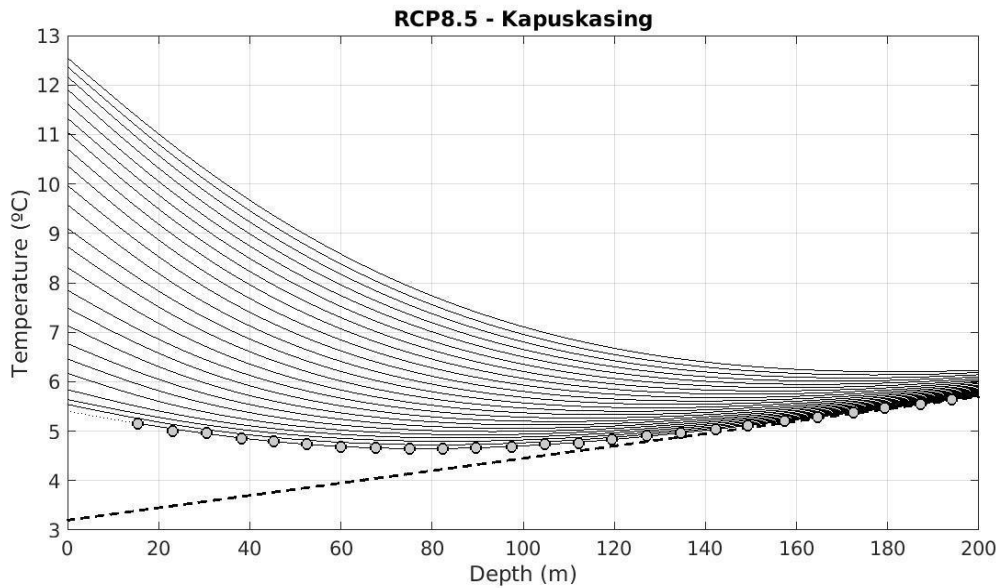


Figura 5: Temperatura del subsuelo en función de la profundidad del sitio de Kapuskasing, Canada. Se detalla la temperatura sub-superficial extrapolada del comportamiento a gran profundidad para el año 1880 (línea de trazos), el ajuste con las mediciones (Cermak, 1971; Jessop, 1990) y las proyecciones de temperatura del subsuelo del escenario futuro del IPCC (2021), RCP8.5 (pesimista). Los datos medidos para 1970 están representados por círculos. En líneas continuas se representa gráficamente la distribución de la temperatura subterránea determinada cada 10 años, desde el año 1970 hasta el año 2200.

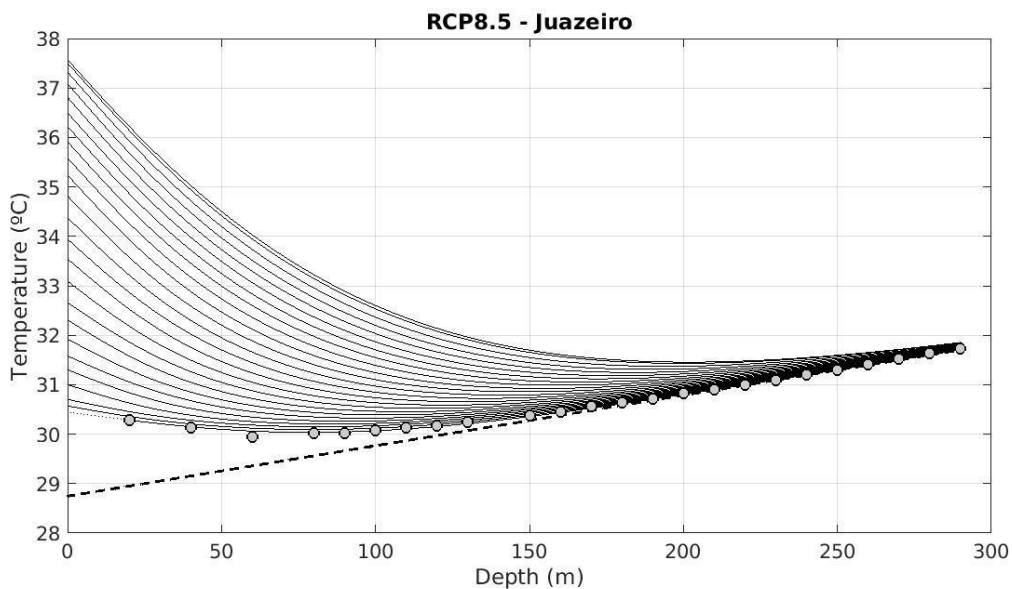


Figura 6: Temperatura del subsuelo (representada en forma similar a la Figura 1) en función de la profundidad del sitio de Juazeiro, Brasil.

Se colabora con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático de Naciones Unidas (IPCC), actuando el Dr Rubén Piacentini como Expert Reviewer en los últimos 5 Informes mundiales sobre: *Climate change 2013: The physical science basis*; *Climate change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*; *Global Warming of 1.5 degrees*; *Climate change 2021: The physical science basis* y *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability* (www.ipcc.ch). El último de estos Informes será publicado por World Meteorological Organization y Cambridge University Press en 2022.

Criterios de Sustentabilidad para que los desarrollos tecnológicos puedan ser realizados cuidando los recursos naturales y minimizando la contaminación ambiental y el calentamiento global

Se analizaron posibles puntos de no retorno del Calentamiento global (Mujumdar y Piacentini, 2013), se propusieron acciones prácticas para la Sustentabilidad ambiental en procesos industriales y se los aplicó al secado (Piacentini y Della Ceca, 2017, 2018).

Clima espacial

Se denomina “*Clima espacial*” a la evolución temporal en las condiciones del plasma (formado por partículas cargadas) magnetizado que emana del Sol, así como el de partículas cargadas de alta energía (llamadas *rayos cósmicos*) y los efectos que cambios temporales, que impacta en lugares del espacio con recursos materiales de origen terrestre, por ejemplo, en planetas. Esto ocurre principalmente en la región que ocupa la Tierra y su escudo protector magnético generado en su interior, que se extiende muchas veces el radio del mismo planeta y es denominado *magnetósfera* (ver por ejemplo: <https://www.swpc.noaa.gov/content/education-and-outreach>). Se diferencia del Clima terrestre en el hecho de que este último está limitado al estudio del estado promedio de la atmósfera en un dado intervalo de tiempo, pero en mucho mayor detalle espacial, esto es en un dado lugar geográfico del planeta. Ambos climas, el terrestre y el espacial se interesan en la evolución temporal en sus respectivos lugares de interés.

Una de las manifestaciones más espectaculares del Clima espacial son las auroras boreales, Desde tiempos inmemoriales pueblos vecinos a las regiones árticas estuvieron familiarizados con las auroras boreales, de las cuales el panel izquierdo de la Figura 7 da una bella instantánea como ejemplo. Estos colores de las auroras boreales/australes, varían tanto en su intensidad como en su ubicación geográfica (panel derecho de la Figura 7) por causas que son de corriente estudio (Delaboudiniere et al, 1995), y están en su origen relacionadas con la llegada de partículas cargadas provenientes del Sol y a la cambiante actividad magnética de la *corona solar* (zona que rodea al Sol) (ver por ejemplo, <https://www.greelane.com/es/ciencia-tecnología-matemáticas/ciencia/auroral-storms-across-the-solar-system-3073642>). Estas luces son de común ocurrencia en altas latitudes, más fácil de ver en la noche ártica/antártica y fueron siempre familiares para los lugareños, entre otros, los habitantes de Islandia y los lapones y esquimales, desde antes de las comunicaciones radiales que se desarrollaron en el siglo XIX.



Figura 7. Distintos colores de la aurora boreal producidos por la desexcitación de diferentes componentes gaseosos atmosféricos (panel izquierdo) y ubicación geográfica de aurora boreal en la alta atmósfera (panel derecho). Fuente NASA: panel izquierdo (<https://spaceplace.nasa.gov/aurora/sp/>) y panel derecho (https://apod.nasa.gov/apod/fap/image/0009/earthxray_polar_big.jpg).

La figura 7 derecha muestra una representación gráfica de la *radiación X blanda* (también denominada *radiación Ultravioleta extrema*) registrada por un satélite de la NASA, donde se utiliza

una tabla de colores para indicar la intensidad observada desde el satélite. En este caso el rojo indica mayor intensidad de esta radiación X banda. McPherron (1979), en un trabajo pionero, estableció la conexión entre esta radiación y los procesos llamados *sub-tormentas magnéticas*, siendo un campo de intenso estudio al presente.

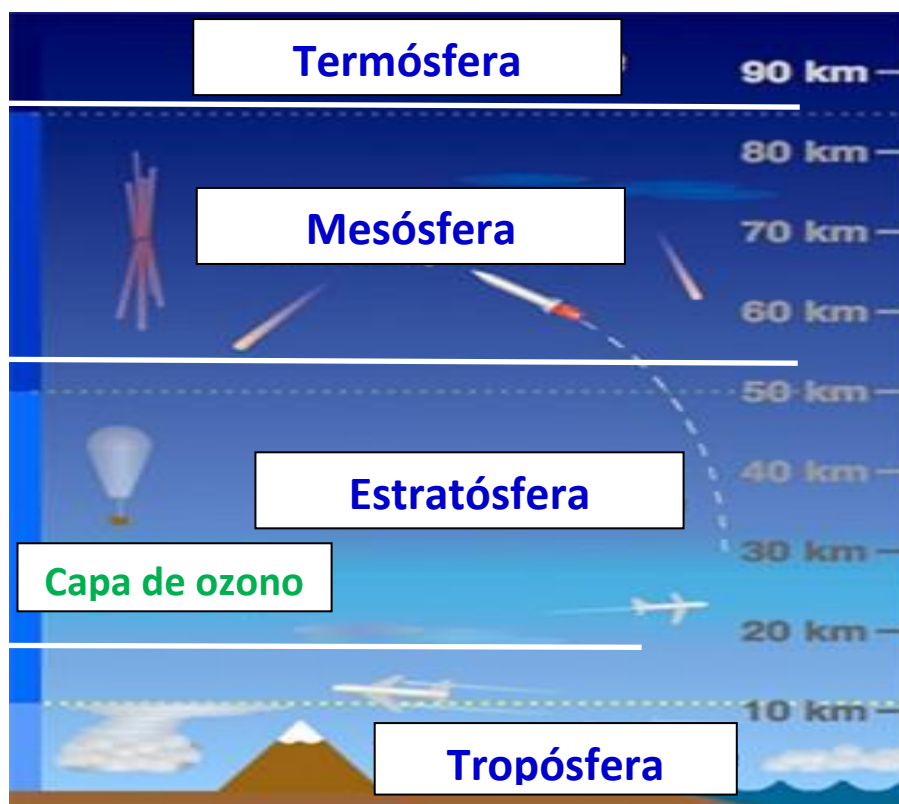


Figura 8. Distribución en altura de las distintas capas en que se divide la atmósfera y zona del máximo de la Capa de ozono. La zona entre unos 70 y 100 Km de altura, corresponde a la región donde se desarrollan las auroras boreales/australes y la zona desde unos 80 Km hacia arriba corresponde a la Ionósfera. Fuente: imagen adaptada de University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), Boulder, EUA (<https://scied.ucar.edu/activity/learn/atmospheric-layers>).

Impacto de expulsiones solares de materia y campo magnético

En el siglo XIX, luego de los primeros desarrollos, las flotas nórdicas (de Reino Unido y Holanda, entre otros) incorporan equipos de radio a su conectividad entre barcos y su comando central. En esos esfuerzos, el Almirantazgo Británico nota efectos no deseados en la comunicación radial sobre el horizonte, que pronto se identifican con perturbaciones del campo magnético terrestre. De este modo se identifica la región del espacio que refleja las ondas radiales y se denomina *Ionósfera* por su alto contenido de iones, de reducida influencia en la atmosfera terrestre a altitudes inferiores a unos 80 Km del nivel del mar (Figura 8).

Es pasada la mitad del siglo XIX que el gobierno de Gran Bretaña recurre a ilustres miembros de la elite académica nacional, con la preocupación de encontrar al menos una explicación a la ocasional incomunicación por extensos intervalos de tiempo de la flota británica con el Alto Almirantazgo en Londres. Ya entonces había sido probado que la entendida incomunicación entre la flota y su central estaba conectada a corrimientos del campo magnético, y de ahí el nombre de *tormentas magnéticas* a esos intervalos de alteraciones de la Ionósfera terrestre, con desplazamientos del campo magnético hacia latitudes más cercanas al Ecuador geográfico. Se populariza así la identificación del problema de comunicaciones radiales de ondas cortas por tormentas magnéticas, ya que la Ionósfera puede ser severamente alterada por cambios del campo magnético en la superficie terrestre y las capas de la atmosfera.

Luego de confusas observaciones de sucesos solares y las tormentas magnéticas, ocurre en el año 1859 un breve comunicado realizado por Lord Carrington en este tema. Carrington, estudioso del Sol en el observatorio astronómico/meteorológico de Greenwich, comunica a la Academia británica su identificación a simple vista de un destello gigante, o *fulguración*, un raro aunque conocido fenómeno solar. A dicha fulguración en 24 hs le sigue el arribo de importantes modificaciones ionosféricas, incluyendo auroras boreales cercanas a los trópicos, de las cuales se genera el colapso total por más de 1 día en las comunicaciones radiales entre el Alto Almirantazgo con la flota británica. Transcurridas 24 horas después de la fulguración solar del 1 de Setiembre de 1859, Richard Carrington y el astrónomo amateur Richard Hodgson, hicieron observaciones independientes de dicha fulguración. Al día siguiente, con el magnetómetro del Observatorio Kew, Balfour Stewart registra una tormenta geomagnética, por lo cual Carrington propone una conexión Tierra-Sol y reporta al poco tiempo los efectos en todo el planeta de la tormenta magnética del 2 de septiembre de 1859. Por dicha razón, esta tormenta geomagnética es usualmente llamada el *evento de Carrington* y para muchos, dicho evento es considerado el comienzo del estudio del *Clima espacial* (Cliver y Dietrich, 2013).

El tema del pronóstico de tormentas magnéticas continúa siendo de alto interés económico y científico, teniendo en cuenta que aún existe un incompleto entendimiento del fenómeno que impide la generación de un certero pronóstico de sus ocurrencias y previsión a futuro. Esto es, tener un buen pronóstico de protección de daño en la Tierra, con origen en el plasma y en el campo magnético emanando del Sol de manera continua y a veces súbitamente, junto con el campo magnético que arrastra, pegado (*congelado* es la palabra técnica en uso), lo cual se ilustra en la Figura 9.

El panel izquierdo de esta figura 9, presenta en el centro al Sol rodeado por el plasma que se expande desde la base de la corona solar (ver por ejemplo <https://www.greelane.com/es/ciencia-tecnología-matemáticas/ciencia/auroral-storms-across-the-solar-system-3073642/>), constituyendo la *heliosfera*, y descrito simplifadamente mostrando la superficie de corriente que separa en un caso simple las dos polaridades del campo magnético del Sol, más allá de los planetas y hasta su fin en la *heliopausa*, como se muestra en la Figura 10. La imagen derecha de la Figura 9, es una representación instantánea derivada de modelización del campo magnético solar, realizada por los investigadores Steele Hill y Sarah Frazier del Goodard Space Flight Center de la NASA.

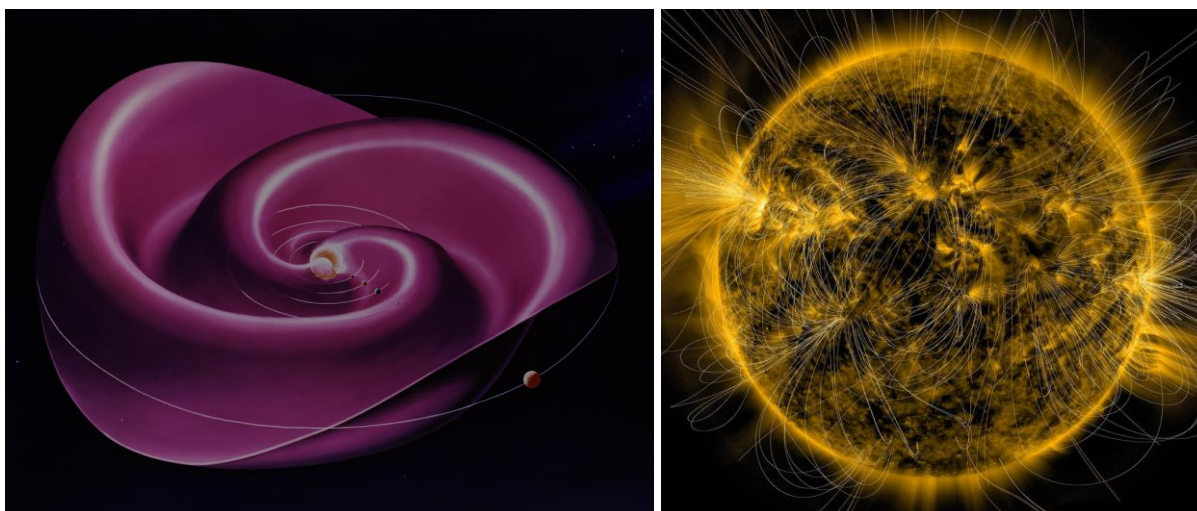


Figura 9. Representación del Sol rodeado de plasma en expansión (panel izquierdo) y del campo magnético solar (panel derecho). Fuente de la imagen izquierda (NASA): <https://www.nasa.gov/content/goddard/heliospheric-current-sheet>. Fuente de la imagen derecha (NASA): <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/picturing-the-sun-s-magnetic-field>

La figura 10, basada en observaciones de múltiples misiones espaciales, así como también con el apoyo de modelos magneto-hidro-dinámicos (MHD), muestra las diferentes regiones que fueron empíricamente identificadas y que constituyen básicamente las siguientes regiones:

i) La *interior*, de una propagación expansiva a velocidades superiores a la velocidad magnetofónica del medio y llega en la presente era, alrededor de 90 veces la distancia terrestre del Sol. Esta expansión a velocidad mayor del plasma (denominada *super-magnetosónica*), con el campo magnético pegado, es identificada en sus estudios comúnmente como la región del *viento solar supersónico*.

ii) En la Figura 10 está indicada la presencia del *choque terminal (terminal shock)* donde es reducida bruscamente la velocidad de expansión del viento solar. A partir de este choque, el medio es dominado por procesos compresionales y el viento se expande a velocidades subsónicas (menores que la velocidad del sonido) (Berdichevsky, 2021).

iii) Finalmente, el plasma emitido por el Sol queda bloqueado en su desplazamiento por materia en un estado de alta intensidad de campo magnético exterior, que se extiende en la denominada *nube magnética local*. En esta zona, actualmente se desplazan las naves espaciales Voyager 1 y 2, indicadas como la representación artística lo hace en todas sus partes, sin guardar las escalas de volumen, para facilitar la identificación de las mencionadas regiones, mostradas en esta Figura 10. La orientación modelada del campo magnético en el medio inter-estelar, está indicada con líneas finas curvas que envuelven la región dominada por el plasma emitido continuamente por el Sol.

La representación artística de esta Figura 10, presenta una región concéntrica al Sol (punto brillante) que es consistente con las actuales interpretaciones de la región de alta velocidad de expansión de plasma magnetizado (llamado *viento solar*). Mas allá esta la region que cambió por el choque en el plasma. producido por el escoyo externo y se forma '*un colchon separador*' donde las velocidades de convección de dicho plasma se vuelven sub-sonicas (ver por ejemplo Berdichevsky, 2021). La figura adicionalmente muestra que este plasma emanado del Sol está encerrado por una estructura de volumen millones de veces mayor al ocupado por todo el plasma magnetizado emanado del Sol, y que se trata del medio interestelar en el que hoy las Misiones Voyager 1 y 2 (detallados en esta Figura 10, fuera de escala) se desplazan, proveyendo a la comunidad valiosa información científica.

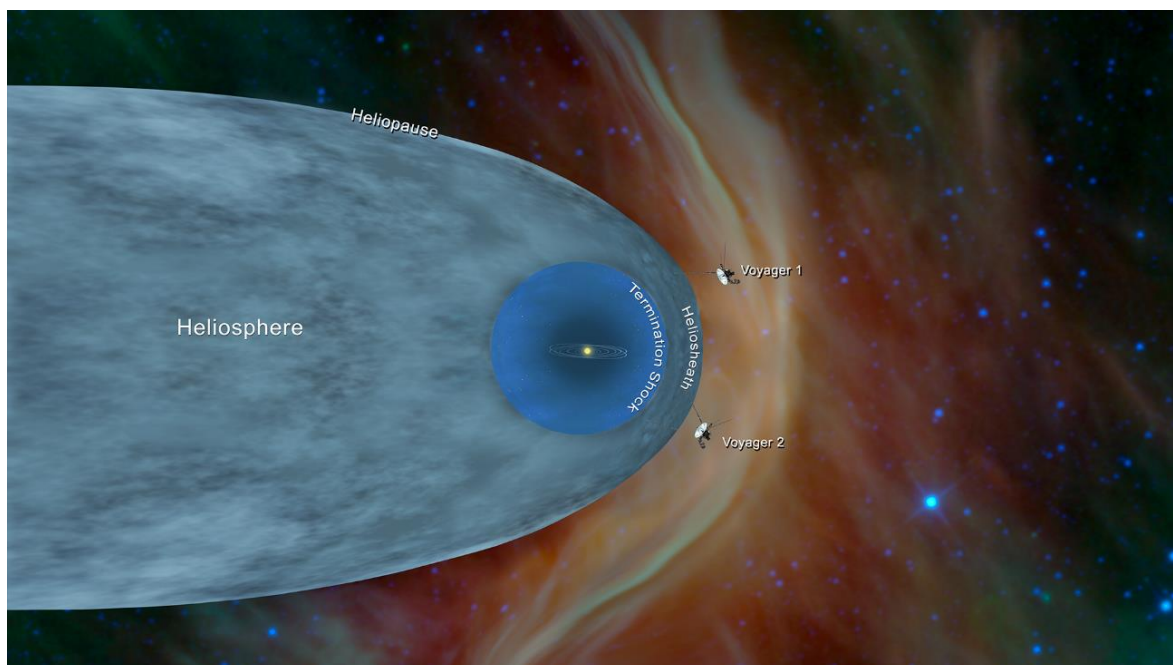


Figura 10. Representación esquemática de las distintas regiones descritas en el texto. En particular de la Heliosfera hasta donde se extiende la influencia del Sol, de su final en la Heliopausa y de las posiciones de las naves espaciales de la NASA, Voyager 1 y Voyager 2.

<https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/interstellar-mission/> .

Al presente, están probadas dos diferentes causas de tormentas magnéticas:

La primera causa es el de periódicas tormentas, cada 14 o 27 días (Richardson et al, 2006). Estas tormentas tienden a ocurrir durante la parte menos activa del ciclo solar, identificado por la drástica disminución de manchas solares (ver por ejemplo, www.astronomiaonline.com/2004/04/las-manchas-solares/).

A la segunda causa pertenece la observación de Carrington, ya mencionada. Este es un caso mucho menos previsible, tanto en su ocurrencia como en el arribo de las perturbaciones magnéticas a la Tierra y la magnitud esperable de disturbios en radio-comunicaciones y daño a la propiedad y a los bienes, tanto en el espacio (satélites) como en superficie (transformadores eléctricos, conductores metálicos con alta resistencia en imperfecciones que pueden producir disipación a alta temperatura y de esa manera roturas cuando se desplaza el campo magnético en la superficie terrestre, etc). Como se menciona en las referencias de Berdichevsky et al. (2002), a estos casos pertenecen expulsiones súbitas de masa con campo magnético, que son parte de nuestros actuales estudios del Clima espacial (ver mención de publicaciones en la Tabla 2), así como la participación activa de Argentina en dichos estudios, a través de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales, CONAE (www.argentina.gob.ar/clima-espacial-y-conae).

Investigación sobre el ciclo solar 24 y comienzo del ciclo actual 25

El Ciclo solar es la evolución que presenta el Sol en el número de manchas solares, desde valores cercanos a cero, creciendo hasta llegar a uno (o a veces dos) máximos y retornando a valores cercanos a cero. El intervalo de tiempo entre estos dos valores casi nulos del ciclo solar es en promedio de unos 11 años, por lo que también se denomina *ciclo undecenal*. Se empleó el método de *la derivada segunda* propuesto por uno de los integrantes del Grupo (R D Piacentini), que consiste en analizar la concavidad de la curva alrededor del mínimo y en base a ello, establecer valores característicos del ciclo. De este modo, fue posible obtener el rango y en particular el final del ciclo 24 y comienzo del ciclo 25 (Uzal, Piacentini y Verdes, 2012). Esto comenzó resultó ser Febrero de 2020, el cual fue sólo 1.5 % mayor, respecto del valor definido por el NOAA (National Ocean and Atmospheric Administration) Prediction Center de Estados Unidos, de Diciembre 2019.

Contribuciones al estudio del clima espacial

A continuación se detallan las investigaciones que se están realizando en nuestro Grupo de Física de la Atmósfera, Radiación Solar y Astropartículas de IFIR (CONICET – UNRosario), llevadas a cabo por Daniel Berdichevsky y colaboradores internacionales, quien tuvo y sigue teniendo un activo rol en el estudio de esta área, destinado a un más certero pronóstico del Clima espacial (Tabla 2).

Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas

Los principales Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas a ser llevados a cabo hasta 2030, que están relacionados con estas actividades son: *Objetivo 3*. Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades, *Objetivo 7*. Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos y *Objetivo 13*. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

Tabla 2: Actividades que se desarrollan en el IFIR (CONICET – UNR) a través de uno de sus investigadores, en relación al tema del Clima espacial.

Propiedades de expulsiones de masa magnetizada solar	C-C Wu, R. P. Lepping, D. B. Berdichevsky. Magnetic Field Intensity Modification to Force Free Model of Magnetic Clouds: Website of <i>Wind</i> Examples from Launch to July of 2015. <i>Frontiers in Aerospace Science and Physics</i> . Aceptado para su publicación, Julio 2021.
Mismo tema	Lepping, R. P., Wu, C.-C., Berdichevsky, D. B., y Szabo A. (2020). Model fitting of wind magnetic clouds for the period 2004 – 2006. <i>Solar Physics</i> . 295, Artículo número: 83.
Mismo tema	Lepping, R. P., Wu, C.-C., Berdichevsky, D. B., y Szabo A. (2018). <i>Magnetic Clouds with passage near Earth, 2013-2015</i> , <i>Solar Physics</i> 293(4), DOI: 10.1007/s11207-018-1273-x .
Propiedades de la corona solar	Berdichevsky, D. B., Rodriguez-Gomez, J. M., Vieira, L. E., y Dal Lago, A. (2020). Thermodynamics interpretation of electron density and temperature description in the solar corona. Archivos de la Universidad Cornell. Acceso público en: arXiv/abs/200507929 , <i>Solar and Stellar Astrophysics</i> .
Condiciones del viento solar durante el mínimo del ciclo de 11 años del Sol	Vasquez, B. J., Farrugia, C. J., Simunac, K. D. C., Galvin, A. B., y Berdichevsky, D. B. (2017). Concerning the Helium-to-Hydrogen number density ratio in very slow ejecta and winds near solar minimum. <i>J. Geophysical Research</i> , 122, 1487–1512, doi:10.1002/2016JA023636.
Del equilibrio del plasma magnetizado con su propio peso.	Berdichevsky, D. B. (2016). On the equilibrium of an extremely extended and dilute magneto-matter state subject to its weight. <i>Publicado en el Bulletin of the American Physical Society (APS), March Meeting, 2016</i> .

Temas complementarios

Se formó parte del Consorcio Internacional para la posible Instalación de un Sistema de telescopios CTA (Cherenkov Telescope Array) para la detección de radiación gama de energías extremas (en los rangos de mil millones o más electrón-voltios), en los Andes de Argentina (Actis et al., 2011). Si bien no se logró concretar este Sistema de telescopios en Argentina, los datos climáticos obtenidos permitieron, tal como se detalló en el tema de *Energía solar fotovoltaica*, realizar investigaciones sobre la excepcional calidad del aire en las regiones Centro y Norte andinas, para la posible ubicación de Observatorios Astrofísicos/Astronómicos y Centrales solares fotovoltaicas.

Si integró y se integra al presente (2021) un Consorcio internacional para la investigación del Impacto del Cambio climático en relación a la producción de alimentos en huertas urbanas y quintas periurbanas de la ciudad de Rosario.

Se continúa Investigando sobre coronavirus responsable de COVID 19 y su inactivación al exterior por radiación solar ultravioleta.

Se colabora con investigadores de la University of Maryland at Baltimore y de la NASA, del National Center for Atmospheric Research, EUA, de Yachay Tech, Universidad del Conocimiento, Ecuador, de la Universidad Nacional Autónoma de México y de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México, entre otras instituciones.

En relación a los STANs (Servicios Tecnológicos de Alto Nivel de CONICET): se han realizado sobre Inventario de gases de efecto invernadero en Empresa de Biocombustibles y sobre disponibilidad de radiación solar en zonas de implementación de Centrales solares fotovoltaicas.

En cuanto a tareas de Extensión; se ha dado apoyo a Defensa Civil de la Municipalidad de Rosario con información provista por equipos de detección de descargas eléctricas (rayos y relámpagos) y a la Secretaría de Ambiente de dicha Municipalidad.

Se forman en el Grupo alumnos, becarios, doctorandos e investigadores y se colabora con científicos pertenecientes a diferentes países: México, Francia, Holanda (RUIAF Foundation), Bélgica (University of Gent), Gran Bretaña (University of Coventry), Canada (University of McGill), entre otros y de diferentes Centros y Universidades de Argentina. Se desarrollaron (o se están desarrollando) en el Grupo hasta el presente, tesis doctorales en número de 20, tesis de maestría de 4 y un gran número de trabajos y proyectos de Ingeniería y Licenciatura en Física.

Se dictan Cursos de Grado y Posgrado en Física e Ingeniería y se participa en Comisiones y Organismos Nacionales (CONICET, MINCYT, CONAE, Academias de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Argentina y Academia de Ciencias Médicas de la Provincia de Santa Fe, etc) e Internacionales (Intergubernamental Panel on Climate Change, World Meteorological Organization, United Nations Environment Program, Sustainable Development Solutions Network. A Global Initiative for the United Nations, Observatorio de Astropartículas Pierre Auger).

Referencias bibliográficas

- Actis, M., Allekotte, I., Antico, F., Arnaldi, H., Asorey, H., Bottani, A., Etchegoyen, A., García, B., Gómez Berisso, M., de Gouveia dal Pino, E. M., Mancilla, A., Maya, J., Micheletti, M. I., Otero, L., Pallotta, J., Piacentini, R., Quel, E., Ravignani, D., Ringegni, P., Ristori, P., E. M. Romero, E. M., Rovero, A., Sanchez, F., Sofo, M., de Souza, V., Suárez, A., Supanitsky, A. D., Todero Peixoto, C. J., y de la Vega, G. (2011). Two candidate sites in Argentina for the Southern CTA Observatory. Argentinean & Brazilian CTA Parties, *Informe de la Colaboración Argentina-Brasil, elevado a la Colaboración internacional CTA (Cherenkov Telescope Array). Trabajo presentado en la Reunión de la Colaboración Internacional CTA, Madrid, 28 noviembre – 2 diciembre 2011*. 96 páginas.
- Aguilera, R., Corringham, T., Gershunov, A., y Benmarhnia, T. (2021). Wildfire smoke impacts respiratory health more than fine particles from other sources: observational evidence from Southern California. *Nature*, 12, 1493. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21708-0> .
- Aira, M. J., Jato, V., e Iglesias, I. (2005). Calidad del aire. Polen y esporas en la Comunidad Gallega. *España: Eds. Xunta de Galicia, Consellería de Medio Ambiente*.
- Albarracín, V. H., Kurth, D, Federico Ordoñez, O., Belfiore, C., Luccini, E., Salum, G., Piacentini, R. D., y Farias, M. E. (2015). High-up: a remote reservoir of microbial extremophiles at Central Andean Wetlands. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1404-1420.
- Allen, M. S., y Palmer, M. W. (2011). Fire history of a prairie/forest boundary: more than 250 years of frequent fire in a North American tallgrass prairie. *Journal of Vegetation Science*, 22, 436–444. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01278.x> .
- Aragão, L. E. O. C., Anderson, L. O., Fonseca, M. G., Rosan, T. M., Vedovato, L. B., Wagner, F. H., Silva, C. V. J., Junior, C. H. L. S, Arai, E., Aguiar, A. P., Barlow, J., Berenger, E., Deeter, M. N., Domingues, L. G., Gatti, L., Gloor, M., Malhi, Y., Marengo, J. A., Miller, J. B., Phillips, O. L., y Saatchi, S. (2018). 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications* 9, <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y> .
- Balch, J. K., Bradley, B. A., Abatzoglou, J. T., Nagy, R. C., Fusco, E. J., y Mahood, A. L. (2017). Human-started wildfires expand the fire niche across the United States. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 114, 2946–2951. <https://doi.org/10.1073/pnas.1617394114>
- Black, C., Tesfaigzi, Y., Bassein, J. A., Miller, L. A. (2017). Wildfire smoke exposure and human health: Significant gaps in research for a growing public health issue, *Toxicol Pharmacol*, 55, 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2017.08.022> .

- Beltrami, H., Gosselin C., y Mareschal J. C. (2003). Ground surface temperatures in Canada: Spatial and temporal variability. *Geophysical Research Letters*, 30(10), 1499. [doi:10.1029/2003GL017144](https://doi.org/10.1029/2003GL017144).
- Berdichevsky, D. B. (2021). Survey of compressions observed in the Heliosheath with the Spacecraft Voyager. *Advances in Aerospace Science and Technology*, 6, 43-66. <https://doi.org/10.4236/aast.2021.61004>.
- Berdichevsky, D. B., Farrugia, C. J., Thompson, B. J., Lepping, R.P., Reames, D. V., Kaiser, M. L., Steinberg, J. T., Plunkett, S. P., y Michels. D. J. (2002). Halo-coronal mass ejections near the 23rd solar minimum: lift-off, inner heliosphere, and in situ (1 AU) signatures, *Ann. Geophys*, 20, 891-916.
- Boné, E., Casa, V., Mataloni, G., y Sfara, V. (2019). Ganadería y Calidad De Agua En El Delta Del Paraná Desafíos y Recomendaciones. *Fundación Humedales / Wetlands International*. Buenos Aires, Argentina.
- Borús, J., Giordano, L., Sánchez, M. V., Núñez, V., Contreras, G., y Pereira, A. (2020). Posibles escenarios hidrológicos en la cuenca del Plata durante el período mayo-junio-julio 2020, *Informe Mensual - Alerta Hidrológico Cuenca del Plata (Instituto Nacional del Agua)*.
- Cabrera., S., Ipiña, A., Damiani, A., Cordero, R. y Piacentini, R. D. (2012). UV index values and trends in Santiago de Chile (33.5°) based on ground and satellite data. *Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 115, 73-84. <https://doi.org/j.jphotobiol.2012.06.013>.
- Carlsaw H. S., y Jaeger, J. C. (1959). Conduction of heat in solids. 2nd Edition, *Clarendon*, Oxford.
- Cermák, V. (1971). Underground temperature and infrared climatic temperature of the past millenium. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 10, 1-19.
- Chen, B., Jia, P., y Han, J. (2021). Role of indoor aerosols for COVID-19 viral transmission: a review. *Environ Chem Lett*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01174-8>
- CIE (Commission Internationale de l'Éclairage). (2014). Nomenclature for UV Doses and Effects on Humans. *Publicado por CIE*.
- Cliver, E. W., y Dietrich, W. F. (2013). The 1859 space weather event revisited: limits of extreme activity, *Space Weather*, 3, A31. [DOI: 10.1051/swsc/2013053](https://doi.org/10.1051/swsc/2013053).
- Coccia, M. (2020). Factors determining the diffusion of COVID-19 and suggested strategy to prevent future accelerated viral infectivity similar to COVID. *Science of the Total Environment*, 729, 138474. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138474>.
- Comunian, S., Dongo, D., Milani, C., y Palestini, P. (2020) Air pollution and COVID-19: The role of particulate matter in the spread and Increase of COVID-19's morbidity and mortality. *Int J Environ Res Public Health*, 17, 4487. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124487>.
- Dávalos, M. (Septiembre, 2020). Comparación de tres métodos de derivación de la irradiancia solar efectiva para la producción de pre-vitamina D en la piel, en la ciudad de Rosario, Argentina. Trabajo presentado en la 105a Reunión de la Asociación Física Argentina, Córdoba, Argentina.
- Delaboudiniere, G. E., Artzner, J., Brunaud, J., Gabriel, A. H., Hochedez, J. F., Millier, F., Song, X. Y., Au, B., Dere, K. P., Howard, R. A., Kreplin, R., Michels, D. J., Moses, J. D., Defise, J. M., Jamar, C., Rochus, P., Chauvineau, J. P., Marioge, J. P., Neupert, R. C., Maucherat, A., Clette, F., Cugnon, P., y VanDessel, E. L. (1995). EIT: Extreme-Ultraviolet Imaging Telescope for the Soho mission. Publicado en el Libro: The SOHO Mission, (Eds) Fleck, B., Domingo, V., and Poland, A. I., *Solar Physics*, 162, 291–312.
- Della Ceca, L. S., Micheletti, M. I., y Piacentini, R. D. (2017). Atmospheric particulate matter variability during 2014 at Buenos Aires city (Argentina) comparing ground-based measurements and satellite data". *Proceedings Second International Electronic Conference on Atmospheric Sciences (ECAS 2017), Sciforum Electronic Conference Series, Section B: Atmospheric Chemistry (16–31 July 2017)*, 2, M4152.

- Della Ceca, L. S., Micheletti, M. I., Freire, M., Garcia, B., Mancilla, A., Salum, G. M., Crinó, E., y Piacentini, R. D. (2019). Solar and climatic high performance factors for the placement of solar power plants in Argentina Andes sites - Comparison with african and asian sites. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME*, 141(4).
- Della Ceca, L. S., Michelletti, M. I., Freire, M., Garcia, B. y Piacentini R. D. SO₂ and aerosol evolution over the very clear atmosphere at the Argentinean Andes range sites of San Antonio de los Cobres and El Leoncito. (2017). *Proceedings paper Second International Electronic Conference on Atmospheric Sciences (ECAS 2017), Sciforum Electronic Conference Series, Section B: Atmospheric Chemistry* (16–31 July 2017), 2, M4153.
- Dowdy, J. C., Sayre, R. M., y Holick, M. F. (2010) Holick's rule and vitamin D from sunlight. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 121(1-2):328–330. <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2010.04.002>
- Draxler, R.R., Rolph, G.D. (2013). HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory). Model access via NOAA ARL READY website. Recuperado de <http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> NOAA Air Resources Laboratory, College Park, MD, EUA.
- Fitzpatrick, T. B. (1988). The validity and practicality of sun-reactive skin types I through VI. *Archives of Dermatology*, 124(6), 869–871.
- Freire, M. M., Della Ceca, L. S., Micheletti, M. I., Novara, I., Garcia, B., Mancilla, A., Salum, G. M., Crinó E., y Piacentini R. D. (2019). Site analysis in the Andean region for the placement of astrophysical observatories and solar photovoltaic power plants. The case of the “Leoncito 2” site. *Advances in Space Research*, 64(2) 551-556.
- Frontera, A., Cianfanelli, L., Vlachos, K., Landoni, G., y Cremona, G. (2020). Severe air pollution links to higher mortality in COVID-19 patients: The "double-hit" hypothesis. *J Infect*, 81, 255–259. <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2020.05.031> .
- García, M. E., Della Ceca, L., Micheletti, M. I., Piacentini, R., Ordano, M., Reyes, N., Buedo, S. y González, J. A. (2018). Satellite and ground atmospheric particulate matter detection over Tucumán city, Argentina, space-time distribution, climatic and seasonal variability. *AIMS Environmental Science*, 5(3), 173-194.
- González, J. A., Prado, F. E., y Piacentini, R. D. (2014). Atmospheric dust accumulation on native and non-native species: Effects on gas exchange parameters. *Journal of Environmental Quality*, 43,801-808.
- Groisman, P. Y., Karl, T. R., Knight, R. W., y Stenchikov, G. L. (1994). Changes of snow cover, temperature, and radiative heat balance over the Northern Hemisphere. *J. Clim*, 7, 1633-1656.
- Henderson, S. B. (2020). The COVID-19 pandemic and wildfire smoke: Potentially concomitant disasters. *Am J Public Health*, 110, 1140–1142. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2020.305744> .
- Herman, J., y Piacentini, R. D. (2021). UVB (290 – 315 nm) Inactivation of the SARS CoV-2 virus as a function of the UV index. (2021). *Air quality, Health and Environment (Springer Nature)*, <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01099-3>.
- Hoyos, N., Correa-Metrio, A., Sisa, A., Ramos-Fabiell, M. A., Espinosa, J. M., Restrepo, J. C., y Escobar, J. (2017). The environmental envelope of fires in the Colombian Caribbean. *Applied Geography*, 84, 42–54.
- Huaca, J. M., Salum, G. M., y Piacentini, R. D. (2018). Solar erythemal irradiance in Ibarra, Ecuador (high altitude equatorial city). Ground and satellite measurements and model calculations. *Bionatura. Latin American Journal of Biotechnology and Life Sciences*, 3 (1).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021.) Report on Climate change 2021: The physical science basis. *Cambridge University Press and World Meteorological Organization*.
- Ipina, A., López-Padilla, G., Retama, A., Piacentini, R. D., y Madronich, S. (2021). The Ultraviolet radiation environment of a tropical megacity in transition: Mexico city 2000-2019.

- Ipiña, A., Salum, G. M., Crinó, E., y Piacentini, R. D. (2012). Satellite and ground detection of very dense smoke clouds produced on the islands of the Paraná river delta that affected a large region in Central Argentina. *Advances in Space Research*, 49(5), 966–977. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.12.009> .
- Jessop, A. M. (1990). Thermal Geophysics. *Elsevier*.
- Jiang, X., Li, K.-F., Liang, M.-C., y Yung, Y. L. (2021). Impact of amazonian fires on atmospheric CO₂. *Geophysical Research Letters*, 48. <https://doi.org/10.1029/2020GL091875> .
- Jones, P. D., y Mann, M. E. (2004). Climate over past millennia. *Reviews of Geophysics*, 42(2), 1-42. <https://doi.org/10.1029/2003RG00014>
- Kalnay E., y Cai, M. (2003). Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 423, 528-531.
- Laborde, M. A., y Piacentini, R. D. (2020) Energía y calidad de aire en las ciudades. Artículo del libro Pandemia. Los múltiples desafíos que el presente propone al future. (Pandemic. The multiple challenges that the present poses to the future). *Publicado por las Inter-Academias de Argentina, como parte de la contribución de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales al análisis de COVID 19 y su impacto. Editorial PROSA, Buenos Aires, páginas 158-165.*
- Leys, B. A., Marlon, J. R., Umbanhowar, C., y Vannièrè, B. (2018) Global fire history of grassland biomes. *Ecology and Evolution*, 8, 8831–8852. <https://doi.org/10.1002/ece3.4394>
- Lewis, T. J. (1998). The effect of deforestation on ground surface temperature, *Global Planet. Change*, 18, 1-13.
- López-Padilla, G. (Octubre, 2020). Desarrollo de la plataforma ‘TES para tu salud’ que determina los Tiempos de Exposición Solar adecuados para el tratamiento de Psoriasis en la Ciudad de México. *Trabajo presentado en el LXIII Congreso Nacional de Física, Michoacán, México.*
- Madronich, S. (1987) Intercomparison of NO₂ photodissociation and U.V. Radiometer Measurements. *Atmospheric Environment*, 21(3), 569–578.
- Mareschal J. C, y Beltrami, H. (1992). Evidence for recent warming from perturbed geothermal gradients: examples from eastern Canada. *Climate Dynamic*, 6, 135-143.
- Marengo, J. A., Cunha, A. P., Cuartas, L. A., Leal, K. R. D., Broedel, E., Seluchi, M. E., Michelin, C. M., Baião, C. F. D. P., Ângulo, E. C., Almeida, E. K., Kazmierczak, M. L., Mateus, N. P. A., Silva, R. C., y Bender, F. (2021). Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. *Frontiers in Water*. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.639204> .
- Marfori, M.T., Campbell, S.L., Garvey, K., McKeown, S., Veitch, M., Wheeler, A.J., Borchers-Arriagada, N., y Johnston, F.H. (2020). Public health messaging during extreme smoke events: Are we hitting the mark? *Front. Public Health*, 8, 465. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00465>
- Martelletti, L., y Martelletti, P. (2020). Air pollution and the novel Covid-19 disease: A putative disease risk factor. *SN Comprehensive Clinical Medicine*, 1–5. <https://doi.org/10.1007/s42399-020-00274-4>
- McPherron, R. L. (1979). Magnetospheric substorms, *Review Geophysics*, 17, 657-681, [doi:10.1029/RG017i004p00657](https://doi.org/10.1029/RG017i004p00657).
- Mehmood, K., Bao, Y., Petropoulos, G.P., Abbas, R., Abrar, M.M., Saifullah, Mustafa, A., Soban, A., Saud, S., Ahmad, M., Hussain, I., y Fahad, S. (2021). Investigating connections between COVID-19 pandemic, air pollution and community interventions for Pakistan employing geoinformation technologies. *Chemosphere*, 272, 129809. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129809> .

- Micheletti, M.I., Louedec, K., Freire, M. Vitale, P., y Piacentini, R. (2017). Aerosol concentration measurements and correlations with particle trajectories at the Pierre Auger Observatory. *The European Physical Journal Plus*, 132, 245. [doi:10.1140/epjp/i2017-11503-0](https://doi.org/10.1140/epjp/i2017-11503-0).
- M.I. Micheletti, L.G. Murrini, M.E. Debray, M. Rosenbusch, M. Graf, G. Ávila Cadena, P. Vitale, J. Davidson, y H. Somacal, (2012). Elemental analysis of aerosols collected at the Pierre Auger Cosmic Ray Observatory with PIXE technique complemented with SEM/EDX, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 288, 10-17.
- Micheletti, M. I., Piacentini, R. D., Crinó, E., Moglia, M. M., Vázquez, M. L., Salum, G. M., e Ipiña, A. (2013). Análisis de aerosoles atmosféricos en distintos sitios de Argentina, dentro y fuera de períodos de eventos de alta contaminación. *Capítulo del libro "Actas del Segundo Taller Argentino de Ciencias Ambientales"*, Editorial Zeus, Rosario. Páginas 231-262. ISBN 978-950-664-110-8.
- Mujumdar, A. S., y Piacentini, R. D. (2013). Guest Editorial: "Urgent need for reduction in greenhouse gas emissions in industrial processes: Are we past the tipping point for Global warming?". *Drying Technology. An International Journal*, 31(1), 3-4.
- Nazarenko. et al. (2015). Future climate change under RCP emission scenarios with GISS Model E2. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems. American Geophysical Union publication*. <https://doi.org/10.1002/2014MS000403>.
- Piacentini, R. D. (Septiembre, 2020). Diseño de sistema solar fotovoltaico para la ciudad de Rosario. *Informe FARA/IFIR*.
- Piacentini, R. D., y Della Ceca, L. (2017). Guest editorial: "The use of environmental sustainability criteria in industrial processes". *Drying Technology. An International Journal*, 35 (1) 1-3.
- Piacentini, R. D., y Della Ceca, L. S. (2018). Guest editorial: "Environmental sustainable practical actions in industrial processes. Application to drying". *Drying Technology. An International Journal*, 36, 1401-1403.
- Piacentini, R. D., Della Ceca, L., e Ipiña, A. (2018). Climate change and its relation with non melanoma skin cancers. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 17, 1913-1917.
- Piacentini, R. D., Della Ceca, L. S., Vega, M., Bertoni, F., Arancibia, A., Novara, I., Garro, S., y Feldman, S. R. (2019). Climate change and food security. Capítulo del Libro *Food security: Impact of climate change and technology*. Editores Sahrawat, R., Xiao, H.-W., Jangam, S.V., Mujumdar, A.S., Publicado on line en India, páginas 21-72.
- Piacentini, R. D., García, B., Micheletti, M.I., Salum, G., Freire, M., Maya, J., Mancilla, A., Crino, E., Mandat, D., Pech, M., y Bulik, T. (2016). Selection of astrophysical/astronomical/solar sites at the Argentina East Andes range taking into account atmospheric components. *Advances in Space Research*, 57 (12), 2559-2574.
- Piacentini, R. D., y Micheletti, M. I. Guest editorial: "Connections between black carbon (soot) and climate change". *Drying Technology. An International Journal*, 34(9), 1009-1010. DOI: [10.1080/07373937.2016.1184522](https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1184522)
- Piacentini, R. D., y Mujumdar, A. (2009). Climate change and the drying of agricultural products. *Drying Technology, An International Journal*, 27(5), 629-635.
- Piacentini, R. D., Schmidt, J., Budini, N., Vega, M., Giandoménico, F., Feldman, N., y Buitrago, R. (2013). Photovoltaic materials and solar power plant optimization design in relation to its environmental impact. *Capítulo del libro: Energy Book Series - Volume # 1: Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments*, Editorial Formatex, Madrid.
- Pollack, H. N., y Huang, S. (2000). Climate reconstruction from subsurface temperatures. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci*, 28, 339-65.
- Portillo-Quintero, C., Sanchez-Azofeifa, A., y do Espirito-Santo, M. M. (2013). Monitoring deforestation with MODIS active fires in neotropical dry forests: An analysis of local-scale

- assessments in Mexico, Brazil and Bolivia. *Journal of Arid Environments*, 97, 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.06.002> .
- Richardson, I. G., Webb, D. F., Zhang, J., Berdichevsky, D. B., Biesecker, D. A., Kasper, J. C., Kataoka, R. , Steinberg, J. T., Thompson, B. J., Wu, C.-C, y Zhukov, A.N. (2006). Major Geomagnetic storms, (Dst δ 100 nT) generated by corotating interaction regions. *J. Geophysical Research*, 111, A07809, 1-17, doi:10.1029/2005JA011476 (ver también *Errata, JSR*, 112, 2007).
- Russo, J. P., Ipiña, A., Palazzolo, J. F., Cannavó, A. B., Piacentini, R. y Niklasson, B. (2018). Dermatitis por contacto fotoalérgica a protectores solares con Oxibenzona. *Actas Dermo-Sifiliográficas*, 109 (6) 521-528. <https://doi.org/10.1016/j.adengl.2018.05.010>
- Salum, G. M. y Piacentini, R. D. (2015). Algorithm for modelization and control of solar total radiation, using the derivative. *Proceedings International Solar Energy Society Conference*, Corea del Sur.
- Salum, G. M., Videla, O., Pedrosa, M., Cruceño, J., y Piacentini, R. D. (2015). Spectral solar irradiance, atmospheric component and its relation with the production of photovoltaic current. *Proceedings International Solar Energy Society Conference*, Corea del Sur.
- Skinner, W. R., y Majorowicz, J. A. (1999). Regional climate warming and associated twentieth century land-cover changes in north-western North America. *Clim. Res.*, 12:39-52.
- van der Leun, J., Piacentini, R. D., y de Gruijl, F. (2008). Climate change and human skin cancer. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 7, 730-733. DOI: [10.1039/b719302e](https://doi.org/10.1039/b719302e).
- WHO (World Health Organization). (2002). Global solar UV index. A practical guide. *Publicación WHO/SDE/OEH/02.2*.
- SINAGIR. (2021). Causas de los incendios forestales. *Publicado en la página web de Argentina.gob.ar*: <https://www.argentina.gob.ar/sinagir/incendio-forestal/causas>.
- Uzal L C, Piacentini R D y Verdes P F. (2012). Predictions of the maximum amplitude, time of occurrence, and total length of Solar Cycle 24. *Solar Physics*, 279(2) DOI: [10.1007/s11207-012-0030-9](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0030-9).
- Wathore, R., Gupta, A., Bherwani, H., y Labhasetwar, N. (2020). Understanding air and water borne transmission and survival of coronavirus: Insights and way forward for SARS-CoV-2. *Science of the Total Environment*, 749, 141486. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141486>
- Weart, S. (2018). The discovery of global warming. *Publicado on line por el American Institute of Physics*. <https://history.aip.org/climate/index.htm> .
- World Resources Institute (2019). What can global forest watch tell us about the fires in Brazil? *Publicado on line por WRI*: <https://www.wri.org/blog/2019/08/what-can-global-forest-watch-tell-us-about-fires-brazil> .
- Wu, W., Netherry, R. C., Sabath, M. B., Braun, D., y Dominici, F. (2020). Air pollution and COVID-19 mortality in the United States: Strengths and limitations of an ecological regression analysis. *Science Advances*, 6 (45) DOI: [10.1126/sciadv.abd4049](https://doi.org/10.1126/sciadv.abd4049).
- Zaratti, F., Piacentini, R. D., Guillén, H. A., Cabrera, S. H., Lileye, J., B., y McKenzie, R. L. (2014). Proposal for a modification of the UVI risk scale. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 13, 980-985.
- Zhang, R., Li, Y., Zhang, A. L., Wang, Y., y Molina, M. L. (2020). Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of COVID-19. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117, 14857–14863. <https://doi.org/10.1073/pnas.2009637117>
- Zoran, M. A., Savastru, R.S., Savastru, D. M., y Tautan, M. N. (2020). Assessing the relationship between surface levels of PM2.5 and PM10 particulate matter impact on COVID-19 in Milan,

Italy. *Science of the Total Environment*, 738, 139825. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139825> .

Zhu, Y., Xie, J., Huang, F.,y Cao, L., (2020). Association between short-term exposure to air pollution and COVID-19 infection: Evidence from China. *Science of the Total Environment*, 727, 138704. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138704> .

CARACTERIZAÇÃO ALTIMÉTRICA DE GLEBA RURAL POR MEIO DE DADOS OBTIDOS POR AEROFOTOGRAMETRIA DE BAIXA ALTITUDE²⁵

Matheus Travaini Capeloto; David Luciano Rosalen

Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, Brasil

david.rosalen@unesp.br

Resumo

A agricultura, de forma geral, tem evoluído tecnologicamente e, dessa forma, tornando mais fácil a adoção de melhores práticas de manejo. A agricultura de precisão é uma das tecnologias que vem ganhando maior importância. Nesta os fatores de produção não são mais tratados de forma homogênea, permitindo que a tomada de decisão possa ser feita de modo localizado. Juntamente com a agricultura de precisão, a fotogrametria também auxilia os agricultores a conhecerem melhor as dimensões, o relevo e/ou as propriedades diversas do solo e das culturas. Para a caracterização altimétrica de glebas rurais, a utilização de Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) pode ser vantajosa quando comparada com métodos de levantamento in loco, pois permite maior detalhamento e rapidez na coleta de dados. Dentro deste contexto, o objetivo do presente trabalho foi comparar levantamento topográfico in loco com levantamento realizado por meio de RPA. O trabalho foi desenvolvido em uma gleba de terras situada na zona rural do município de Jaboticabal, Estado de São Paulo (Brasil). Realizou-se levantamento planialtimétrico da área, utilizando-se do método de posicionamento GNSS semicinemático e, na mesma área, realizou-se a cobertura aerofotogramétrica, utilizando-se de RPA de asa fixa, com sensor RGB embarcado de 24,3 Mpx. A resolução geométrica obtida no voo foi de 2,7 cm. Compararam-se as altitudes obtidas entre o levantamento in loco e as obtidas através do levantamento aerofotogramétrico. Os resultados obtidos indicaram que a média das altitudes mensuradas pelo levantamento in loco e pela cobertura aerofotogramétrica não apresentou diferença estatística e que o erro médio absoluto de altitude da cobertura aerofotogramétrica, com relação ao levantamento in loco, foi de 10 cm, indicando que o uso da tecnologia de aeronaves remotamente pilotadas de asa fixa, equipadas com sensor RGB (resolução geométrica de 2,7 cm), é adequado para a execução de levantamentos altimétricos dentro desta tolerância de erro.

Palavras-chave: aeronave remotamente pilotada, topografia, modelo digital de terreno

Introdução

²⁵ Texto originalmente publicado como trabalho de conclusão de curso de Engenharia Agrônoma, FCAV/UNESP

1. Levantamento Topográfico e Fotogrametria

O levantamento topográfico pode ser definido como uma junção de operações que permitem a determinação da posição relativa de pontos na superfície terrestre. Esses levantamentos podem ter diversas finalidades, sendo uma das mais usadas a locação de objetos e de limites e a medição do relevo ou de alterações na superfície terrestre (Rosalen, Gonçalves & Takahashi, 2010). Destaca-se que um levantamento topográfico pode ser planimétrico e planialtimétrico. O primeiro é utilizado em trabalhos dos quais não há a necessidade de caracterização da altimetria do terreno; já no segundo, essa caracterização é realizada em conjunto com a planimetria, sendo as curvas de nível a principal forma gráfica para a representação da altimetria (relevo terrestre).

A estação total foi um dos principais aparelhos para a realização de levantamentos topográficos. Seu surgimento ocorreu nos anos 90, da união entre teodolitos eletrônicos e um Medidor Eletrônico de Distância (MED). O equipamento é como um teodolito eletrônico que realiza medições por meio de um sistema de ondas de luz e princípios da física. A determinação de distâncias é feita registrando o número de ciclos de uma determinada onda eletromagnética ocorrido entre a estação e um alvo. O registro das observações geralmente é gravado no próprio equipamento, tornando um método automatizado em parte (Felipe, 2015).

No ano de 1973, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos (*Department of Defense - DOD*) começou a lançar satélites no espaço; no começo a tecnologia tinha apenas finalidade militar e foi mantida sob sigilo durante aproximadamente cinco anos pelo governo estadunidense. Atualmente, a órbita terrestre conta com uma constelação formada por diversos satélites artificiais que são responsáveis por transmissão dos dados (McCormac, 2007).

Baseado em satélites artificiais, o sistema NAVSTAR-GPS (*Navigation System using Time and Ranging & Global Positioning System*), ou sistema simplesmente GPS, permite aos usuários determinar posições expressas em latitude, longitude e altitude. O sistema GPS pode ser integrado a um Sistema de Informações Geográficas (SIG), permitindo posicionar qualquer objeto sobre ou próximo da superfície terrestre de forma precisa e rápida (McCormac, 2007). Dessa forma, este tornou-se uma das maiores ferramentas de levantamento geodésico já desenvolvida.

Destaca-se que o sistema de satélites de navegação global GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é composto pelas quatro constelações de satélites globais: GPS (EUA), com 30 satélites em operação, Glonass (Rússia) com 24 satélites em órbita; BeiDou (China), com 47 satélites e Galileo (União Europeia) com 26 satélites, além de outros sistemas locais como QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*, Japão) e IRSS (*Indian Regional Navigation Satellite System*, Índia) (Trimble, 2023).

No Posicionamento relativo cinemático, o receptor que ocupa os vértices de interesse pode ser movimentado, mas, como se trata de um método cinemático, a inicialização deve ser estática. Este apresenta como grande benefício o tempo de ocupação inferior ao dos outros métodos. Durante o levantamento, os pontos são gravados automaticamente a uma taxa fixa, sendo esse método recomendado para levantamentos em terrenos mais acidentados e sinuosos (Instituto Nacional de Colonização e de Reforma Agrária, 2013, Albarci, 2011; Monico, 2007).

O Posicionamento relativo semicinemático é semelhante ao anterior. Porém, os pontos são gravados de maneira individual numa breve ocupação dos vértices de interesse, sendo recomendado para levantamentos em geral e garantindo grande precisão, desde que não ocorram obstruções que possam interferir na recepção dos sinais GNSS. Para os levantamentos onde as correções são feitas em tempo real e não no pós-processamento, denomina-se cinemático em tempo real ou, em inglês, *Real Time Kinematic* (RTK). Destaca-se que este é o método mais utilizado no georreferenciamento de imóveis rurais (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária, 2013; Lazzarotto & Oliveira, 2012) e, também, que, no posicionamento relativo é utilizada, obrigatoriamente, a diferença de fase das ondas portadoras na determinação das coordenadas finais pós-processadas ou em tempo real.

Conforme Meneses (2012), o Sensoriamento Remoto pode ser definido como uma técnica de obtenção de imagens de objetos na superfície terrestre sem que haja contato físico com ela. O termo surgiu nos anos 60, especificamente, para designar uma tecnologia na qual os sensores utilizados são capazes de registrar imagens da superfície terrestre, mesmo a grandes distâncias,

tornando-se uma das mais bem-sucedidas na coleta de dados para a observação e o monitoramento da Terra de forma automática.

Ainda, como exposto por Meneses (2012), as imagens são registradas pelo sensor por meio do registro da radiação eletromagnética, tal como a luz solar refletida (sensores passivos), ou através, da reflexão da radiação eletromagnética emitida por sensores ativos. Dessa forma, nenhum outro tipo de sensor que não forme as imagens por meio do registro da radiação eletromagnética pode ser considerado Sensoriamento Remoto. Ainda, segundo o mesmo autor, é um equívoco comum considerar apenas as imagens obtidas a partir de plataformas orbitais como Sensoriamento Remoto; pois, há tempos, que pesquisadores já registravam imagens da superfície terrestre através de câmeras fotográficas a bordo de aviões e/ou de plataformas terrestres (Fotogrametria).

A Fotogrametria é a área de estudo encarregada pela medição, análise e interpretação de fotografias, e seu principal objetivo é classificar e determinar a posição real dos objetos contidos nas imagens. As primeiras utilizações de fotografias aéreas, na cartografia topográfica, datam do ano de 1849, pelo Coronel Aimé Laussedat, conhecido como o "pai da Fotogrametria", utilizando-se de balões de ar quente como plataforma, porém sem grande sucesso (Casaca, Matos & Baio, 2005). Destaca-se que a Fotogrametria, além de permitir o reconhecimento dos objetos na superfície terrestre, tem diversas aplicações, podendo ser utilizada para monitoramento ambiental e de pragas e doenças na agricultura, assim como para mapeamento planialtimétrico, perícia criminal, inteligência militar, entre outros (Rosalen, 2015).

A primeira cobertura aérea com finalidade cartográfica foi realizada em 1913, durante a Primeira Guerra Mundial. Destaca-se que a obtenção de imagens aéreas sempre foi de grande importância durante o período de guerras, auxiliando os diferentes exércitos em atividades de reconhecimento (Casaca et al., 2005).

Com o advento dos computadores, a resolução das fotos evoluiu, e, gradativamente, as fotos que eram analógicas passaram a ser digital, sendo que a grande diferença se deu na forma em que a luz é captada pelos sensores fotográficos que produzem as fotos. Na Fotogrametria digital, a luz que chega a partir da lente da câmera não é gravada em uma emulsão sensível à luz, mas através de detectores eletrônicos. Após a captura da imagem, todo o processamento de avaliação é feito por computadores para que a imagem exibida se assemelhe à vista pela percepção humana (Goes, 2016).

O aperfeiçoamento das câmeras e o desenvolvimento das tecnologias trouxeram grande melhoria para a Fotogrametria, e uma das transformações mais notáveis desse desenvolvimento está relacionada à resolução radiométrica e à acentuada diminuição de ruídos produzidos nas imagens, o que garante maior precisão e confiabilidade das imagens obtidas. No processamento de filmes fotográficos, a resolução obtida era de aproximadamente oito bits e 256 tons de cinza; para fotografias digitais, há imagens de oito bits assim de maior resolução radiométrica, como, por exemplo, 13 bits que permitem mais de 8.000 tons de cinza (Haala, Hastedt, Wolf, Ressler, & Baltrusch, 2010).

Um dos produtos mais importantes da Fotogrametria são os mapas topográficos, obtidos a partir da geração de um Modelo Digital de Terreno (MDT). Para a geração desses modelos, é preciso que ocorra a sobreposição das imagens coletadas ao longo da linha de voo e entre as linhas de voo. Os pontos sobrepostos são denominados de pontos homólogos, obtendo-se as respectivas coordenadas tridimensionais dos pontos imageados (Johnson & Herbert, 1997).

Dentro do contexto da Fotogrametria, têm-se as Aeronaves Remotamente Pilotadas (*Remotely Piloted Aircraft - RPA*), definidas como aeronaves semiautônomas ou autônomas, que são capazes de realizar voos pré-programados através de *softwares* específicos ou de serem controladas por um operador no solo com um rádio controle. Geralmente, as RPAs são confundidas com aeromodelos devido a sua similaridade; porém, há uma grande diferença quanto ao seu modo de voo e à sua função. Os aeromodelos são obrigatoriamente controlados por um rádio controle e têm seu fim destinado à recreação, enquanto a RPA foi desenvolvida para coletar dados de forma autônoma durante o voo, sendo monitorada por um *software* no solo ou controlada por um piloto em uma estação de controle e com finalidades profissionais (Rosalen, 2015).

Uma RPA deve levar embarcado um receptor GNSS de simples ou de dupla frequência e um sistema inercial que permita a determinação da orientação exterior aproximada para cada imagem tomada durante a missão. Além disso, o sistema deve contemplar diferentes sensores para a aquisição das imagens sobre a área de interesse (Silva Júnior, Siqueira, Marques Júnior & Pereira, 2012).

Destaca-se que, inicialmente, a utilização de RPAs no Brasil ocorreu na década de 80 com o modelo BQM-1BR produzido pela Companhia Brasileira de Tratores (CTB), e com projeto ARARA houve o desenvolvimento do primeiro RPA voltado para atividades de mapeamento agrícola. Esse trabalho foi desenvolvido com a colaboração do Laboratório de Alto Desempenho do Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (ICMC/USP) e com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Instrumentação Agropecuária (Rosalen, 2015).

A obtenção de imagens aéreas de satélites é uma ferramenta que pode auxiliar muito em levantamentos topográficos, no monitoramento de glebas rurais e em infestações de plantas daninhas e na geração de mapas de produtividade; porém, as imagens obtidas por satélites contêm erros e sofrem com limitações pelas condições meteorológicas, fumaça e obstáculos, sendo necessário pós-processamento dos dados, antes de transformá-los em mapas. Para as RPAs, essas limitações são menores, pois os voos podem ser realizados com muito mais rapidez, não ocorrendo a interferência de fumaça ou de nuvens, e o custo é menor, ganhando-se flexibilidade de uso e sendo de grande utilidade na agricultura (Jorge & Inamasu, 2014).

Ainda segundo Jorge e Inamasu (2014), para a obtenção de dados e imagens com boa resolução, as RPAs têm focado na utilização de sensores baseados na espectroscopia de refletância, ou seja, em medidas da reflexão da radiação eletromagnética após interação com diferentes superfícies, em diferentes comprimentos de onda, oriundas do chamado espectro refletido, mais especificamente abrangendo a região do visível (*Visible* – VIS: 400 a 700 nm), do Infravermelho próximo (*Near Infrared* – NIR: 700 a 1.300 nm) e do Infravermelho de ondas curtas (*Short Wave Infrared* – SWIR: 1.300 a 2.500 nm).

Destaca-se que cada comprimento de onda tem uma ação diferente quando em contato com os alvos. Essas diferentes respostas podem ser medidas de maneira quantitativa, e seus resultados podem ser utilizados em diversos trabalhos como taxa de fotossíntese de plantas, levantamento de populações infestantes nas entrelinhas de um cultivo, ou até na determinação de pragas invasoras nas culturas. Destaca-se, também, o uso de RPAs na coleta de dados para a geração de MDTs que permitem, conforme já citado, a descrição topográfica das áreas mapeadas (Jorge & Inamasu, 2014; Molin, Amaral & Colaço, 2015; Tschiedel & Ferreira, 2002).

2. Modelo Digital de Terreno (MDT)

Um Modelo Digital de Superfície (MDS) pode ser caracterizado como uma representação numérica da distribuição espacial de uma característica variável, tal como altitude, profundidade ou velocidade. Esta superfície é contínua, variando seu comportamento no espaço geográfico. No caso da superfície terrestre, a modelagem é chamada de Modelo Digital de Terreno, o MDT, que caracteriza o comportamento da variável altitude, sendo uma ferramenta digital fundamental na caracterização do relevo terrestre em um ambiente computacional (Rosalen, 2015).

Para que seja possível a representação de uma superfície real no computador, é imprescindível a criação de um MDT, que pode ser feito através de uma rede de pontos na forma de grade de pontos regulares ou irregulares. Depois da criação do modelo, podem-se calcular áreas, desenhar perfis, gerar imagens sombreadas ou em tons de cinza, mapas de declividade e exposição, assim como perspectivas tridimensionais. Destaca-se que a modelagem digital de terreno pode ser usada no armazenamento de dados de altimetria para utilização em mapas topográficos, análises de corte-aterro para projeto de estradas e barragens e de variáveis geológicas, na elaboração de mapas de declividade e na determinação de possíveis áreas suscetíveis a processos erosivos (Simões, 1993).

No processo de modelagem, são necessárias três fases distintas: a primeira é a aquisição de dados, que deve ser precisa e confiável; a próxima etapa consiste na geração de grades e

respectiva interpolação dos pontos obtidos no levantamento; na última fase, devem ser apresentados os produtos obtidos na modelagem. Os dados do MDT são representados por coordenadas X, Y e Z, em que Z é o atributo modelado, as altitudes do terreno. A aquisição desses dados na Topografia *in loco* é realizada através do levantamento topográfico, principalmente, utilizando-se de receptores GNSS, enquanto na Fotogrametria pode ser realizada através de uma RPA.

Dentro deste contexto, a tecnologia das RPAs torna-se uma ferramenta tecnológica de grande relevância para a realização de levantamentos topográficos de imóveis rurais, possibilitando maior registro de detalhes e com grande rapidez, quando comparada à tecnologia de levantamentos *in loco* através de receptores GNSS e de estações totais, principalmente cobrindo áreas mais extensas e de difícil acesso (Instituto Nacional de Colonização e de Reforma Agrária, 2016).

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi comparar a acurácia de um levantamento topográfico altimétrico, utilizando-se da tecnologia de RPA em relação a tecnologia de levantamento por receptores GNSS.

Material e métodos

A área de estudo localizou-se próxima ao perímetro urbano do município de Jaboticabal, Estado de São Paulo, Brasil. Esta, possuía, aproximadamente, 6 ha; destaca-se que estava livre de vegetação e que apresentava declividade média de 3,8% (Figura 1).



Figura 6: Imagem orbital da área de estudo. Fonte: Imagem do Google Earth

Estabeleceram-se dois tratamentos: levantamento topográfico *in loco* com receptor GNSS e levantamento aerofotogramétrico, utilizando-se de aeronave remotamente pilotada - RPA.

O levantamento topográfico *in loco* foi realizado utilizando-se do método de posicionamento GNSS relativo semicinemático, que permite alcançar precisão na planialtimétrica, na ordem de centímetro. Para essa operação, foi utilizado receptor GNSS R6 em conjunto com o coletor de

dados TSC3, ambos da marca Trimble (Figura 2). Para o processamento das observáveis GNSS, foi utilizado o *software* Trimble Business Center (TBC).



Figura 2: Receptor GNSS R6 e coletor de dados TSC3 (Trimble, EUA). Fonte: <https://geostar.lv/en>

Após o processamento, os dados foram exportados para o *software* TopoEVN. Neste, elaborou-se modelo digital de terreno, utilizando-se do método da triangulação com interpolação linear. Após essa modelagem, foram geradas curvas de nível a cada 1 m. A RPA utilizada foi o Arator da marca Xmobots (Figura 3). Esse equipamento permite voos com até 1 km de altura e uma autonomia aproximada de 45 min.

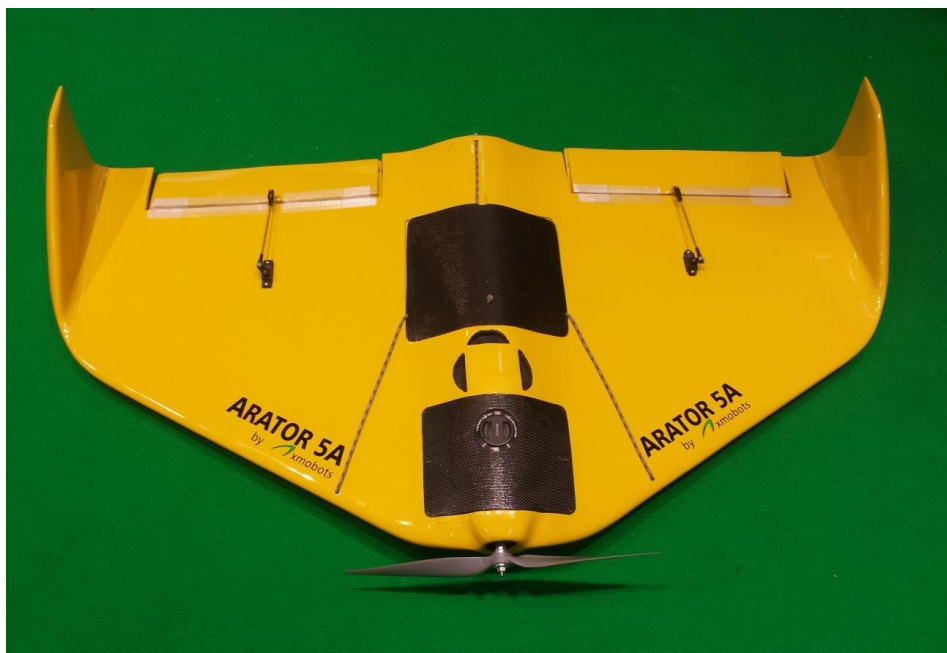


Figura 3: Aeronave remotamente pilotada Arator (Xmobots, Brasil). Fonte: <https://mundogeo.com/>

O sensor embarcado foi o Sony Alpha 5.100 (Figura 4) com resolução de 24,3 Mpx, distância focal de 16 mm e que registra o espectro visível (*Red, Green, Blue* - RGB).



Figura 4. Câmera Alpha 5100 (Sony, Japão). Fonte: <https://www.tecmundo.com.br/>

O voo foi realizado de forma que se obteve a resolução geométrica de 2,7 cm no terreno. Destaca-se que foram implantados quatro pontos de controle no terreno com a finalidade de melhorar a acurácia do georreferenciamento e dos produtos aerofotogramétricos gerados. O método de implantação dos pontos de controle foi o mesmo utilizado para o levantamento *in loco*. Para o processamento dos dados aerofotogramétricos, utilizou-se do *software* Pix4D e do QGIS para a manipulação dos dados. Na geração da nuvem no Pix4D, adotou-se a malha de 1x1 m, e na interpolação dos dados, utilizou-se do método de Triangulação com interpolação linear.

Os dados gerados no Pix4D e no TBC foram importados para o QGIS, no qual foram editados, assim como extraídas as coordenadas planialtimétricas, tanto do levantamento aerofotogramétrico, como dos pontos correspondentes obtidos no levantamento *in loco*. No total, a amostragem foi composta de 67 pontos.

Os pontos amostrais, tanto do levantamento *in loco*, como do levantamento aerofotogramétrico, foram exportados para o *software* TopoEVN e gerados os respectivos modelos digitais de terreno, utilizando o método de interpolação por Triangulação (interpolação linear). A partir dos modelos, geraram-se curvas de nível com equidistância vertical de 1 m, confeccionando-se, desta forma, as plantas respectivas plantas planialtimétricas correspondentes aos dois conjuntos de dados.

As médias dos valores altimétricos de ambos os tratamentos (levantamento *in loco* e aerofotogrametria) foram comparadas, utilizando-se do Teste F ao nível de significância de 5%. Também, tomando os valores altimétricos do levantamento *in loco*, calcularam-se o erro absoluto médio e seu respectivo desvio-padrão do levantamento aerofotogramétrico. O *software* estatístico utilizado foi o Agrostat.

Resultados e discussão

A Figura 5 exibe a distribuição dos pontos amostrados, *in loco*, dentro da área de estudo do levantamento planialtimétrico realizado com a metodologia do posicionamento GNSS. Nota-se que o levantamento cobriu de forma, aproximadamente uniforme, a gleba mapeada. Coletou-se uma densidade maior de pontos na porção sul da área para melhor caracterização do contorno dos limites da área, visto que nesta região, havia maior irregularidade geométrica.

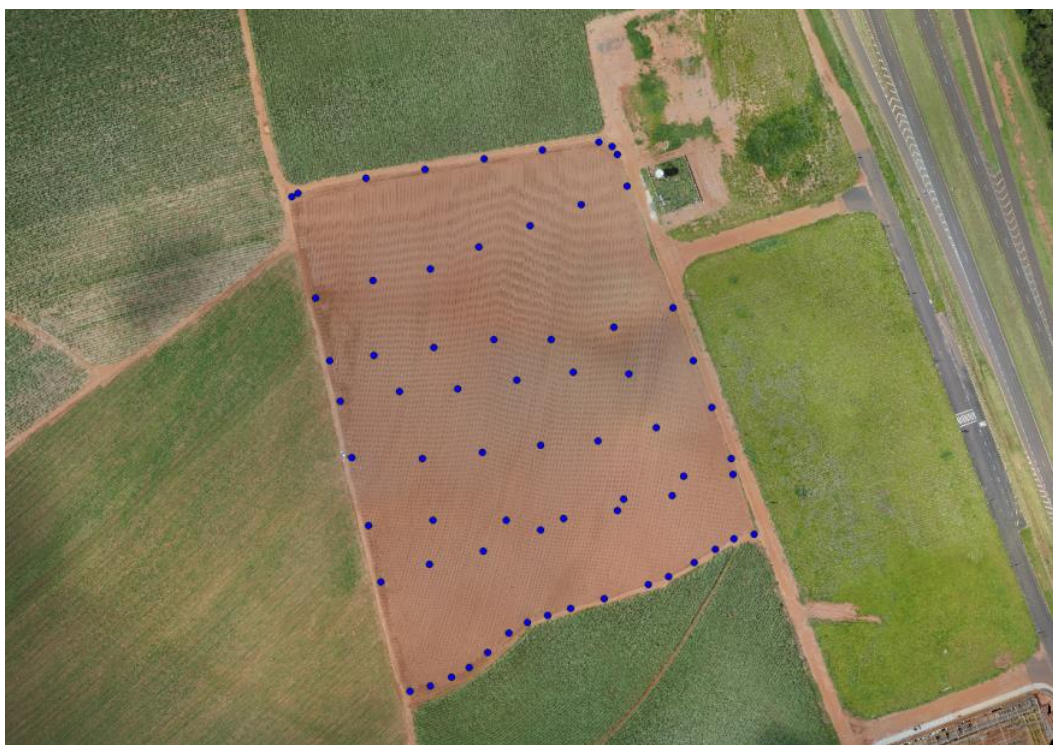


Figura 5: Distribuição, na área de estudo, dos pontos amostrados no levantamento planialtimétrico in loco

A partir da geração do MDT, foram elaboradas as plantas planialtimétricas com as respectivas curvas de nível (equidistância vertical de 5 m para os dois tratamentos). A Figura 6 exibe as curvas de nível obtidas a partir do levantamento *in loco*, e a Figura 7 exibe as curvas de nível obtidas a partir da cobertura aerofotogramétrica.

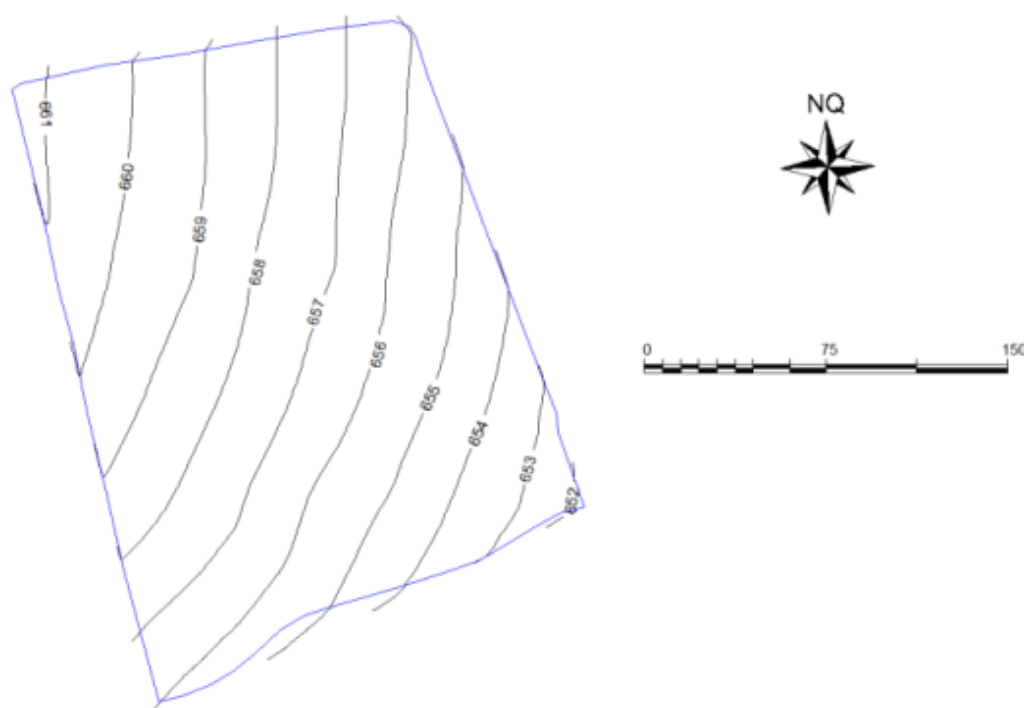


Figura 6: Planta planialtimétrica obtida a partir dos dados do levantamento in loco

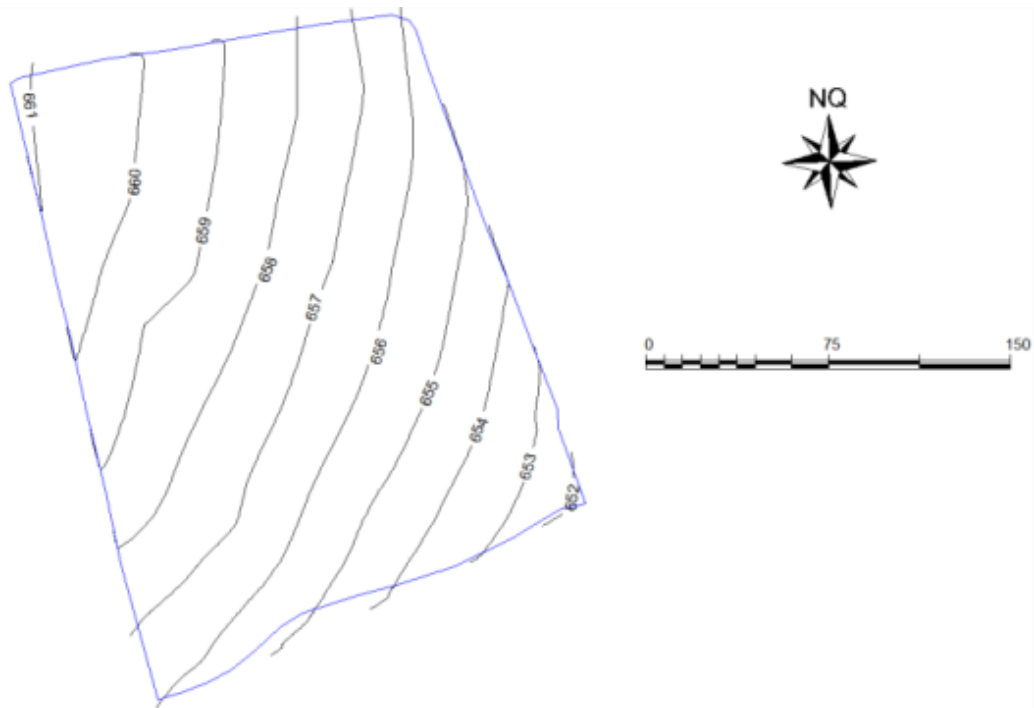


Figura 7: Planta planialtimétrica obtida a partir dos dados da cobertura aerofotogramétrica

A Figura 8 representa a sobreposição das curvas de nível obtidas em ambos os levantamentos, *in loco* (em preto), e a cobertura aerofotogramétrica (em vermelho).

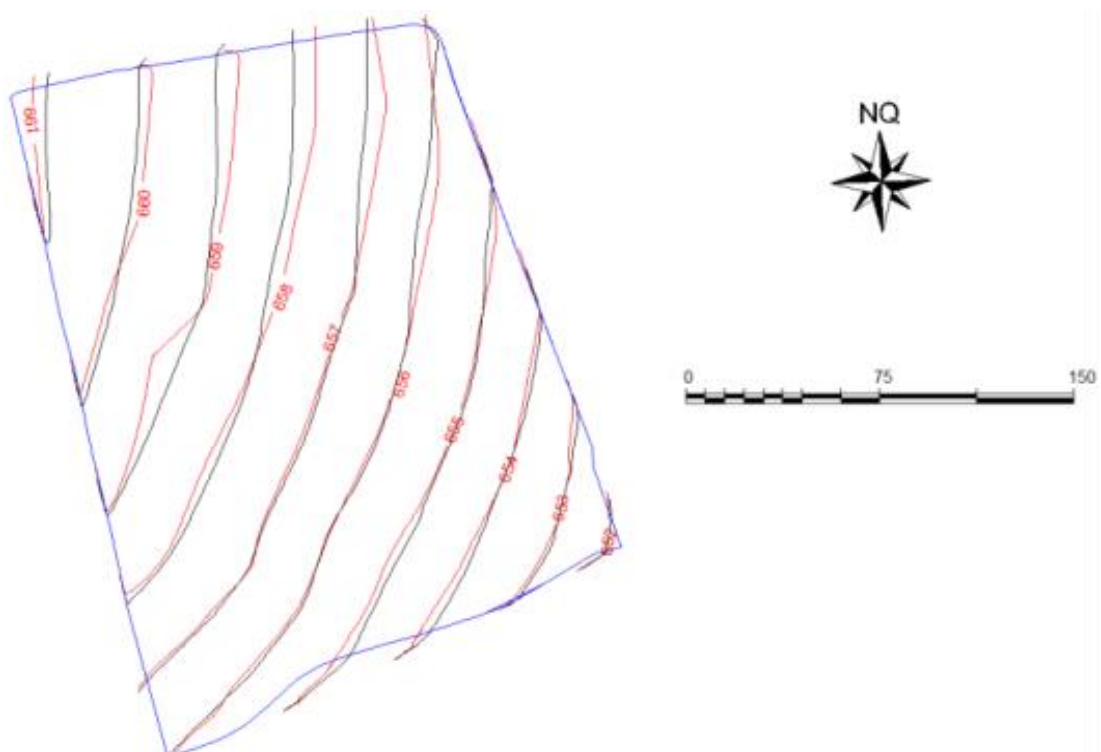


Figura 8: Sobreposição das curvas geradas em ambos os levantamentos: in loco (em preto), e a cobertura aerofotogramétrica (em vermelho)

Nota-se, na figura 8, uma sobreposição quase coincidente das curvas de 652 a 655 m e, parcialmente, nas curvas de 657 e 658 m. A Tabela 1 exibe as altitudes médias encontradas para os dois tratamentos, assim como os respectivos desvios-padrão.

Tabela 1: Altitude média e respectivo desvio-padrão obtidos nos dois tratamentos

Tratamento	Média (m)
Levantamento <i>in loco</i>	656,47 ± 0,30
Cobertura aerofotogramétrica	656,48 ± 0,30

Os resultados apresentados na tabela 1 mostram que a altitude média da área é de, aproximadamente, 656 m, com desvio-padrão de 30 cm para ambos os levantamentos. A diferença entre as altitudes médias foi de, aproximadamente, 1 cm e o Teste F, de comparação de médias, indicou que não ocorreu diferença significativa entre as médias.

Em termos de erros, a média dos erros absolutos de altimetria foi de (0,10 ± 0,01) m; portanto, um erro de 10 cm entre a cobertura aerofotogramétrica em relação ao levantamento *in loco*. Esse erro médio absoluto, na casa de decímetro, indica que o levantamento topográfico, utilizando-se da tecnologia de aeronaves remotamente pilotadas com sensor RGB embarcado, pode ser utilizada para levantamentos altimétricos destinados a elaboração de diferentes projetos agropecuários, como projetos de planejamento do uso e da conservação do solo, assim como projetos de irrigação.

Conclusões

O uso da tecnologia de aeronaves remotamente pilotada, de asa fixa, equipada com sensor RGB (resolução geométrica de 2,7 cm) é adequado para levantamentos altimétricos com tolerância de erros em torno de 10 cm.

Referências bibliográficas

- Albarci, F. L. (2011). Posicionamento relativo: Análise dos resultados combinando as observáveis L1 dos satélites GPS e SBAS (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Casaca, J., Matos, J., & Baio, M. (2005). Topografia Geral. Rio de Janeiro: LTC.
- Silva Júnior, J. F., Siqueira, D. S., Marques Júnior, J., & Pereira, G. T. (2012). Classificação numérica e modelo digital de elevação na caracterização espacial de atributos dos solos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16 (4), 415-424.
- Felipe, A. L. S. (2015). Topografia convencional na aferição de área obtidas por georreferenciamento e Google Earth (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu.
- Goes, M. J. (2016). Utilização de nuvem de pontos para fins de caracterização altimétrica do terreno (Trabalho de Conclusão). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal.
- Haala, N., Hastedt, H., Wolf, K., Ressler, C., & Baltrusch, S. (2010). Digital photogrammetric camera evaluation-generation of digital elevation models. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 2010 (2), 99-115.
- Instituto Nacional de Colonização e de Reforma Agrária (2016). Georreferenciamento e certificação de imóveis acima de 100 ha passam a ser obrigatórios. Acessado de <http://www.incra.gov.br/noticias/georreferenciamento-e-certificacao-de-imoveis-acima-de-100-ha-passam-ser-obrigatorios>.

- Instituto Nacional de Colonização e de Reforma Agrária (2013). Manual técnico de posicionamento: georreferenciamento de imóveis rurais. Brasília: INCRA.
- Johnson & Hebert, M. (1997). Recognizing objects by matching oriented points. Trabalho apresentado no Computer society conference on computer vision and pattern recognition, San Juan, Puerto Rico, USA.
- Jorge, L. A. C. & Inamasu, R. Y. (2014). Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em Agricultura de Precisão. In: Bernardi, A. C. C., Naime, J. M., Resende, A. V., Bassoi, L. H., & Inamasu, R. Y. (Eds.), Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília: EMBRAPA.
- Lazzarotto, D. R., & Oliveira, G. C. (2012). Georreferenciamento de imóvel rural no município de Irati/PR utilizando o método relativo estático (Monografia de Especialização). Universidade Tuiuti do Paraná, Tuiuti.
- McCormac, J. C. (2007) Topografia. LTC: Rio de Janeiro.
- Meneses, P. R. (Ed.) (2017). Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. Brasília: UNB.
- Molin, J. P., Amaral, L. R., & Colaço, A. F. (2015). Agricultura de precisão. São Paulo: Oficina de Textos.
- Monico, J. F. G. (2007). Posicionamento pelo GNSS. São Paulo: UNESP.
- Rosalen, D. L. (2015). Veículo aéreo não tripulado – VANT. In: Balardo, G. C., Cassia, M. T., & Silva, R. P. Processos Agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar. Jaboticabal: SBEA.
- Rosalen, D. L., Gonçalves, K. C., & Takahashi, K. M. (2010). Mapeamento de fragmentos florestais através de diferentes receptores GPS. Trabalho apresentado no III Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Cáceres, Mato Grosso, Brasil.
- Simões, M. G. (1993). Modeladores digitais de terreno em sistemas de informação geográfica (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Trimble (2023). GNSS Planning Online. Acessado de <https://www.gnssplanning.com/#/satellites?tab=J>.
- Tschiedel, M., & Ferreira, M. F. (2002). Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. Ciência Rural, 32 (1),159-163.

A IMPORTÂNCIA DAS SÉRIES HISTÓRICAS DE USO E COBERTURA DA TERRA NA ANÁLISE DO PROCESSO DE URBANIZAÇÃO: EXEMPLO DO MUNICÍPIO DE DIADEMA – SP, BRASIL

Ana Vietti Bitencourt; Elisa Hardt

Departamento de Ciências Ambientais, Universidade Federal de São Paulo, Diadema, Brasil

ana.bitencourt@unifesp.br

Resumo

Geotecnologias são fundamentais para estudos de séries históricas de uso e cobertura da terra (LUC), que fornecem informações relevantes a respeito da taxa e do padrão da expansão urbana ao longo das décadas. A compreensão das transformações espaço-temporais do ambiente urbano é essencial para que os gestores estabeleçam políticas públicas e planejamentos adequados, visando a qualidade de vida da população. Este capítulo tem como objetivo analisar como as séries históricas LUC podem ser importantes para o entendimento da urbanização em espaços densamente povoados, como no caso do município de Diadema - SP e, dessa forma, contribuir para o planejamento sustentável das cidades. Foram analisados dois mapas LUC de anos distintos (1945 e 2015) de Diadema, produzidos por fotointerpretação em escala micro (maior que 1:20.000). Os resultados mostraram que em 1945 o território era marcado pelo predomínio de cobertura vegetal nativa, cobrindo metade da área, tendo como destaque as atividades agrícolas, a silvicultura e os campos antrópicos. Naquele momento havia baixo adensamento urbano, configurando principalmente propriedades rurais, com limitada malha viária. Em contraste, em 2015, o território esteve caracterizado principalmente pelo uso urbano altamente adensado, com forte influência do uso industrial, além de pressões antrópicas decorrentes da extensa malha viária. A sistematização destas informações por meio de mapas mostrou-se útil para o entendimento da evolução das formas de uso e de ocupação do Município, constituindo importante ferramenta de aprendizado, planejamento e de orientação à tomada de decisão em prol da sustentabilidade pelos grandes centros urbanos como Diadema.

Palavras-chave: Sistema de Informação Geográfica, evolução urbana, mudança espaço-temporal, fotointerpretação

Introdução

A criação de mapas de uso e cobertura da terra (*land use and land cover* - LUC) caracteriza-se por um conjunto de operações técnicas, envolvendo análise e interpretação de imagens da paisagem por meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). No caso da

fotointerpretação, os mapas são produzidos com maior participação do analista, com base na categorização de tipologias de uso, identificadas por meio de padrões de tonalidade, forma, textura, entre outras propriedades visuais da cobertura terrestre, sintetizadas em mapas (Paine e Kaiser, 2012). A fotointerpretação tem especial aplicabilidade na criação de séries históricas em décadas anteriores ao surgimento do primeiro satélite LANDSAT-1, no ano de 1972, uma vez que as fotografias aéreas não possuem as propriedades espectrais necessárias para a criação de mapas por técnicas do sensoriamento remoto de classificação automática (Lillesand et al. 2015).

Nas últimas décadas, os estudos e análises de mudanças dos usos e cobertura da terra (*land use and land cover change* - LUCC) envolvendo séries temporais vem ganhando destaque para o entendimento das alterações ocorridas nas paisagens em relação às ações e intervenções humanas, sendo possível avaliar e quantificar padrões e processos que afetam a dinâmica dos sistemas naturais, bem como aqueles relacionados aos sistemas urbanos.

Por séculos, o homem vem transformando as paisagens visando atender às suas necessidades básicas, utilizando recursos para obtenção de energia, alimentos, abastecimento e produtos dos mais variados tipos. Essas transformações vêm gradualmente acarretando na modificação dos sistemas terrestres e aquáticos, a tal ponto de promover grandes alterações, afetando igualmente, de forma integrada, outros componentes do sistema Terra, como o clima, a água e a biodiversidade. Estudos apontam sobre os efeitos das LUCC no sistema climático, alertam sobre o seu papel nas mudanças climáticas, nos distúrbios naturais e na estrutura da paisagem (Kulakoski et al., 2011; Dale et al. 2011); avaliam as alterações e quantificam os padrões LUC decorrentes dos processos de urbanização e seus impactos em vários exemplos mundiais (Seto e Fragkias 2005, Gupta, 2014; Singh et al. 2017, Sahoo et al. 2018, Aithal et al. 2019, Zang et al. 2020).

O processo de desenvolvimento e crescimento das grandes cidades brasileiras se intensificou, principalmente, entre os anos de 1950 e 1980, período em que houve a maior aceleração do processo de urbanização. No final dos anos de 1950 ocorreu uma grande mudança no ordenamento do território e na estrutura socioeconômica brasileira, que passou de uma população essencialmente rural para urbana, provocando muitos impactos ambientais (Fernandes, 2000).

Neste período, a questão ambiental não ocupava as agendas governamentais nas esferas municipais, estaduais ou federais no Brasil, e a concepção de "desenvolvimento" estava associada ao crescimento das malhas urbanas e ao crescimento econômico via processo de industrialização. Antes dos anos 1960 a legislação ambiental tinha como principais instrumentos normativos o Código de Águas de 1934 (Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934) e o Código de Minas de 1940 (Decreto-Lei nº 1985, de 29 de janeiro de 1940), e em 1965 surge o Código Florestal (Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965).

A partir de 1981, foi instituída a Política Nacional do Meio Ambiente e o Sistema Nacional de Meio Ambiente (Sisnama), visando assegurar condições ao desenvolvimento socioeconômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana, bem como a manutenção do equilíbrio ecológico, considerando o meio ambiente como um patrimônio público a ser necessariamente assegurado e protegido, tendo em vista o uso coletivo (Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981).

No entanto, o processo de urbanização do país ocorreu muito tempo antes da implementação dessa importante lei, sendo guiado por um ritmo de crescimento populacional bem superior ao fornecimento de instalações e infraestruturas adequadas para tal expansão (Villaça, 2015).

O planejamento urbano no Brasil teve modelos variados, desde concepções europeias, documentação organizada por planos diretores, até planos sem a devida representação espacial através de mapas da cidade. A grande maioria dos planos diretores realizados no Brasil foi implementada a partir dos anos 1960, tendo sido muito genéricos e fortemente associados à noção de zoneamento, o que na prática, pouco orientava nas ações do poder público. O zoneamento costuma dividir a cidade em diretrizes e limita-se, normalmente, a estipular índices referentes à taxa de ocupação, de aproveitamento máximo do lote, número máximo de pavimentos e afastamentos frontais e laterais, assim como os usos permitidos em cada uma das zonas (Feldman, 1997; Souza, 2003).

Segundo o Estatuto das Cidades (Lei Federal 1025, de 01 de 10 de julho de 2001), o Plano Diretor é o instrumento básico da política de desenvolvimento e de expansão urbana, previsto também no art. 182, § 1º da Constituição Federal de 1988. O plano deve exercer a função essencial de fixar critérios para a ocupação do solo, incluindo a proteção ambiental, com o objetivo de ordenar e promover o desenvolvimento urbano sustentável. Aqui aparece um conceito muito importante: “desenvolvimento sustentável”, que foi estabelecido pelas Nações Unidas num documento produzido em 2005 sobre a “Educação para o Desenvolvimento Sustentável”. (Unesco, 2005).

Em consequência desse histórico, são recorrentes as problemáticas ambientais em grandes centros urbanos brasileiros, especialmente as cidades densamente povoadas e localizadas nas proximidades de áreas de mananciais, Diadema - SP. Ao longo dos anos, tanto no Brasil quanto no mundo, as áreas de mananciais estão sendo degradadas por diversas atividades antrópicas danosas, cita-se o exemplo das ocupações irregulares e ou desordenadas que geram impactos como o desmatamento e a queima de remanescentes florestais, a impermeabilização dos solos e o lançamento de esgotos industriais e domésticos em rios, lagos e represas. Em função disso, ocupações urbanas críticas como a da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), considerada a maior metrópole da América do Sul, hoje representam um cenário de preocupação quanto à qualidade e quantidade de água para o abastecimento público. Mananciais como o da represa Billings, por exemplo, apresentam-se em grande parte ocupados por atividades antrópicas e assentamentos irregulares (Santoro et al., 2008), que historicamente são resultantes de um processo crescente de expansão urbana para as áreas mais periféricas das grandes cidades. Neste processo, a população de baixa renda, na procura por terras de valor reduzido, ocupa locais sem as benfeitorias do poder público, ficando expostas aos riscos da degradação ambiental por falta de alternativas (Maricato, 1996; Torres et al., 2007).

Com a ciência de que o estado de conservação das áreas de mananciais está diretamente relacionado com a quantidade e a qualidade de florestas remanescentes (Biao et al., 2010), surgem novas medidas legais que preveem a proteção dos remanescentes florestais e a recuperação das áreas degradadas, como a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997) e a Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998). Além disso, áreas de mananciais como a da represa Billings na RSMP passam a ter legislações ambientais específicas como a Área de Proteção e Recuperação dos Mananciais da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings - APRM-B (Lei nº 13.579, de 13 de julho de 2009). Ainda assim, o que se percebe é uma realidade de não fiscalização (Alvim et al., 2008) e baixo cumprimento legal (Issii et al., 2020), um problema presente em outras regiões do país (Hardt et al. 2013; Payés et al., 2013; Souza et al., 2014).

O estado atual de conservação ambiental de uma determinada área também está relacionado com o seu histórico de uso, compreendido a partir da avaliação das forças motrizes de mudanças ocorridas ao longo do tempo (Bürgi et al., 2004). Análises de séries históricas de LUC permitem inferir os impactos das mudanças de cobertura vegetal sobre a qualidade da água e, por exemplo, calcular os danos financeiros em termos de custos de tratamento de água (Adas et al., 2020). Ademais, partindo-se do pressuposto de que conhecer o passado ajuda na conservação do futuro (Willis et al., 2007), a compreensão dessas forças motrizes de mudanças espaço-temporais pode ser essencial na construção de cenários de tendência e de expectativas de diferentes atores sociais para a prevenção ou mitigação de impactos (Hardt et al. 2012; 2014; Romero et al., 2018; Shida e Pivello, 2002) que podem trazer prejuízos para a qualidade de vida da população.

Em vista dos fatos apresentados, são relevantes os avanços no reconhecimento da importância das séries históricas de uso e cobertura da terra na análise do processo de urbanização de grandes centros urbanos como a RMSP. O presente capítulo, a partir de uma análise do mapeamento de uma série histórica LUC, objetiva apresentar o processo de urbanização do município de Diadema-SP, comparando mudanças ocorridas entre os anos de 1945 e 2015 e, paralelamente, com o histórico dos planos diretores da cidade neste período. Estes mapas foram criados no âmbito da temática evolução urbana do Projeto Atlas Ambiental de Diadema e visam trazer contribuições para o planejamento e de políticas públicas no município, colaborando para o cenário de desenvolvimento sustentável da cidade no que tange às transformações nos usos e cobertura da Terra.

Material e métodos

O município de Diadema está localizado no estado de São Paulo, é um dos municípios que compõem o grande ABC, situado a sudeste da RMSP, a 782 metros de altitude, com as seguintes coordenadas geográficas: Latitude 23° 41' 11" Sul e Longitude 46° 37' 24" Oeste. (Figura 1). Ocupa uma área de 30,732 km² e em 1.º de julho de 2021 a sua população foi estimada 429,550 habitantes, sendo o 14º município mais populoso do Estado e o 2º em densidade demográfica do Brasil (IBGE, 2021).

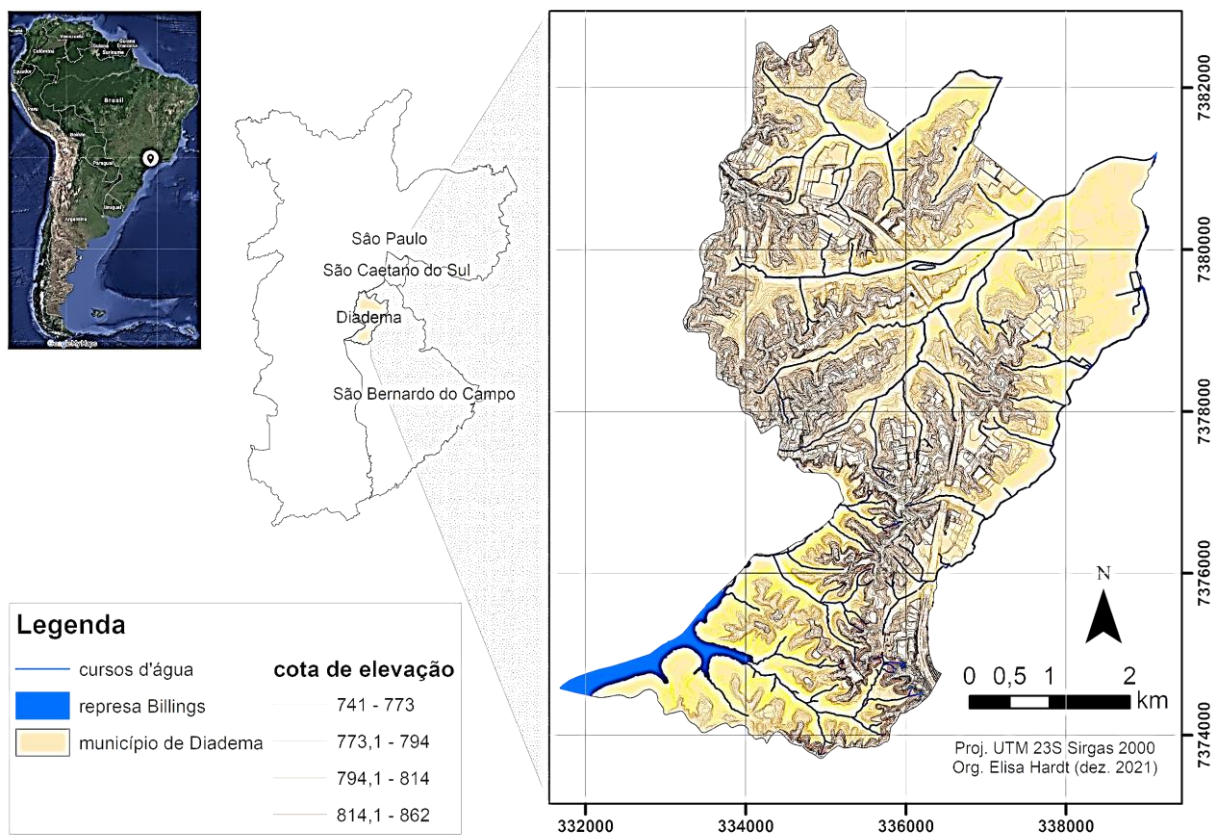


Figura 1: Localização da área de estudo, Município de Diadema - SP (Brasil).

Os mapas de uso e cobertura da terra foram elaborados no programa ArcGIS® como parte do projeto Atlas Ambiental do Município de Diadema - capítulo de Evolução Urbana da Paisagem. Foram obtidos por fotointerpretação de ortofotos aéreas dos anos de 1945 (preto e branco) e 2015 (colorida), com resolução espacial de 0,3 e 0,1 m, respectivamente. Para ambos os anos, as ortofotos foram obtidas pela Empresa BASE e cedidas pelo setor de cartografia da Prefeitura Municipal de Diadema (PMD).

O mapeamento foi realizado em display de tela em torno de 1:1000 a partir da classificação de 12 tipos de uso e cobertura da terra (Tabela 1), que representam o histórico de mudanças do município ao longo das últimas sete décadas.

A mudança LUC entre os anos foi calculada no IDRISI® a partir da sobreposição dos mapas para a criação de tabulação cruzada (ferramenta CROSSTAB). Para facilitar a visualização e interpretação das transformações, foram gerados gráficos que indicam a porcentagem de perdas e ganhos de um determinado uso/cobertura em relação aos outros tipos.

Tabela 1: Legenda dos mapas da série histórica de uso e cobertura da terra elaborados para o município de Diadema.

Classe	Código	Descrição
Agricultura	AGR	Áreas de cultura agrícola perene ou anual; inclui hortaliças comunitárias
Campo antrópico	CAM	Áreas abertas de uso antrópico, com eventual presença de edificações e árvores isoladas; inclui pastagens, lotes sem edificações, áreas abandonadas e jardins
Corpo d'água	AGU	Rios, reservatórios artificiais e áreas alagadas
Vegetação nativa	VEG	Fragmentos de Mata Atlântica, em diferentes estágios sucessionais e possível ocorrência de espécies exóticas
Indústria	IND	Áreas de uso industrial demarcadas por muros ou cercas, podendo incluir áreas com campos antrópicos e vegetação arbustiva-arbórea
Silvicultura	SIL	Áreas de plantio maciço ou esparso de espécies exóticas de <i>Eucalyptus</i> spp. e <i>Pinus</i> spp., com possível ocorrência de regeneração natural no sub-bosque
Solo exposto	EXP	Solo sem cobertura vegetal devido à ação de processos erosivos, obras de terraplanagem ou preparo para cultivos
Urbano altamente adensado	UAA	Áreas efetivamente ocupadas por usos residenciais, comerciais e de serviços, com alta densidade de edificações (maior que 1/2 em lotes impermeabilizados e que 2/3 nos outros)
Urbano médio-baixo adensado	UMA	Áreas com média-baixa densidade de edificações (residenciais, comerciais e de serviços) delimitadas por quadras, muros ou poligonais, podendo incluir áreas com campos antrópicos e vegetação arbustivo-arbórea
Vegetação arbustivo-arbórea	VAA	Aglomerados de árvores e arbustos de no mínimo 3 árvores distantes em até 10 m em cobertura mínima de 100 m ²
Vegetação de várzea	VAR	Vegetação de composição variável que sofre influência dos rios, estando sujeita a inundações periódicas na época das chuvas
Vias de acesso	VIA	Estradas, avenidas e ruas com ou sem pavimento com largura mínima de 2 m

Resultados

Diadema é altamente urbanizada nos dias atuais e não se parece em nada com a Diadema rural de 70 anos atrás (Figura 2, Tabela 2).

No ano de 1945 o território era marcado pelo predomínio de cobertura vegetal nativa (50%), tendo como destaque as atividades agrícolas (13%), a silvicultura (11%) e os campos antrópicos (17%). Neste momento havia baixo adensamento urbano, configurando principalmente propriedades rurais, com baixa ocupação urbana (2%) e limitada malha viária (2%). Dados do Censo do IBGE entre 1940 e 1950 indicam uma população de 3.023 pessoas, em sua maioria vivendo na área rural da região que se emancipou de São Bernardo do Campo como Diadema em 1953, tendo como principais atividades econômicas a pesca, o cultivo de subsistência, o ponto turístico no Balneário da Billings, a extração de madeira para carvão e as olarias que dariam início a sua crescente industrialização nas próximas décadas.

Em contraste, no ano de 2015, o estado do território de Diadema é caracterizado pela urbanização (47%), principalmente pelo uso urbano altamente adensado (com 34%) da área, além de 13% de cobertura pelo uso médio adensado. Nas últimas décadas passou a haver uma forte influência do uso industrial (com 16%) da área, além de pressões antrópicas da extensa malha viária de acesso (com 13%). As atividades econômicas e usos rurais, como a silvicultura, a agricultura e os campos antrópicos, passaram a ser substancialmente menos representativas, 2,5%, 0,1% e 8% da área do município, respectivamente). Dos cerca de 15 km² de áreas de cobertura vegetal nativa de 1945, restaram apenas 5% de florestas em meio a matriz urbana. Segundo o Censo de 2010, Diadema passou a ser ocupada por mais de 400 mil pessoas. Neste período, Diadema ascendeu à posição de um dos municípios com maior densidade populacional do País, com 12.881 habitantes por km² concentrados essencialmente em áreas urbanas, de acordo com o (IBGE, Censo de 2010).

A paisagem de 2015 mudou consideravelmente não só em composição, mas também em configuração e heterogeneidade. A paisagem atual é muito mais heterogênea e está organizada em uma configuração diferente de seus elementos. Por exemplo, atualmente a silvicultura está concentrada na porção sul, mas em 1945 também estava distribuída nas porções centrais do Município e em frequente vizinhança com a agricultura.

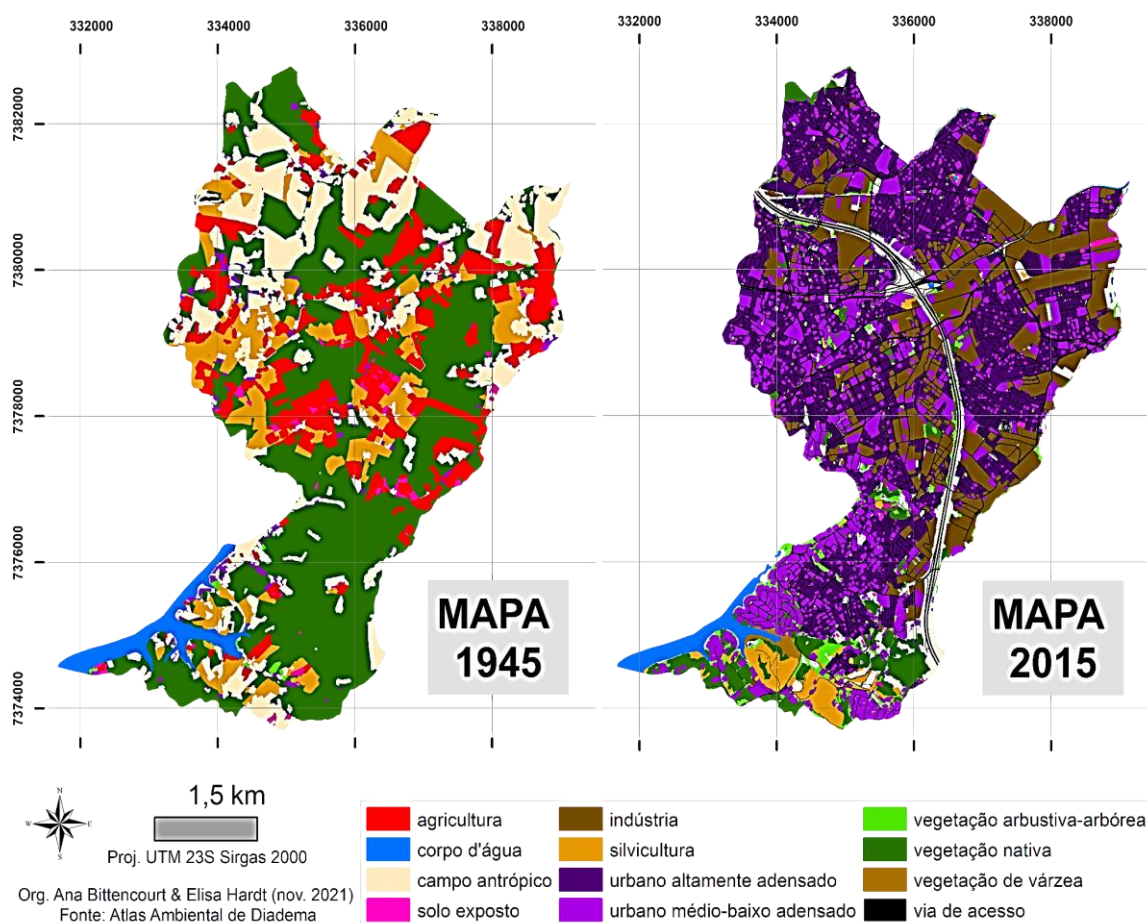


Figura 2: Mapas de uso e cobertura da terra do município de Diadema obtidos por interpretação visual de ortofotos aéreas dos anos de 1945 e 2015.

A sobreposição entre os mapas enfatiza as substanciais perdas de áreas agrícolas e vegetação nativa no período, que passaram em sua maioria para uso urbano altamente adensado e industriais em 2015 (Figura 3). As transformações entre os anos também sugerem alterações de distribuição de usos como campo antrópico, silvicultura e solo exposto, que possuem ganhos e perdas ao longo do tempo. A maioria dos ganhos em 2015 são provenientes do desmatamento de áreas com vegetação nativa, enquanto que as perdas de 1945 foram especialmente a favor do uso urbano altamente adensado.

Tabela 2. Áreas de uso e cobertura da terra do município de Diadema nos anos de 1945 e 2015

Tipos de uso e cobertura da terra	1945		2015	
	ha	%	ha	%
Agricultura	377	12,2	2	0,1
Campo antrópico	555	18,0	243	7,9
Corpo d'água	75	2,4	59	1,9
Indústria	0	0,0	531	17,2
Silvicultura	356	11,5	78	2,5
Solo exposto	31	1,0	18	0,6
Urbano altamente adensado	0	0,0	1075	34,9
Urbano médio-baixo adensado	68	2,2	419	13,6
Vegetação arbustivo-arbórea	17	0,5	67	2,2
Vegetação de várzea	1	0,0	21	0,7
Vegetação nativa	1538	50,0	160	5,2
Vias de acesso	63	2,0	408	13,2

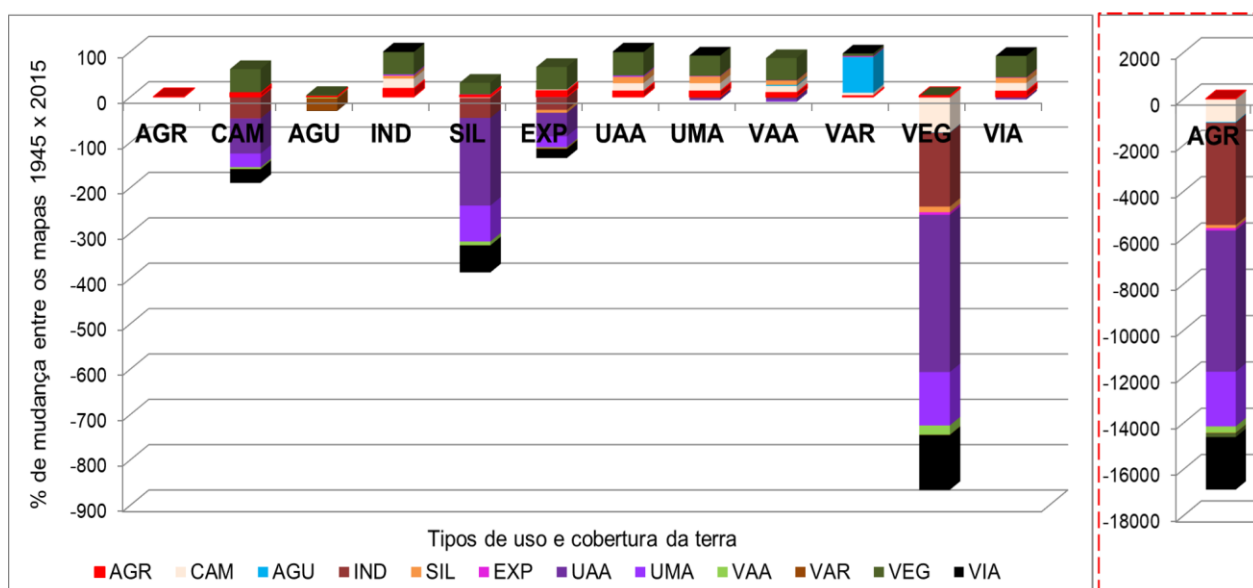


Figura 3. Porcentagem de mudança entre os tipos de uso e cobertura da terra em Diadema - SP nos anos de 1945 e 2015. Barras acima e abaixo do eixo zero indicam, respectivamente, os ganhos e as perdas dos usos/coberturas indicadas no eixo X.

Discussão

Diante dos dados apresentados, observa-se que a evolução urbana de Diadema acompanhou o cenário histórico dos grandes centros urbanos brasileiros. Os dois anos analisados (1945 e 2015) representam os extremos de caracterização LUC do município, considerando que não há imagem disponível em anos anteriores a 1945. A partir da análise LUC deste período é demonstrado a visível ruptura do modelo de concepção dos usos e cobertura da terra, a partir de uma perspectiva essencialmente rural, representado no mapa LUC do ano de 1945, para uma perspectiva urbana

no mapa LUC de 2015, que priorizou um modelo de ocupação do solo pautado pelo desenvolvimento industrial e comercial como metas econômicas e de desenvolvimento regional, o que impulsionou o adensamento urbano.

Essa mudança de perspectiva trouxe um aumento substancial na heterogeneidade da paisagem, o que inevitavelmente amplia as fronteiras entre coberturas naturais e usos antrópicos, como o uso industrial e o urbano altamente adensado, conforme verificado por Romero et al. (2018) na análise LUC entre 1962 e 2011 nas áreas de mananciais da Billings em Diadema. Em consequência disso, é esperado que a complexidade de gestão territorial aumente, especialmente no que tange a conservação e proteção de áreas naturais em busca da sustentabilidade (Hardt et al. 2013). Dessa forma, idealmente, os Planos Diretores de cidades como Diadema devem acompanhar as mudanças espaço-temporais de composição, configuração e heterogeneidade de elementos na paisagem, visando criar e atualizar planos e ações de gestão adequados às transformações LUC ao longo dos anos.

Relacionando-se esse processo LUC de Diadema a um breve histórico do planejamento urbano do município através da trajetória dos planos diretores, destaca-se que a partir de 1969, Diadema estabeleceu o primeiro zoneamento (Lei municipal 369, de 1969), em que a ocupação do município foi setorizada em cinco principais áreas, delimitadas por perímetros entre avenidas, córregos, represa e bairros: I - Zona Industrial Pesada, II - Zona Industrial, destinada às indústrias leves, serviços, montagens e transformações, III - Zona Comercial, IV - Zona Residencial e V - Zona Turística (Figura 4a). Nesta concepção, mais da metade do território ficou destinado às instalações industriais (pesadas e leves), que ainda não estavam presentes em 1962 (Atlas Ambiental de Diadema, s/d), mas aparentemente influenciou na industrialização do Município nas décadas posteriores. Neste zoneamento, a porção sul de Diadema, que hoje abriga os últimos remanescentes de Mata Atlântica do município, foi definida como uma zona turística, e apenas uma área menor, na parte centro oeste, era reservada para o uso residencial, que hoje ocupa quase a metade do município (mapa 2015).

Em 1973 novas adequações foram implementadas no plano diretor da cidade (Lei Ordinária 468, de 1973), com maior detalhamento para ocupação do território, destacando-se em especial as divisões de áreas: Especial Turística, Residencial (baixa, média e alta densidade), Comercial (central, local e atacadista) e industrial (pesada e leve), figura 4b.

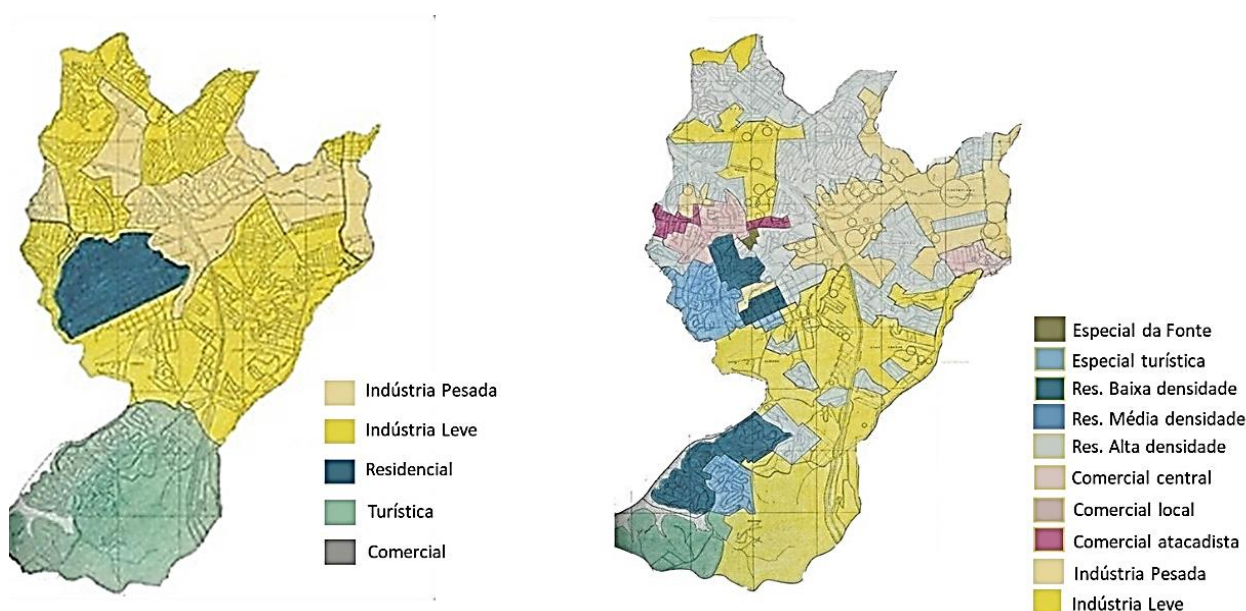


Figura 4: Plano Diretor de Diadema para os anos de 1969 (a) e 1973 (b). Fonte: adaptado de Junior (2011)

Apesar da existência destes planos e de sua materialidade em mapas, o processo real da ocupação urbana ocorreu de forma distinta e desordenada em relação a aquelas estabelecidas nos planos diretores, sem a devida infraestrutura, em especial para as áreas ocupadas por moradias e conjuntos urbanos irregulares, que se aglomeravam no

No período subsequente, entre 1980 e 2000, surgiu um novo movimento de políticas públicas, voltadas ao atendimento de demandas populares, em especial da classe trabalhadora de baixa renda. Este movimento inverteu as prioridades do poder público municipal, até então direcionadas, de maneira quase exclusiva, para as regiões central e industrial da cidade. Nesta nova perspectiva, iniciou-se a política de urbanização das moradias irregulares (favelas), que se alinhava ao "Plano de Erradicação das Favelas" (Bonduki e Rolnick, 1979).

Visando atender as demandas reprimidas, a (Lei Orgânica Municipal nº 652 de 18 de junho de 1980) sobre a "Concessão de Direito Real de Uso" para os moradores em ocupações irregulares residentes em áreas públicas municipais, passando a receber a denominação de "núcleos habitacionais". Posteriormente, diversas leis semelhantes foram aprovadas nos anos de 1988, 1992 e 1996, concedendo este direito a outras áreas públicas (Lobo Junior, 2011).

Em 1994 consolidou-se um novo plano diretor para a cidade, contendo novidades na sua estruturação com a indicação das áreas de ocupação irregular em "núcleos habitacionais". Outro ponto de destaque em termos de LUC foi a implantação das Áreas Especiais de Interesse Social (AEIS), divididas em duas categorias: AEIS 1- para terrenos privados vazios, destinados à implantação de empreendimentos habitacionais de interesse social e AEIS 2- para áreas de núcleos habitacionais, visando a consolidação da urbanização, com a implementação de melhorias e regularização fundiária.

A prática de inserção das AIES veio a ser consagrada posteriormente, juntamente com outros instrumentos de esfera federal, a partir do estabelecimento do Estatuto das Cidades (Lei Federal 10257, de 10 de julho de 2001).

No constante processo de ajustes e estabelecimento de novos Planos Diretores para Diadema, para 2015 (ano do mapa LUC) o plano estabelece cinco zonas de uso e nove áreas espaciais (Figura 5):

I. ZONA PREDOMINANTEMENTE RESIDENCIAL - "ZR": a) ZRB - Zona Residencial de Baixa Densidade, destinada prioritariamente ao uso residencial; b) ZRM - Zona Residencial de Média Densidade, destinada prioritariamente ao uso residencial e usos compatíveis com o mesmo; c) ZRA - Zona Residencial de Alta Densidade, destinada prioritariamente ao uso residencial e usos compatíveis com o mesmo, sendo incentivada a verticalização.

II. ZONA DE USO DIVERSIFICADO - "ZD": a) ZDT - Zona de Uso Diversificado com Uso Terciário, destinada a convivência de usos diversos, exceto industrial, com prioridade para comércio e serviços; b) ZDST - Zona de Uso Diversificado com Uso Secundário e Terciário, destinada a convivência de usos diversos, com prioridade para comércio e serviços;

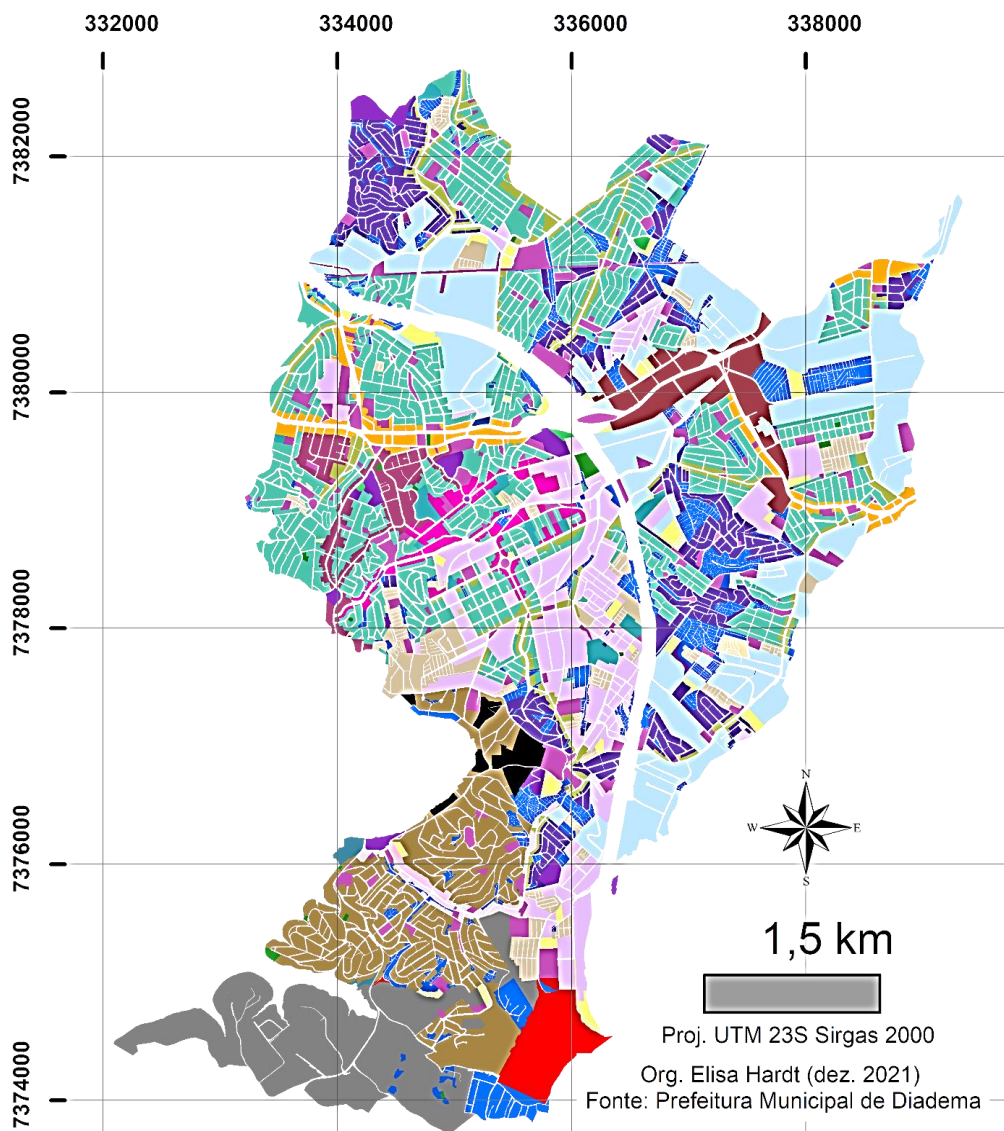
III. ZONA INDUSTRIAL - "ZI": a) ZIG - Zona Industrial de Grande Porte, destinada prioritariamente a indústrias de grande porte; b) ZIM - Zona Industrial de Médio Porte, destinada prioritariamente a indústrias de médio e pequeno porte.

IV. ÁREA ESPECIAL DE INTERESSE SOCIAL - "AEIS": a) AEIS - 1 - Área Especial de Interesse Social 1, compreendendo terrenos não edificadas, subutilizados ou não utilizados, destinados à implantação de Empreendimentos Habitacionais de Interesse Social - "EHIS", e com reservas de áreas para equipamentos comunitários; b) AEIS - 2 - Área Especial de Interesse Social 2, compreendendo terrenos ocupados por favelas ou assentamentos habitacionais assemelhados, destinados a Programas de Reurbanização, regularização jurídica da posse da terra ou Empreendimentos Habitacionais de Interesse Social - "EHIS";

V. ÁREA ESPECIAL DE PRESERVAÇÃO AMBIENTAL - "AP", destinadas à conservação ou reconstituição de vegetação de interesse ambiental, compreendendo: a) AP1 - Área Especial de Preservação Ambiental 1, terrenos situados na Bacia do Reservatório Billings, em Área de Proteção aos Mananciais regidos por legislação estadual, subdividida em: 1. AP1r - Área Especial de Preservação Ambiental 1r, para a recuperação e melhoria da

qualidade ambiental da área; 2. AP1m - Área Especial de Preservação Ambiental 1m, para a manutenção da qualidade ambiental da área; b) AP2 - Área Especial de Preservação Ambiental 2, terrenos situados fora da Bacia do Reservatório Billings; c) AP3 - Área Especial de Preservação Ambiental 3, compreendendo as áreas de propriedade pública. **VI. ÁREA ESPECIAL INSTITUCIONAL - "AINS"**, destinada prioritariamente à implantação de equipamentos comunitários.

Apesar do maior detalhamento do zoneamento, estudos como o de Issii et al. (2020) evidenciam a agravante condição de baixo cumprimento da manutenção de cobertura vegetal prevista pelo Plano Diretor de Diadema, com apenas 52% do cumprimento legal nas áreas de mananciais do município.



Legenda				
■ AEDES / ZPA	■ AEUI/AP 2	■ EAC	■ EEP1	■ ZRA
■ AEIS 1	■ AP 1	■ EEA	■ IPHAC	■ ZRU
■ AEIS 2	■ AP 2	■ EEL 1	■ REPRESA	■ ZUPI
■ AEIS 3	■ AP 2/ IPHAC	■ EEL 2	■ ZEDE	
■ AEIS 3 / IPHAC	■ AP 3	■ EEP 1	■ ZPA	
■ AEUI	■ AP 3 / IPHAC	■ EEP 2	■ ZQU	

Figura 5: Zoneamento definido pelo Plano Diretor de Diadema no ano de 2015.

Ao confrontarmos as transformações LUC durante os últimos 70 anos em relação às diferentes fases e formulações de políticas públicas através dos planos diretores, é notório o grande descompasso entre a dinâmica do processo de ocupação e o planejamento urbano de Diadema. Apesar dos esforços empreendidos a partir dos anos de 1980, a realidade atual de predomínio do uso urbano altamente adensado resulta da herança do processo histórico que conferiu a mudança de paradigma do ordenamento do território e da estrutura socioeconômica brasileira.

A questão que se coloca para Diadema no quesito das metas de “Cidades Sustentáveis”, ainda impera um grande desafio, em que transformações de usos e cobertura ao longo de décadas passam igualmente a implicar em sérias pressões nos sistemas naturais, além da perda da biodiversidade, impactos sobre os recursos hídricos e no clima.

Para atingir as metas do desenvolvimento sustentável (ONU 2030), será necessário unir esforços, entre a pesquisa acadêmica e os tomadores de decisões, para a integração de um conjunto de dados, entre usos e cobertura da terra, recursos, hídricos e climáticos, além de outros parâmetros socioambientais para a formulação de novos planos de gestão pública visando tais metas de sustentabilidade.

Considerações finais

A sistematização de informações por meio de mapas possui grande utilidade para o conhecimento e análise da evolução das formas de uso e de ocupação do solo e de suas interações com as coberturas nativas, aqui servindo de exemplo para reflexão o caso do município de Diadema na região metropolitana de São Paulo. A criação e análise de séries históricas LUC constitui importante ferramenta de planejamento e de orientação à tomada de decisão, e instrumento para a construção de indicadores ambientais, contribuindo para o desenvolvimento de políticas públicas, visando o desenvolvimento sustentável.

Agradecimentos

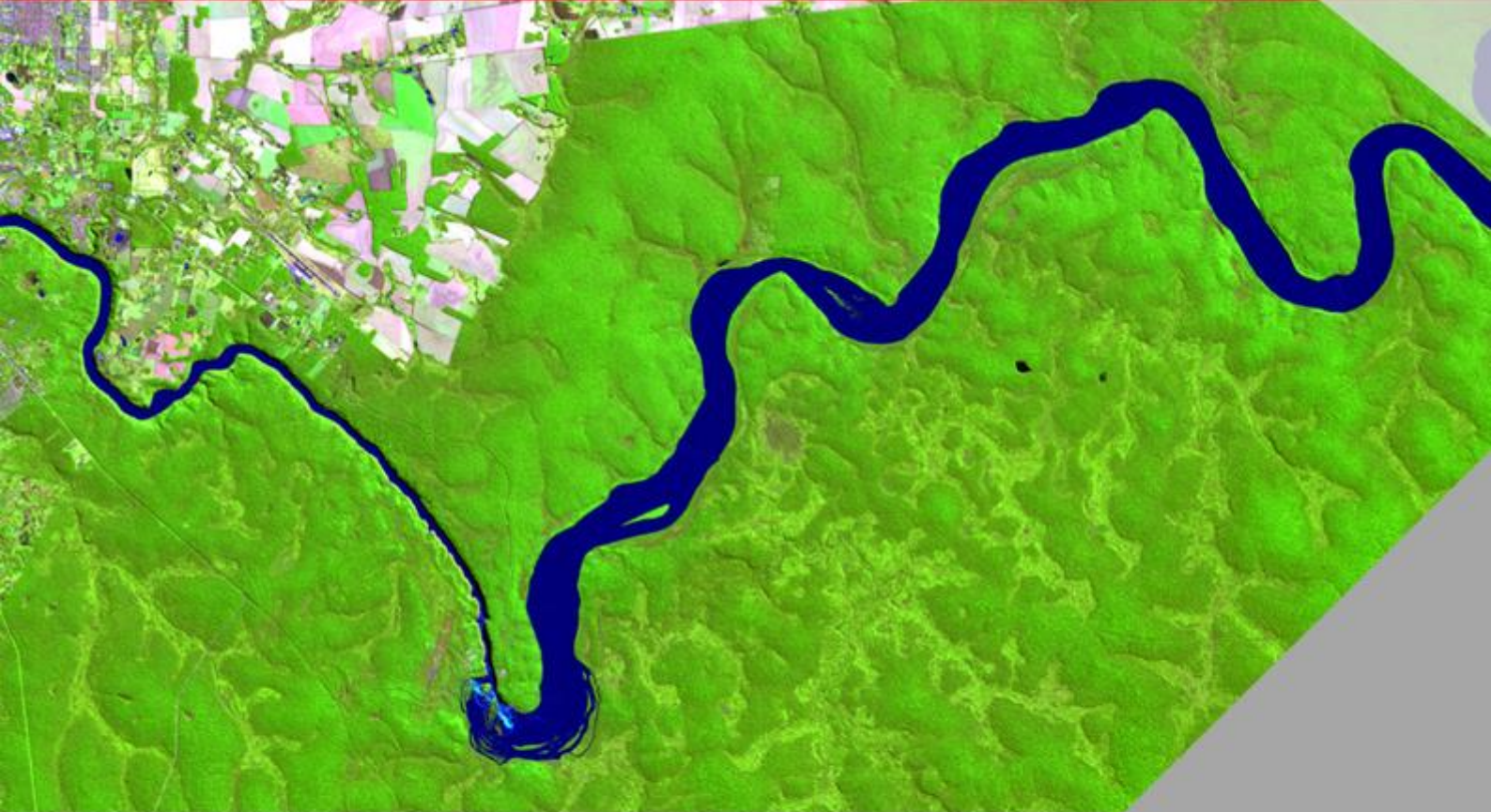
As autoras agradecem à Prefeitura de Diadema pela disponibilidade da base de dados geoespacial do Município e aos alunos da UNIFESP Bruna Souto, Caroline Anjos, Nayara Pinheiro, Pâmela Oliveira, Rodrigo Manfra e Msc. Thais Issii e colaboradores externos Marielle da Silva Neves e Gilberto Correia dos Santos pelas contribuições na criação dos mapas para o Atlas Ambiental de Diadema. Ao Professor Dr. Nilton Évora do Rosário pela revisão do texto.

Referências bibliográficas

- Adas, M. A. A.; Hardt, E.; Miraglia, S. G. E. K.; Semensatto Junior, D. L. (2020). Reforest or perish: ecosystem services provided by riparian vegetation to improve water quality in an urban reservoir (São Paulo, Brazil). *Sustentabilidade em Debate*, 11(1), 226-243. DOI:10.18472/SustDeb.v11n1.2020.28152
- Aithal, B. H., Chandan, M. C., & Nimish, G. (2019). Assessing land surface temperature and land use change through spatio-temporal analysis: a case study of select major cities of India. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(11), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4547-1>
- Alvim, A.T.B.; Bruna, G.C.; Kato, V.R.C. (2008). Políticas ambientais e urbanas em áreas de mananciais: interfaces e conflitos. *Cadernos Metrôpole*, 19, 143-164.

- Biao, Z.; Wenhua, L.; Gaodi, X.; Yu, X. (2010). Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value. *Ecological Economics*, 69(7), 1416-1426. DOI:10.1016/j.ecolecon.2008.09.004
- Bonduki, Nabil e Rolnik, Raquel (1979). Periferia da Grande São Paulo - reprodução do espaço como expediente de reprodução da força de trabalho. In (MARICATO, Erminia). *A produção capitalista da casa e da cidade no Brasil industrial*. São Paulo: Alfa-Ômega.
- Brasil, Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.
- Brasil, Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.
- Brasil, Lei nº 10257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.
- Bürgi, M.; Hersperger, A.M.; Schneeberger, N. (2004). Driving Forces of Landscape change – current and new directions. *Landscape Ecology*, 19(8) 857–868. <https://doi.org/10.1007/s10980-005-0245-3>
- Dale, V. H., Efrogmson, R. A., & Kline, K. L. (2011). The land use–climate change–energy nexus. *Landscape ecology*, 26(6), 755-773. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9606-2>
- Diadema, Lei nº 369 de 28 de outubro de 1969. Estabelece o zoneamento do Município e dá outras providências.
- Diadema, Lei nº 468/73. Institui O Plano Diretor Físico do Município de Diadema, Suas Normas Ordenadoras e disciplinares e dá Outras Providências.
- Fernandes, Edésio (2000). *Direito urbanístico e política urbana no Brasil*. Belo Horizonte: Del Rey
- Gupta, R. (2014). The pattern of urban land-use changes: A case study of the Indian cities. *Environment and Urbanization Asia*, 5(1), 83-104. <https://doi.org/10.1177/0975425314521539>
- Hardt, E.; Santos, R. F.; Pereira-Silva, E. F. L. (2012). Landscape changes in Serra do Japi: legal protection or scientific expectation? *Bosque*, 33, 37-38. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002012000300019>
- Hardt, E.; Santos, R. F.; de Pablo, C. L.; Agar, P. M.; Pereira-Silva, E. F. L. (2013). Utility of landscape mosaics and boundaries in forest conservation decision making in the Atlantic Forest of Brazil. *Landscape Ecology*, 28, 385-399. DOI:10.1007/s10980-013-9845-5
- Hardt, E.; Santos, R. F.; Pereira-Silva, E. F. L. (2014). Evaluating the ecological effects of social agent scenarios for a housing development in the Atlantic Forest. *Ecological Indicators*, 36,120-130. DOI : 10.1016/j.ecolind.2013.07.013
- Issii, T. M.; Romero, A. C.; Pereira-Silva, E.F.L.; Attanasio, Mario R.; Hardt, E. (2020). The Role Of Legal Protection In Forest Conservation In An Urban Matrix. *Land Use Policy*, 91, 104366 DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.104366
- Junior, L. G. (2011). *Dinâmicas Territoriais, Conflitos e Forma Urbana em Diadema/Sp*. Ipea anais do I circuito de debates acadêmicos.
- Kulakowski, D., Bebi, P., & Rixen, C. (2011). The interacting effects of land use change, climate change and suppression of natural disturbances on landscape forest structure in the Swiss Alps. *Oikos*, 120(2), 216-225. DOI:10.1111/j.1600-0706.2010.18726.x
- Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W. (2015) *Remote Sensing and Image Interpretation*. 7th Edition, Wiley, New York.
- Maricato, E. (1996). *Metrópole na periferia do capitalismo: ilegalidade, desigualdade e violência*. Michigan: Hucitec.
- Paine, D. E.; Kaiser, J. D. (2012). *Aerial Photography and Image Interpretation for Resource Management*: New York, John Wiley and Sons, Third Edition.

- Payés, A.C.; Pavão, T.; Santos, R. F. (2013). The conservation success over time: evaluating the land use and cover change in a protected area under a long re-categorization process. *Land Use Policy*, 30(1) 177-185. DOI:10.1016/J.LANDUSEPOL.2012.03.004
- Patra, S., Sahoo, S., Mishra, P., & Mahapatra, S. C. (2018). Impacts of urbanization on land use/cover changes and its probable implications on local climate and groundwater level. *Journal of urban management*, 7(2), 70-84. doi:10.1016/j.jum.2018.04.006
- Romero, A. C.; Issii, T. M.; Pereira-Silva, E. F. L.; Hardt, E. (2018). Effects of urban sprawl on forest conservation in a metropolitan water source area. *Revista Árvore*, 42, 1-12. <https://doi.org/10.1590/1806-90882018000100014>
- Santoro, P.F.; Ferrara, L.N.; Whately (2008). *M. Mananciais: diagnóstico e políticas habitacionais*. São Paulo: Instituto Socioambiental.
- São Paulo (Estado), Lei nº 13.579, de 13 de julho de 2009. Define a Área de Proteção e Recuperação dos Mananciais da Bacia Hidrográfica do Reservatório Billings APRM-B.
- Seto, K. C., & Fragkias, M. (2005). Quantifying spatiotemporal patterns of urban land-use change in four cities of China with time series landscape metrics. *Landscape ecology*, 20(7), 871-888. <https://doi.org/10.1007/s10980-005-5238-8>
- Shida, C.N.; Pivello, V.R. (2002). Caracterização fisiográfica e de uso das terras da região de Luiz Antonio e Santa Rita do Passa Quatro - SP, com uso de sensoriamento remoto e SIG. *Investigaciones Geográficas Boletín*, 4, 27-42. DOI: 10.14350/rig.30443
- Singh, P., Kikon, N., & Verma, P. (2017). Impact of land use change and urbanization on urban heat island in Lucknow city, Central India. A remote sensing based estimate. *Sustainable cities and society*, 32, 100-114. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.018>
- Souza, C.G., Zanella, L., Borém, R.A.T., de Carvalho, L.M.T., Alves, H.M.R., Volpato, M.M.L. (2014). Análise da fragmentação florestal da área de proteção ambiental coqueiral, Coqueiral - MG. *Ciência Florest.* 24, 631–644. <https://doi.org/10.5902/1980509815743>
- Torres, H.; Alves, H.; De Oliveira, M.A. (2017) São Paulo peri-urban dynamics: some social causes and environmental consequences. *Environment & Urbanization*, 19(1) 207-223. DOI:10.1177/0956247807076784
- Unesco (2005). *Década das Nações Unidas da Educação para o Desenvolvimento Sustentável (2005-2014)*. Brasília: Unesco.
- Villaça, F. (2015). Uma contribuição para a história do planejamento urbano no Brasil. In: DEÁK, Csaba; SCHIFFER, Sueli Ramos (org.) *O processo de urbanização no Brasil*. São Paulo: EdUSP, 2a Ed.
- Willis, K.J.; Araújo, M.B.; Bennett, K.D.; Figueroa-Rangel, B.; Froyd, C.A.; Myers, N. (2007). How can a knowledge of the past help to conserve the future? Biodiversity conservation and the relevance of long-term ecological studies. *Philosophical Transactions of The Royal Society B*, 362 (2367) 175-186. doi: 10.1098/rstb.2006.1977
- Zhang, W., Chang, W. J., Zhu, Z. C., & Hui, Z. (2020). Landscape ecological risk assessment of Chinese coastal cities based on land use change. *Applied Geography*, 117, 102174. <https://doi.org/10.3390/f12091157>



unesp



Asociação de Universidades
GRUPO MONTEVIDEO



Universidad
Nacional
de Rosario

ISBN: 978-9915-9495-2-9



9 789915 949529