

Vol. 1, Núm 1 (2021)

ISSN 2735-6930



Revista Digital

Cartógrafo.CL



Revista Digital

Cartógrafo.CL

Revista digital técnico-profesional, independiente y pluralista; no arbitrada. Orientada a la difusión de temas e informaciones sobre Cartografía y Geomática; así como a todas las ciencias, técnicas y disciplinas asociadas a las Geociencias.

Vol. 1—N° 1

ISSN 2735-6930

Fecha de publicación:
30 de junio de 2021

Periodicidad:
Bianual

País:
Chile

Idioma:
Español

Las opiniones vertidas en esta revista son de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente se corresponden con las de Cartógrafo.CL



Director:

Gabriel Moraga Gormaz
cartografo@cartografo.cl

Edición y diagramación:
Editorial Cartógrafo.CL
editorial@cartografo.cl



<https://cartografo.cl>



Bajo Licencia Creative Commons
Atribución 4.0 Internacional.

TABLA DE CONTENIDOS

Editorial (p. 3)

Artículos Científicos

Análisis de la disminución del cuerpo de agua de la laguna de Aculeo, utilizando imágenes de radar de Sentinel-1A/1B y del Global Surface Water Explorer

Diego Alarcón - Chile/Alemania (pp. 5-14)

Tecnología radar satelital InSAR para la detección y monitorización de la deformación de la superficie terrestre por procesos geodinámicos y/o actividades antrópicas

Gilberto Daniel Hermosillo—México (pp. 15-32)

Análisis de vulnerabilidad hídrica en la cuenca del río Muco ante un escenario de expansión forestal

Sebastián Hormazábal y Mauricio Aguayo—Chile (pp. 33-50)

Caracterización dasimétrica para Uruguay auxiliada por el mapa de uso y cobertura del suelo

Néstor López Dos Santos—Uruguay (pp. 51-64)

Propuesta para el uso de sistemas solares térmicos en el municipio Baruta, Estado Miranda. Una opción para la diversificación de la matriz energética

Bárbara Loreto—Venezuela (pp. 65-76)

Análisis multicriterio y predicción con Machine Learning para determinar blancos de exploración de pórfidos cupríferos, en la franja Paleoceno-Oligoceno, región de Antofagasta, Chile

Hugo Neira—Chile (pp. 77-98)

Evaluación de la distribución de hurtos a personas para la ciudad de Santiago de Cali, 2015 – 2019

Ana María Vélez—Colombia (pp. 99-117)

Artículos Didácticos

¿Cómo clasificar imágenes satelitales con ENVI?

HelpGIS— Perú (pp. 119-124)

Proyecciones Mercator y UTM: características y uso

Gabriel Moraga— Chile (pp. 125-130)

Cartógrafo Noticias

Inteligencia de ubicación y por qué su empresa debería adoptarla en el 2021

Aspectum y Geodevlab XY— México (pp. 132-133)

¿Qué diferencia existe entre las aeronaves no tripuladas denominadas como UAV, Drones o RPA?

GeoGlobalty — Chile (p. 134)

Inteligencia Artificial en el proceso cartográfico con Ipsilum

SRM Consulting — España (pp. 135-136)

Conociendo los GIS Líder del Mercado

QGIS— Chile (pp. 137-138)

El Centro Argentino de Cartografía

Laura Pietrangelo y Jorge Horacio Machuca — Argentina (pp. 139-141)



EDITORIAL

[Cartógrafo.CL](#) nace como muchos proyectos, primero como una idea, luego como un concepto que, si la suerte acompaña, se convierte en una realidad. Como todo proyecto fue decantando con el correr del tiempo, en el 2013 comenzó como un aula virtual de apoyo a la docencia, hasta llegar a la revista digital, técnico-profesional de las Geociencias que, con mucho orgullo, estamos presentando en esta oportunidad.

Desde la primera idea de la revista digital, no ha corrido demasiado tiempo; sin embargo, si ha habido una cantidad inconmensurable de esfuerzos, sacrificios, aprendizajes y satisfacciones; sobre todo considerando que el equipo de trabajo estaba reducido a la mínima expresión. La motivación principal para no abandonar este proyecto fue precisamente nuestro amor por las Geociencias, y el creciente interés de hacer algo más allá de las capacidades profesionales, de manera de perdurar en el tiempo y de servir de tribuna para todos los que tenemos en común el amor por nuestro planeta Tierra.

Estamos conscientes de que somos una revista no arbitrada y que no somos la voz oficial de la academia, sin embargo, nuestros documentos demuestran el profesionalismo de los autores que confiaron en nosotros y, asimismo, de los que participamos en revisión y edición de cada uno de los artículos de [Cartógrafo.CL](#).

El principal objetivo de [Cartógrafo.CL](#) es llegar a las “inmensas minorías”, a los alumnos de pregrado, estudiantes de posgrado, profesionales jóvenes y también los no tanto, en general, todo aquel que quiera contribuir con su granito de arena a este mundo fascinante de las geociencias.

Un tema para destacar es el grado de aceptación del proyecto [Cartógrafo.CL](#) en el mundo de los profesionales de las Geociencias, donde desde un inicio se recibieron múltiples muestras de apoyo y ofrecimientos espontáneos de colaboración. Profesionales y amigos de Chile, de América, del mundo y alrededores han participado en este proyecto, ya sea con un comentario, con un consejo, material para publicidad, con noticias, con artículos, etc. Para todos ello nuestros más sinceros agradecimientos, ya que sin sus aportes este primer número no habría podido ver la luz.

Mucho material quedó en nuestras bases de datos, para afianzar un sólido segundo número, pero ese es otro tema, por lo pronto los invito a disfrutar de este primer número de [Cartógrafo.CL](#) del cual todos formamos parte. También los invito participar enviándonos sus comentarios y sugerencias directamente en nuestra página web, ello nos permitirá corregir los errores de este primer número y ser cada día mejores.

Saludos desde Valparaíso de Chile,

GABRIEL MORAGA GORMAZ

Cartógrafo y Magíster en Geomática

Director de [Cartógrafo.CL](#)





Amigos de Cartógrafo.CL

<https://qgischile.cl/>

QGIS
Software Open Source

Sustaining Membership
2014-2021

https://qgis.org/en/site/about/sustaining_members.html#qgis-sustaining-members



Es un Organismo Técnico de Capacitación OTEC, Certificado con NCh 2728:2015 y acreditado ante SENCE.

Desde el año 2014 es miembro sustentador del proyecto QGIS.ORG

Cursos según niveles en Aula Virtual <https://aulavirtual.eprime.cl/>
Número de Horas Asincrónicas desde 50 a 74 hrs.



www.qgischile.cl

<https://ingeagis-cl.webnode.es/>

INGEAGIS
AMBIENTE Y GEOMÁTICA

Cotiza con nosotros
contactoingeagis@gmail.com
9 9332 6025

<https://serviciosgeomaticos.cl/>



Servicios

- Topografía LiDAR
- Topografía Clásica
- Drones + LiDAR
- Escaner Terrestre
- LiDAR + SLAM
- Espectrometría
- Monitoreo de Líneas de Transmisión
- Cartografía Satelital
- SIG - Web Mapping
- Catastros con cámaras 360°
- Desarrollo de Sistemas Geomáticos
- Acompañamiento BIM

Productos

- Software K-MINE
- Software VISIONLiDAR
- Sistemas G-LiDAR multipropósito
- Instrumentación para equipos de perforación



www.serviciosgeomaticos.cl meridian@serviciosgeomaticos.cl

<https://www.raster4.com/>

RASTER
CAPTURA ANALIZA DECIDE



Cartógrafo.CL/01-2021



Diego Alarcón Díaz

Ingeniero de Ejecución
en Geomensura.
Candidato EAGLE
Master (Applied
Remote Sensing Courses
for the Environment).
Universidad de
Würzburg

Alemania



diego.alarcondiaz@gmail.com

Análisis de la disminución del cuerpo de agua de la laguna de Aculeo utilizando imágenes de radar de Sentinel-1A/1B y del Global Surface Water Explorer

RESUMEN

La laguna de Aculeo está ubicada en la comuna de Paine, en la Región Metropolitana de Chile. A partir del año 2010, el nivel de su cuerpo de agua experimentó uno de los mayores cambios evidenciados en el país y que, en el 2018, dejó la laguna completamente seca. Este documento intenta mostrar los cambios en este cuerpo de agua, mediante los productos de nivel 1 Single Look Complex (SLC), de Sentinel-1A y 1B, y los datos de la Comisión Europea del Global Surface Water Explorer. Los datos obtenidos de Sentinel-1 corresponden al período comprendido entre abril de 2017 a abril de 2018. Estos capturaron el último período donde se observó agua en la laguna.

El proceso de datos se realizó con el software SNAP, que permitió la visualización y creación de imágenes de radar coherentes y mostró la etapa final de la cuenca. Las imágenes fueron procesadas mediante un script creado en R para este fin, el que se utilizó para ajustarlas, calcular el cuerpo de agua de cada imagen y generar un gráfico para observar la disminución en el área de la laguna, en una curva modelada a partir de la información de Sentinel-1. La información anual del Global Surface Water Explorer permitió observar la disminución desde el 2010. Se adicionó un cuerpo estacional de agua, para mostrar la cantidad de lluvia que aumenta o disminuye con los años, que proporciona otro parámetro para incluir en posteriores estudios detallados de la zona. Con Sentinel-1 y Global Surface Water, fue posible comparar la información generada y entregar una primera visión para analizar lo que está sucediendo en la laguna.

INTRODUCCIÓN

El satélite Sentinel-1 tiene la capacidad de obtener imágenes de la Tierra en alta resolución, que permite estudiar determinadas zonas con resolución temporal continua, independiente del clima. Además, es posible detectar cuerpos de agua debido a la huella de retrodispersión de señales acústicas (*backscatter*), particularidad que posee el agua al reflejar la onda del radar (doble rebote). Los humedales, tal como se definen en la Convención de Ramsar, incluyen todos los lagos y ríos, pantanos y marismas, pastizales húmedos, turberas, oasis, estuarios, deltas y bajos de marea, manglares y otras zonas costeras, arrecifes de coral y todos los sitios artificiales como estanques piscícolas, arrozales, embalses y salinas, entre otros (ESA Sentinel, 2020).

La disminución de los volúmenes de los cuerpos de agua está geográficamente más concentrada que aquellos que presentan ganancia (Pekel *et al.*, 2016). Más del 70% de la pérdida permanente neta mundial de agua se produjo en Oriente Medio y Asia Central, vinculada a sequías y acciones humanas, incluidos la desviación de ríos, represas y modificación de cursos no regulados (Pekel *et al.*, 2016).

La laguna de Aculeo ha sido uno de los cuerpos de agua más importantes de la Región Metropolitana de Chile. A lo largo de los años, su volumen de agua ha tenido una disminución sostenida entre el 2010 al 2018. Al observar los datos obtenidos para analizar el comportamiento del volumen de agua de la laguna de Aculeo en este tiempo, es posible observar que su agotamiento fue persistente y acelerado entre 2010 a 2015; esto debido a la sequía que afectaba a la zona central de Chile y a las actividades humanas que se desarrollaban en el área (Alaniz *et al.*, 2019). El análisis se realizó con técnicas de teledetección, beneficiando directamente a la población local de la laguna. La sequía tiene un impacto significativo y medible en sus habitantes, no solo turístico sino que también agrícola (The Straits Times, march 20, 2019), debido a las economías locales que dependen de ella.

Los datos obtenidos del satélite Sentinel-1, correspondientes a muestras de nivel 1 Single Look Complex (SLC), fueron procesados con [Sentinel Application Platform \(SNAP\)](https://www.ramsar.org) y muestreados a una resolución de 30 metros, para asimilarlos a una resolución más baja del Global Surface Water Explorer, necesario para este estudio.

<https://www.ramsar.org>

La superficie global de las aguas ha sido obtenida de imágenes satelitales con resoluciones espaciales gruesas (Prigent *et al.*, 2012). Los datos utilizados en este estudio complementan lo anterior mediante el uso de imágenes Landsat 5, 7 y 8 ortorrectificadas y multitemporales, que abarcan los últimos 18 años, de modo de poder cartografiar la variabilidad espacial y temporal de las aguas superficiales en Chile y sus cambios a lo largo del tiempo (Pekel *et al.*, 2016).

Por último, se creó un script en lenguaje R para calcular el área del cuerpo de agua cada mes del año en ambos tipos de datos, y ejecutar una comparación por análisis, de manera de comprobar si tanto la curva de datos de Sentinel-1 como los datos de Global Surface Water Explorer eran semejantes. Lo anterior, proporcionó una visión preliminar respecto de que si la sequía actual era natural (p. ej., curva fenológica) o bien por actividades humanas (p. ej., plantaciones), manifestándose en diferentes tendencias o curvaturas (Zhoua *et al.*, 2015), pero con comportamiento y tendencias asociadas a una determinada función.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se explican los materiales y métodos que se han utilizado para detectar los cambios en la laguna de Aculeo, y el orden de los procesos elaborados, utilizando datos libres y software, para el análisis temporal que represente de forma clara la información relacionada con el cuerpo de agua de la laguna.

Materiales

En primer lugar, desde la Comisión Europea del Global Surface Water Explorer se obtuvieron los datos de aguas superficiales de Chile, a partir de los cuales se creó un script en R y se modeló un gráfico para visualizar los años en que inician los efectos de la sequía

Se utilizó un conjunto de 23 imágenes Sentinel-1 del Centro de Datos Científicos de la European Spatial Agency (ESA), las que fueron capturadas entre abril de 2017 a abril de 2018. Estas representan el último período de aguas superficiales en la laguna de Aculeo (Tabla 1).

Tabla 1. Datos Sentinel utilizados

Scenes	Scenes
S1A IW SLC 1SDV 20170429T232727 20170429T232755 016365 01B172 A957	S1B IW SLC 1SDV 20171219T232659 20171219T232726 008794 00FA86 427F
S1B IW SLC 1SDV 20170728T232658 20170728T232725 006694 00BC69 4874	S1B IW SLC 1SDV 20171231T232659 20171231T232726 008969 010025 AECD
S1B IW SLC 1SDV 20170809T232659 20170809T232726 006869 00C17A 9250	S1B IW SLC 1SDV 20180205T232658 20180205T232725 009494 011150 ECF8
S1B IW SLC 1SDV 20170821T232659 20170821T232726 007044 00C690 C1C1	S1B IW SLC 1SDV 20180217T232658 20180217T232725 009669 011711 0BA6
S1B IW SLC 1SDV 20170914T232700 20170914T232727 007394 00D0C6 B021	S1B IW SLC 1SDV 20180301T232658 20180301T232725 009844 011CDC 480A
S1B IW SLC 1SDV 20170926T232700 20170926T232727 007569 00D5D2 635C	S1B IW SLC 1SDV 20180313T232658 20180313T232725 010019 0122B3 BEE2
S1B IW SLC 1SDV 20171008T232701 20171008T232728 007744 00DAD8 C6C8	S1B IW SLC 1SDV 20180325T232658 20180325T232725 010194 012862 1C35
S1B IW SLC 1SDV 20171020T232701 20171020T232728 007919 00DFD2 6797	S1B IW SLC 1SDV 20180406T232658 20180406T232725 010369 012E16 9D29
S1B IW SLC 1SDV 20171101T232701 20171101T232728 008094 00E4D8 46E3	S1B IW SLC 1SDV 20180418T232658 20180418T232725 010544 0133AA B289
S1B IW SLC 1SDV 20171113T232701 20171113T232727 008269 00EA0C C24A	S1B IW SLC 1SDV 20180430T232659 20180430T232726 010719 013946 14FC
S1B IW SLC 1SDV 20171125T232700 20171125T232727 008444 00EF5F E8B2	S1B IW SLC 1SSV 20170505T232709 20170505T232736 005469 00995F E21F
S1B IW SLC 1SDV 20171207T232700 20171207T232727 008619 00F4ED 8355	

Las imágenes Sentinel-1 se obtuvieron del Alaska Satellite Facility (ASF) y se descargaron utilizando el software libre Aria2.

<https://asf.alaska.edu>

El modo Swath usado para este estudio es la franja ancha interferométrica, que consiste en datos SAR (Synthetic Aperture Radar) centrados, que utilizan el ancho de banda completo de la señal C y preservan la información de la fase. Además, de acuerdo con Muro *et al.* (2016) se utilizan dobles imágenes polarimétricas (VV-VH), que permitan el cálculo de las propiedades de polarización del terreno, además del *Backscatter* que podría definirse a partir de una sola polarización.

Las imágenes raw (sin procesar) se pre-procesaron en SNAP.

<https://aria2.github.io>

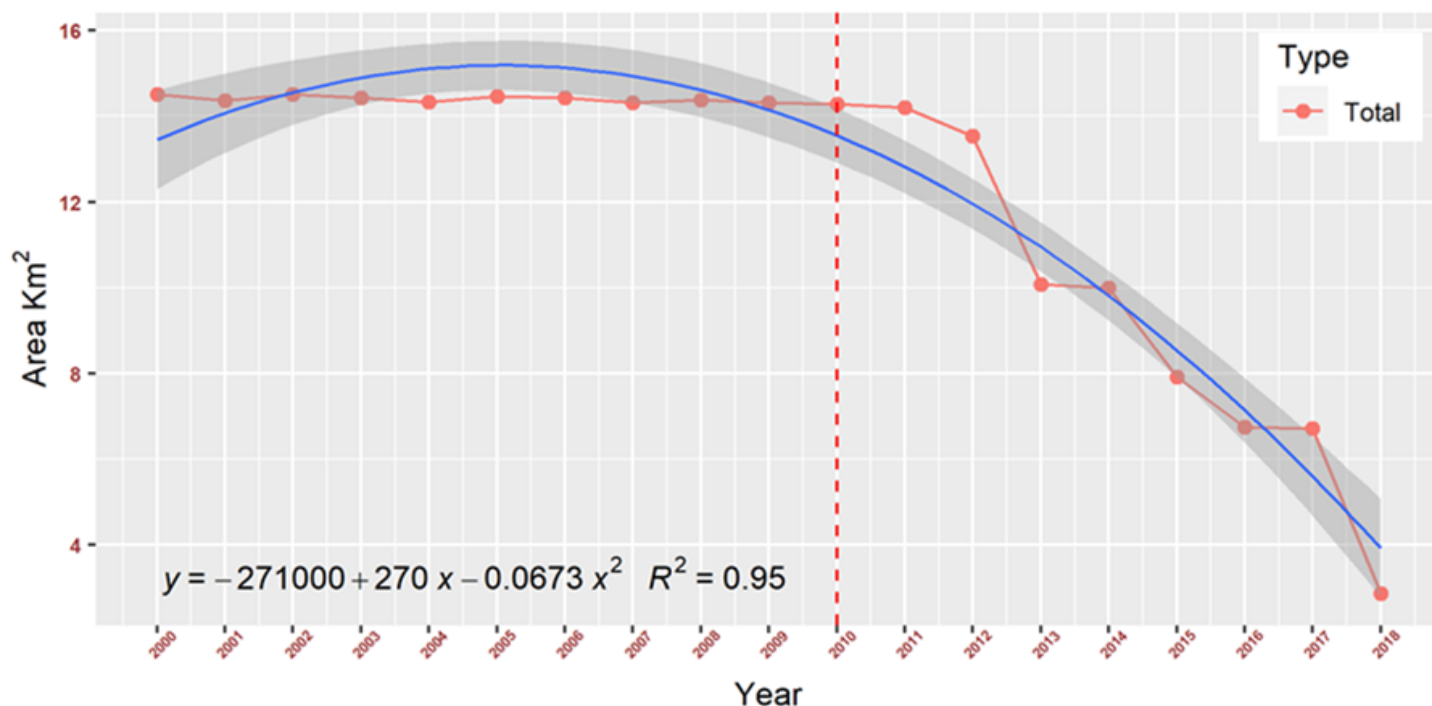
Métodos

Se deben obtener las imágenes Sentinel-1 pre-procesadas, mediante SNAP; luego es necesario exportar dichas imágenes en un formato .TIFF; finalmente, las imágenes son analizadas mediante un algoritmo programado en "R", donde se evalúa el número de píxeles de la región de interés exportado desde SNAP de la laguna de Aculeo. Los umbrales de los píxeles clasificados se obtuvieron al analizar el histograma de las imágenes de coherencia en SNAP.

Al final, utilizando el script programado en R, se crea un gráfico donde es posible observar la disminución progresiva, hasta la desaparición de la laguna de Aculeo.

RESULTADOS

A partir de los datos de la Comisión Europea del GSW (Global Surface Water) para las aguas superficiales de Chile, y el script programado en R, se pudieron observar que los años críticos fueron 2017 y 2018. Desde ese momento se decide que los datos a utilizar deben ser de series temporales desde abril de 2017 hasta abril de 2018, que fue el último mes en el que se pudo observar la laguna con agua (Figura 1).



Pasos seguidos en SNAP para pre-procesar las imágenes Sentinel-1, utilizando Graph Builder (Figura 2):

- **Chequeo:** Se verificaron todas las imágenes obtenidas y se comprobó si el proceso de descarga fue realizado correctamente.
- **Aplicación de archivo de órbita:** Los datos de la órbita son necesarios para mejorar la calidad de la geocodificación, además de otros resultados de procesamiento SAR.
- **Aplicación del operador TOPSAR-SPLIT:** Que permite seleccionar las subfranjas donde se encuentra el área de estudio o de interés.
- **Calibración:** Etapa que permite disponer de imágenes en las que los valores de píxeles deben estar directamente relacionados con el *backscatter* de la imagen. En el presente estudio se utilizó la corrección radiométrica Gamma0, considerando la ondulación del terreno y la situación geográfica específica del área de estudio. Durante la calibración fue necesario guardar el proyecto de salida en un formato complejo, para generar la matriz polarimétrica.
- **Aplicación del operador TOPSAR-DEBURST:** Que permite afinar la polarización a utilizar, considerando que se desea detectar y analizar un cuerpo de agua, se seleccionó la polarización VV, con la cual se obtiene una señal más clara del rebote.

Figura 1. Gráfico de series temporales de los datos GSW de la laguna de Aculeo desde 2000 hasta 2018, este año fue el último en que fue posible ver agua en la laguna.
Fuente: EC JCR/ Google.



- **Ajuste de Herramienta Multilook:** En su menú es posible ajustar tanto la resolución como el tamaño del píxel.
- **Aplicación de filtro SPECKLE:** Las imágenes SAR se ven afectadas por interferencias o “ruidos” de alta frecuencia, por lo que es necesario aplicar este filtro para obtener una imagen más clara para su análisis. Más información del Filtro SPECKLE en:-----
- **Corrección de ondulación del terreno:** Debido a que el área de estudio se encuentra en un lugar geográfico rodeado de montañas y con marcadas diferencias de altura. Se utilizó un SRTM de 3 segundos.
- **Corrección del terreno:** Corrección de las distorsiones geométricas que pueden conducir a errores de geolocalización. La corrección del terreno desplaza los píxeles de la imagen a la relación espacial correcta entre ellos. Además, en esta parte del proceso se debe tener en cuenta el tamaño de píxel del cuerpo de agua superficial global, de modo de poder hacer una comparación entre ambos y seguir utilizando la misma escala en todo el estudio.

https://earth.esa.int/documents/653194/656796/Speckle_Filtering.pdf.

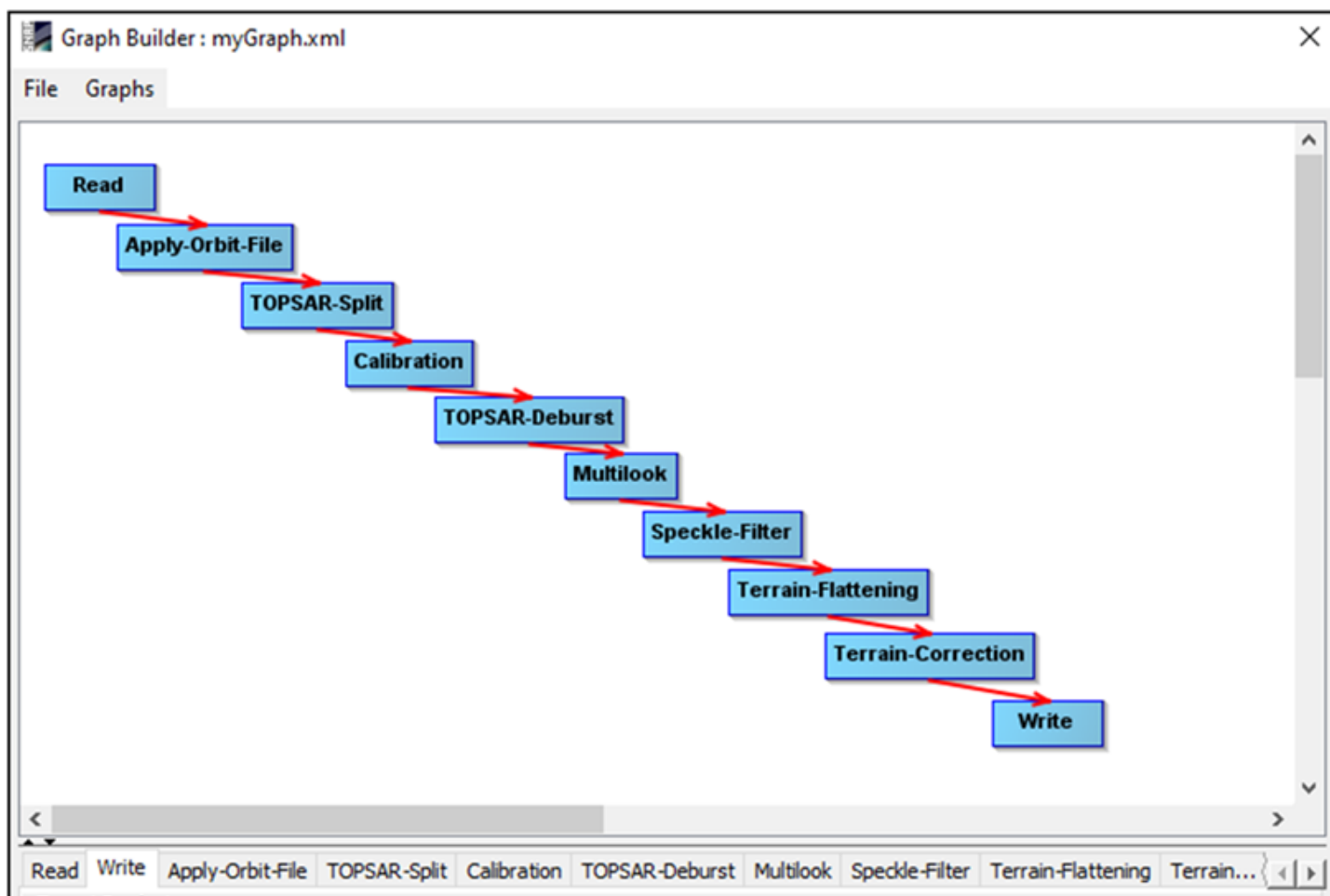
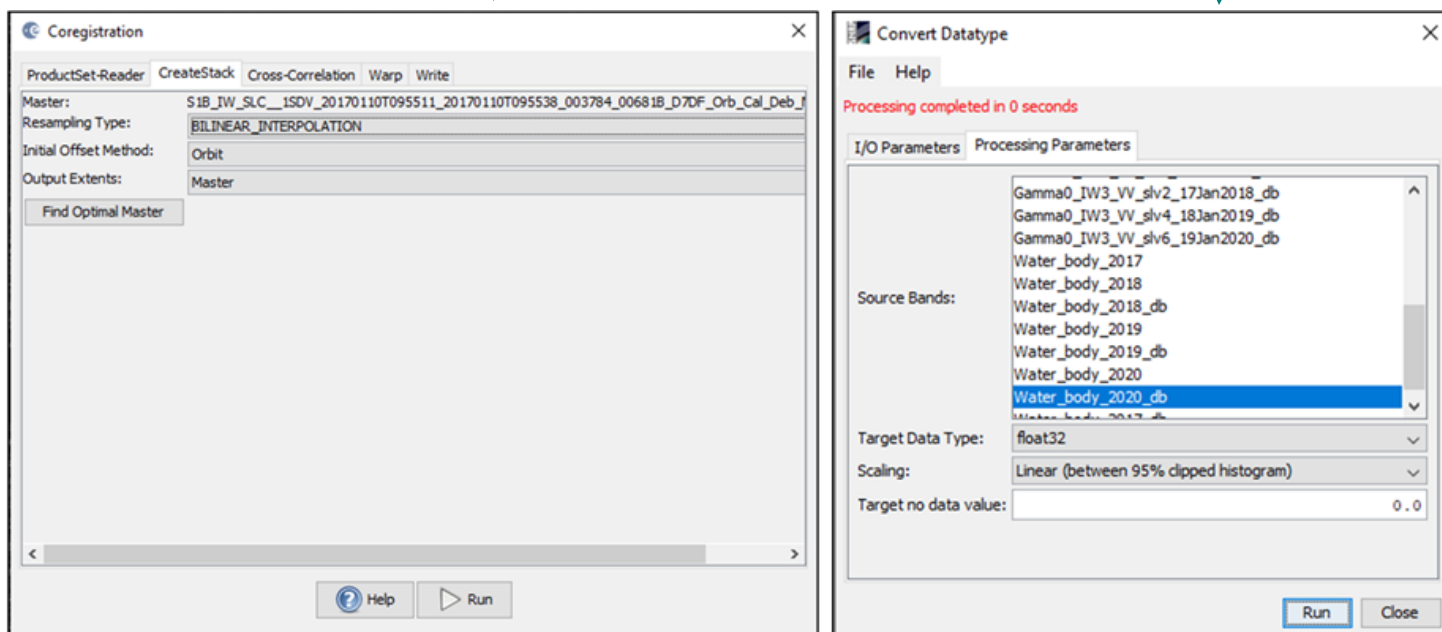


Figura 2. “Graph Builder” en SNAP con el preproceso realizado para cada imagen.

En el procesamiento de las imágenes Sentinel-1 se ejecutaron los siguientes pasos directamente en SNAP, específicamente en el módulo "Coregistration" (Figura 3):

- Se creó el directorio por lotes (batch directory): En una nueva carpeta se guardaron las imágenes procesadas por lotes.
- Se generó un procesamiento por lotes. (batch processing): "Add opened", luego "load graph", y se seleccionó el gráfico guardado. En el "directory" se ubica el directorio por lotes recién creado, "batch directory", y se ejecuta el proceso.
- Creación de Pila: Se cerraron todas las imágenes y se reabrieron las imágenes procesadas por lotes localizadas en la carpeta por lotes. A continuación, en la pestaña "radar/coregistration/stack tools/create stack", en su interior, se seleccionó "add opened".
- En la pestaña "CreateStack", se seleccionaron los siguientes parámetros:



Una forma de asegurar la legibilidad de los datos y la existencia de la información de dispersión del agua debería ser posible generar una composición RGB (Figura 4). Se utilizó información del 10 de enero de 2017, lo que mejoró el color negro del cuerpo de agua (doble rebote) mediante la aplicación de la escala de decibelios (db), aumentando la información de manera logarítmica:

- Rojo: VV en db.
- Verde: VH en db.
- Azul: VV en db.

Figura 3. "CreateStack" y "Convert Datatype" en SNAP, pasos importantes en la etapa de "Coregistration"

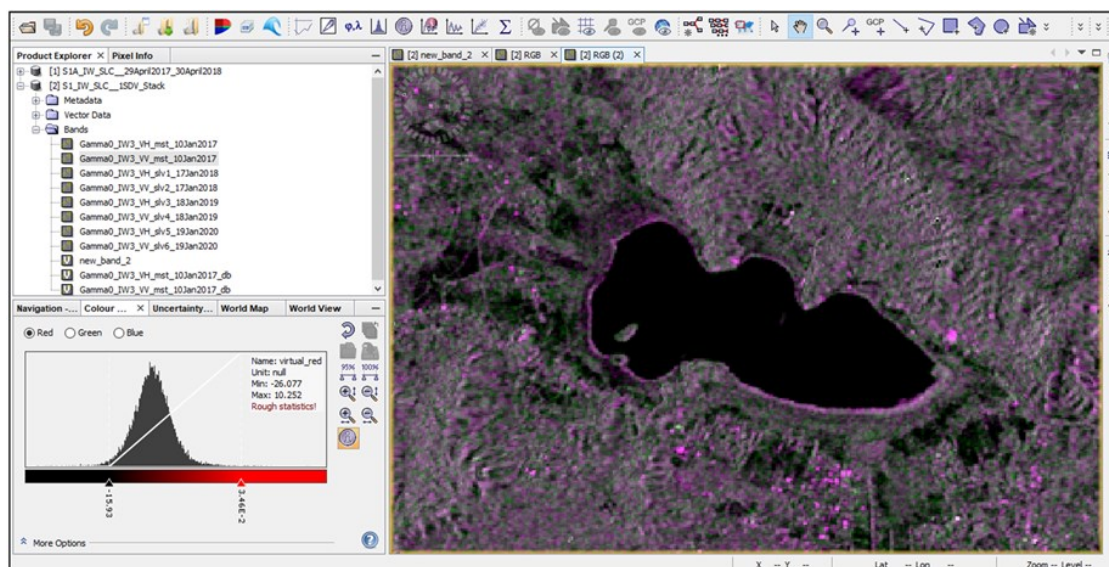


Figura 4. Composición RGB generada en SNAP a partir de imagen satelital capturada el 10 de enero de 2010, utilizando escala de decibelios para mejorar la imagen.

En SNAP se observa, en la ventana principal en el sector inferior izquierdo, un pequeño histograma (Figura 5), donde es posible cambiar los umbrales de los datos, y de esta manera mejorar los colores que representan diferentes características del agua.

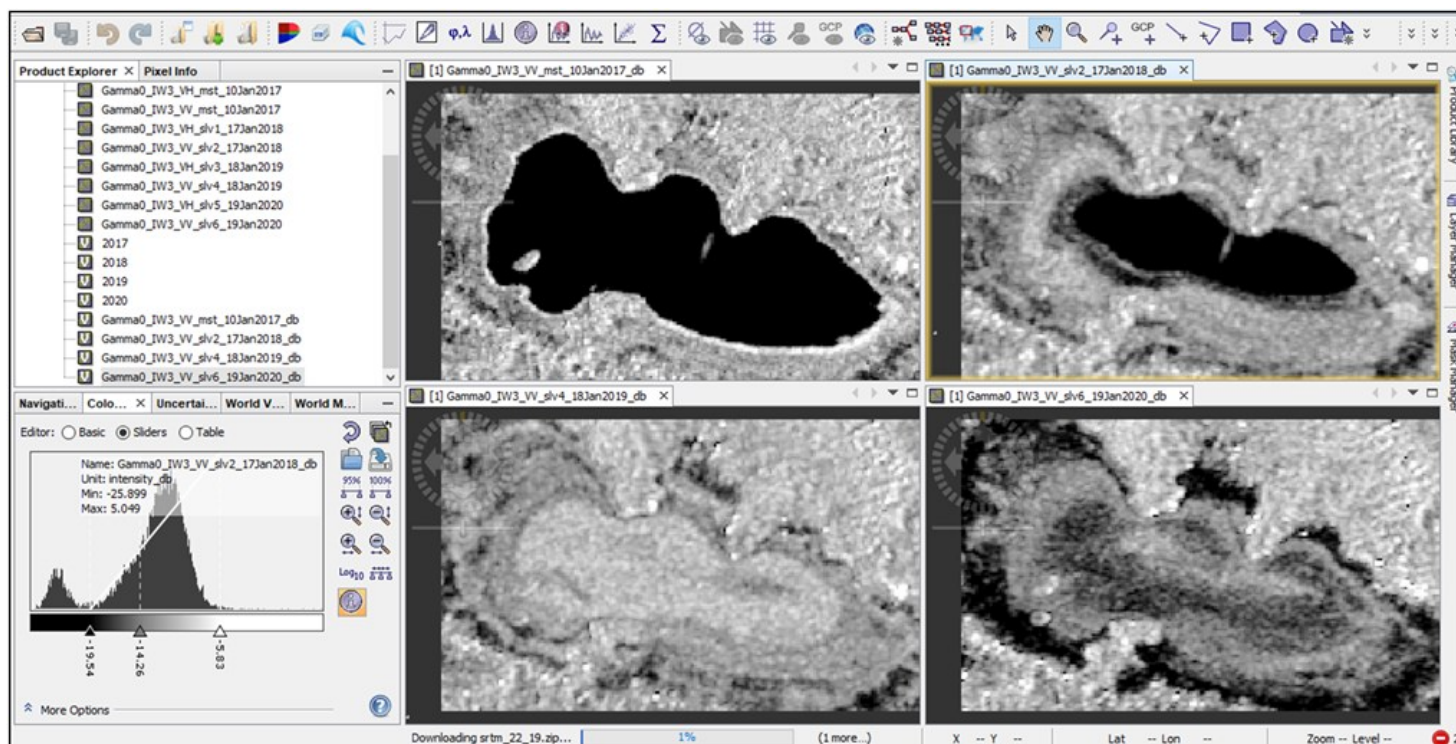


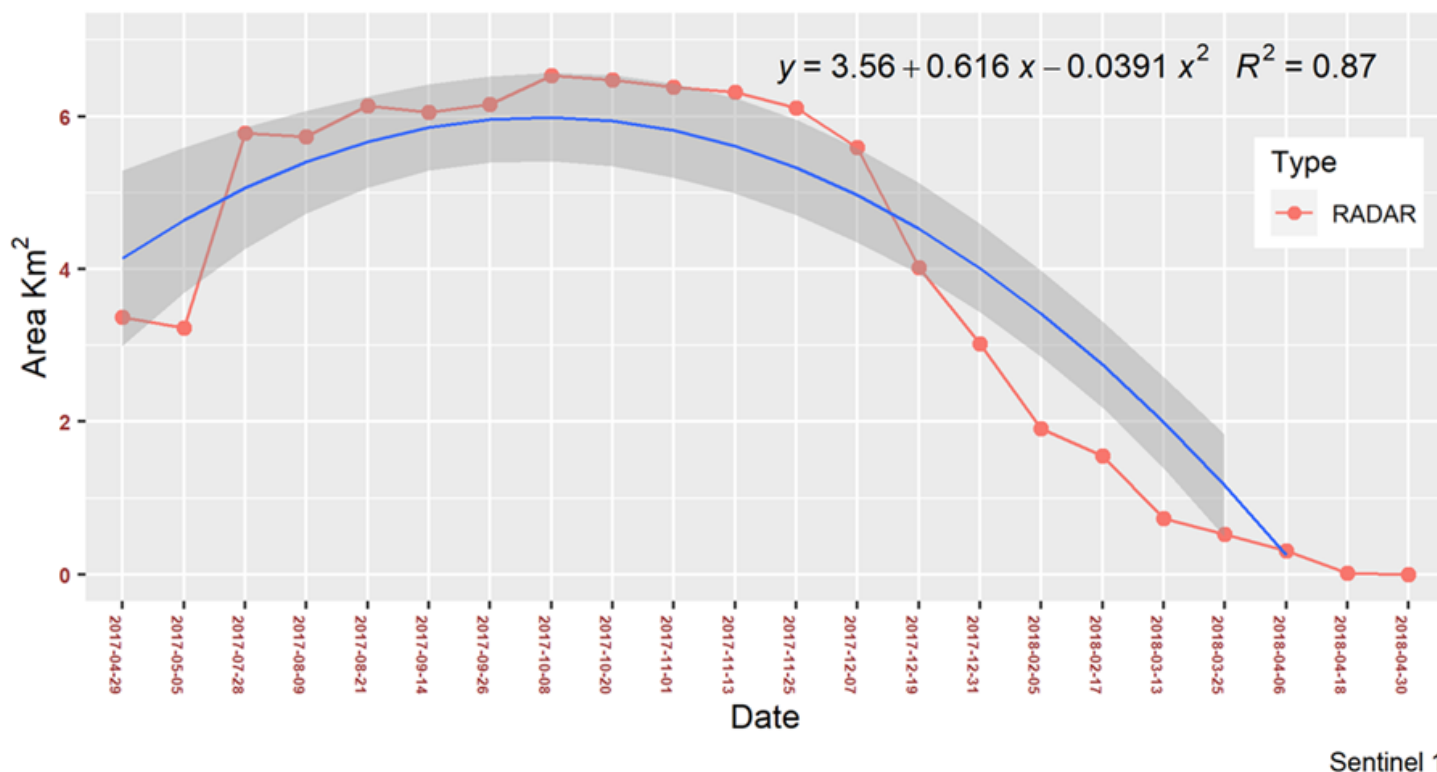
Figura 5. Cuatro diferentes imágenes que representan diferentes umbrales, desde “menos infinito” hasta -18 representa “presencia de agua”; y desde -18 hasta “más infinito” representa “ausencia de agua”.

Luego de analizar todas las imágenes mejoradas por la escala de decibelios, fue posible notar que los umbrales para este estudio específico son:

De “menos infinito” a -18 corresponde a presencia de agua

De -18 a “más infinito” corresponde a ausencia de agua

Teniendo en cuenta estos umbrales fue posible reclasificar las imágenes en R, de modo de obtener los resultados correctos desde los datos sentinel-1, utilizando el algoritmo confeccionado para este propósito. Luego, se calculó la superficie del cuerpo del agua para cada imagen, y se graficó la información para visualizar la disminución de la superficie del cuerpo de agua (Figura 6).



DEBATE

Para un efectivo ordenamiento territorial y conservación de la biodiversidad, es importante considerar los paisajes como parte de regímenes dinámicos en lugar de simples y estáticas cubiertas (Parrott *et al.*, 2012). El gráfico de la serie de tiempo presentado en la Figura 6 utiliza datos gratuitos y herramientas de código abierto, lo que podría facilitar que los planificadores e investigadores puedan aplicar los métodos propuestos para la laguna de Aculeo en sus propias áreas de estudio.

A partir de la información disponible fue posible visualizar los patrones de cambios espaciales a lo largo del tiempo, y comprender la dinámica de estas variaciones en el cuerpo de agua de la laguna de Aculeo, causadas por el flujo de agua o por actividades humanas (Muro *et al.*, 2016).

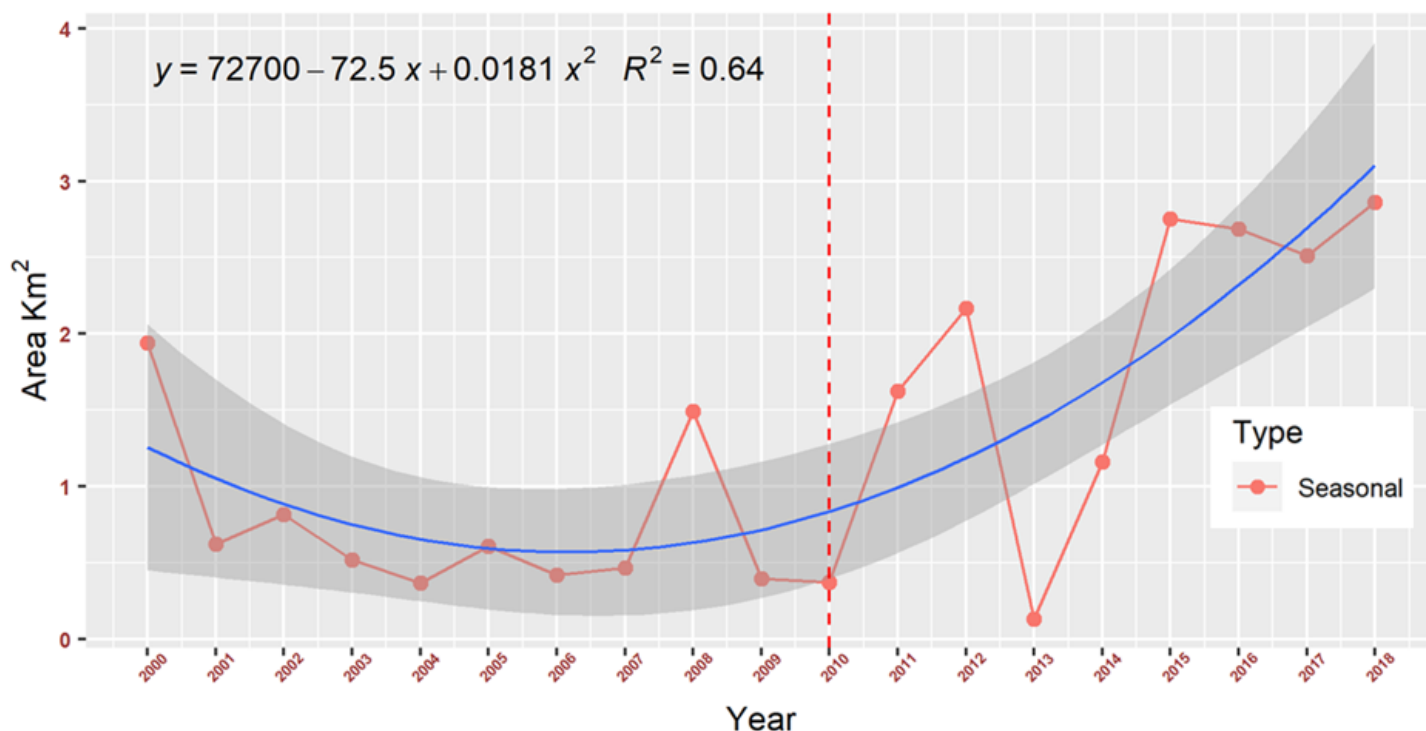
Los datos SAR se reclasificaron a una resolución espacial de 30 metros, con el objeto de poder utilizarlos con los datos de GSW sin necesidad de agregación espacial de imágenes en diferentes resoluciones. Lo anterior, para que el proceso sea eficiente y posibilite la comparación de datos.

El pre-proceso de los datos en SNAP proporciona una buena calidad de las imágenes satelitales, dejándolas pulcras y ordenadas para su análisis.

Figura 6. Gráfico de la laguna de Aculeo entre abril de 2017 y abril de 2018, este fue el último mes en el cual se pudo observar agua en la laguna.

Las imágenes SAR obtenidas a través del SLC de Sentinel son las apropiadas para el estudio, lo que no significa que los datos en formato GRD no puedan ser utilizados en un pre-proceso similar. En una etapa posterior, sería interesante realizar un estudio utilizando datos GRD y compararlos con los resultados obtenidos a través de SLC, para verificar cuál de ellos presenta una mayor precisión en la obtención de datos, o bien proporciona información adicional para entender los factores que podrían afectar el proceso de secado de la laguna de Aculeo.

Además, al observar los datos del GSW se aprecia un comportamiento inusual del agua estacional (Figura 7), esto debe ser analizado en detalle para verificar la existencia de un vínculo directo con el área de estudio.



Por último, este estudio tiene el potencial de aumentar el interés de realizar investigaciones en áreas como la laguna de Aculeo, que se ven afectadas por el cambio climático y por actividad antrópica, pero que rara vez son consideradas como vitales en las áreas académicas.

Se debe tener en cuenta que la limitación del estudio está relacionada con la cantidad de datos disponibles, por lo que el análisis de una serie temporal más larga de la laguna no fue posible debido a la magnitud de los datos, tiempo de procesamiento y limitación de los dispositivos utilizados. Por lo tanto, la conclusión que se puede obtener se limita al último período de datos y a la actividad humana observada en las imágenes.

CONCLUSIONES

No fue posible vincular el secado de la laguna de Aculeo únicamente con la intervención antrópica, ya que esta actividad continúa aumentando en los últimos años. Por lo tanto, es necesario hacer un estudio climático del área de estudio; por ejemplo, temperatura, NDVI, entre otras informaciones. Esto permitirá realizar un análisis más exhaustivo y aportar posibles cursos de acción para que la población local pueda aplicar y eventualmente solucionar la problemática de la laguna de Aculeo; la que no solo es importante como un hito para el lugar, sino también para la agricultura y el turismo en la zona.

Figura 7. Gráfico del comportamiento del agua estacional en la laguna de Aculeo, desde 2000 a 2018.

Fuente: EC JRC/Google.

REFERENCIAS

1. Alaniz, A., M. Carvajal, I. Núñez-Hidalgo, & P. Vergara (2019). Chronicle of an Environmental Disaster: Aculeo Lake, the Collapse of the Largest Natural Freshwater Ecosystem in Central Chile. *Environmental Conservation*, 46 (3), 201-204. <https://n9.cl/n13x8>
2. Béchet, A.; C. Germain, A. Sandoz, G.J.M Hirons, R. E. Verde, J. G. Walmsley, & A. R. Johnson (2009). Assessment of the impacts of hydrological fluctuations and salt pans abandonment on Greater flamingos in the Camargue, South of France. *Biodivers. Conserv.* 18, 1575–1588. <https://1bestlinks.net/vkdQC>
3. ESA Sentinel (2020, March 19) Sentinel-1 lends a hand in Poland's wetlands. <https://n9.cl/rsxwo>
4. Muro, J., M. Canty, K. Conradsen, C. Hüttich, A.A. Nielsen, H. Skriver, F. Remy, A. Strauch, F. Thonfeld, G. Menz (2016). Short-Term Change Detection in Wetlands Using Sentinel-1 Time Series. *Remote Sens.* 8, 795. <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/10/795>
5. Parrott, L. (2012). Future landscapes: Managing within complexity. *Front. Ecol. Environ.* 10, 382–389. <https://n9.cl/xom15>
6. Pekel, J. F., A. Cottam, N. Gorelick, & A. S. Belward (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 540, 418-422. <https://www.nature.com/articles/nature20584>
7. Prigent, C., F. Papa, F. Aires, C. Jiménez, W.B. Rossow, & E. Matthews (2012). Changes in land surface water dynamics since the 1990s and relation to population pressure. *Geofísica. Res. Lett.* 39, L08403. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/journal/19448007>
8. The Straits Times (March 20, 2019). "Drought wipes Chile's popular Lake Aculeo from the map ". Recuperado de <https://www.straitstimes.com/>
9. Zhoua, S., Y. Huang, B. Yu, & G. Wanga (2015). Effects of human activities on the eco-environment in the middle Heihe River Basin based on an extended environmental Kuznets curve model. *Ecological Engineering*, 76, 14-26. <https://1bestlinks.net/9PZWP>

Diego Alarcón Díaz

Ingeniero de Ejecución en Geomensura (Universidad de Santiago de Chile), con 9 años de experiencia en el área de sistemas de información geográfica y amplios conocimientos en manejo de software, creación de scripts, gestión de equipos y proyectos aplicados a la cartografía digital.

Se ha desempeñado en el área pública, trabajando en la Municipalidad de Providencia. También, en el área privada, tanto en empresas internacionales (Here Maps) como nacionales (Aguas Andinas). En todas, ligado al área de los sistemas de información geográfica.

Se encuentra estudiando el Master EAGLE en Würzburg, Alemania, en teledetección y realizando prácticas en instituciones prestigiosas como DLR y dentro de Würzburg Universität.

Se sugiere citar:

Alarcón Díaz, D. (2021). Análisis de la disminución del cuerpo de agua de la laguna de Aculeo utilizando imágenes de radar de Sentinel-1A/1B y del Global Surface Water Explorer. *Revista Cartógrafo.CL* 1(1), pp. 5-14.



Bajo Licencia Creative Commons
Atribución 4.0 Internacional.



Cartógrafo.CL/01-2021



**Gilberto Daniel Hermosillo
Camacho**

Ingeniero Topográfico
Máster en Geotecnologías
Cartográficas en Ingeniería y
Arquitectura

México



gildan71@hotmail.com

daniel.hermosillo@cfe.gob.mx

Tecnología radar satelital InSAR para la detección y monitorización de la deformación de la superficie terrestre por procesos geodinámicos y/o actividades antrópicas

RESUMEN

Esta investigación se centra en la aplicación de la técnica de interferometría, es decir, la utilización de datos de radar de apertura sintética transportados espacialmente, para identificar y evaluar la magnitud de la deformación sobre la superficie ocasionada por eventos naturales y/o actividades antrópicas.

El primer caso de estudio se localiza a 2 km al noreste de Crucecita, Oaxaca. En este lugar, el 23 de junio del 2020, un sismo de magnitud 7.4 ocasionó que la superficie sufriera un levantamiento de hasta 42 centímetros en el punto más cercano al epicentro, en dirección a la línea de visión del satélite (LOS). Este movimiento produjo daños en la infraestructura de las localidades cercanas y pérdida de vidas humanas. Se utilizó la técnica de Interferometría Diferencial (DInSAR) con datos del satélite Sentinel-1, obteniendo las franjas interferométricas características de la deformación causada por sismos, así como su magnitud en centímetros.

El segundo caso de estudio se localiza en el campo geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, a 30 km al sureste de Mexicali. Utilizando la técnica Persistent Scatterer Interferometry (PSI), para el análisis de series de tiempo, y mediante el procesamiento de paquetes de múltiples imágenes adquiridas en fechas distintas, se identificó una zona de subsidencia con dirección noreste que se asocia a la extracción de agua y vapor, con lo cual se logró determinar un rango de entre 9 a 10 centímetros de subsidencia acumulada por año.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha visto impulsada la tecnología geodésica debido a un gran número de desarrollos en el ámbito espacial. El mejoramiento de la tecnología de satélites artificiales ha significado un gran avance y proporciona ventajas inigualables en el estudio de la atmósfera y superficie terrestre a gran escala. La llegada de los sensores ópticos transportados espacialmente sobre satélites artificiales detonó la generación de conocimiento de la dinámica de la atmósfera, así como de la superficie, principalmente en el sector medioambiental y oceánico; ya que permitió realizar observaciones sobre amplias extensiones de terreno a un relativo bajo costo y, en conjunto con el desarrollo de la tecnología de posicionamiento global (GNSS) proporcionó las herramientas necesarias para la obtención de datos posicionales ligados a información de origen espectral.

Un segundo desarrollo se dio con la implementación de tecnología de sensores activos como el radar, para la observación, monitorización y mapeo de la dinámica de la superficie asociada a la actividad sísmica-tectónica, el movimiento de los glaciares, inundaciones, deslizamientos de tierra, estudios oceánicos, monitorización de deformación de la superficie por actividades antrópicas como la extracción de agua, petróleo y gas, entre otros. Todos estos fenómenos representan en ocasiones riesgos a la población, por lo cual es de vital importancia su observación, mapeo y monitorización, echando mano de la tecnología de radar satelital, para generar información que contribuya a la comprensión de los fenómenos y a la oportuna toma de decisiones por parte de las autoridades, con el fin de salvaguardar la vida.

En el año 2014, la Agencia Espacial Europea (ESA) desarrolló y puso en órbita el satélite Sentinel-1/A, bajo el programa Copérnico de observación de la Tierra, diseñado para proporcionar información precisa, actualizada y de fácil acceso que permita mejorar la gestión del medio ambiente, comprender y mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad ciudadana. Estos satélites proporcionan un conjunto único de observaciones, comenzando por las imágenes de radar de apertura sintética, capaces de observar la superficie de la Tierra en cualquier condición meteorológica, de día o de noche¹.

La misión Sentinel-1, se compone de dos satélites gemelos (A y B) con una órbita sincrónico solar, casi polar, circular, que operan de día y noche con un sensor de radar de apertura sintética en banda-C, período de revisita de 6, 12 o 24 días (según el sitio), difusión libre y rápida para apoyar a las aplicaciones operativas en las áreas prioritarias de vigilancia marina, vigilancia terrestre y servicios de emergencia².

Interferometría DInSAR aplicada al mapeo de la deformación de la superficie por sismos

La interferometría diferencial DInSAR (por su sigla en inglés de Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar), es una técnica de observación de la Tierra mediante la utilización de sensores activos de radar de apertura sintética, montados sobre satélites, con los que es posible identificar, medir y mapear el movimiento de la superficie y el cálculo de la coherencia relativa, analizando la diferencia en la fase entre dos imágenes con fechas de adquisición distinta.

Una antena de apertura sintética o virtual consiste en un vector de sucesivas y coherentes señales de radar, que son transmitidas y recibidas por una pequeña antena que se mueve a lo largo de un determinado recorrido de vuelo u órbita. El procesamiento de la señal usa las magnitudes y fases de la señal recibida sobre sucesivos pulsos para crear una imagen (Sillerico *et al.*, 2010).

A partir de dicho principio, los datos obtenidos son las distancias entre el satélite y la superficie del terreno, que se calculan mediante la medición de desplazamientos y desfases. La señal se ve afectada por varios parámetros como son la atmósfera, el ruido, la topografía y los movimientos en la superficie. En el caso de movimientos o deformaciones, el cálculo se desarrolla de la siguiente manera: Se tiene un punto P

¹El programa Copérnico.
The European Space Agency.
<https://1bestlinks.net/5v96w>

²Sentinel-1-Missions-Sentinel
Online. ESA - Sentinel-1.
<https://1bestlinks.net/9c6Wi>

sobre la superficie de la Tierra que es observado por un satélite en fechas distintas, si el punto P no tuvo movimiento, las distancias R_s y R_m deberán ser iguales, de haber tenido un movimiento al punto hipotético punto P' , entonces las distancias serán diferentes y la magnitud del movimiento será directamente proporcional a la diferencia en la fase (Sillerico *et al.*, 2010) (Figura 1).

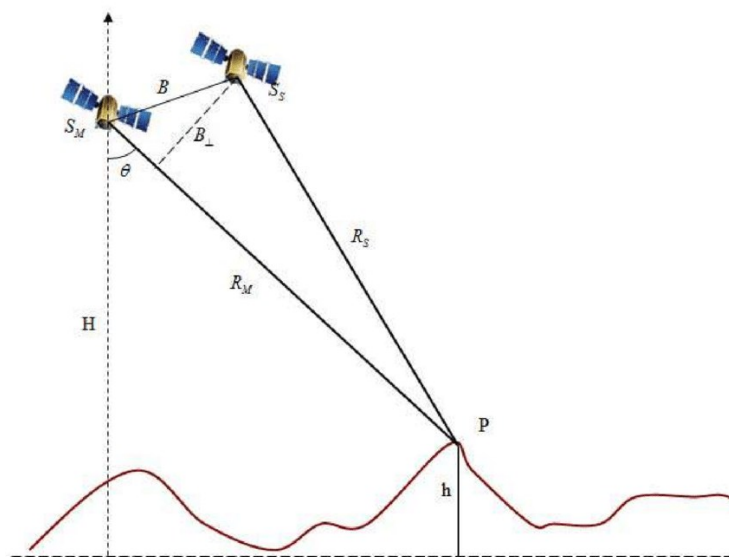


Figura 1. Geometría de adquisición de imágenes SAR (Synthetic Aperture Radar/ Radar de Apertura Sintética).

La fase interferométrica resultante es una contribución de diferentes fuentes que se representa con la ecuación siguiente:

$$\begin{aligned}\phi_{int} &= \phi_s - \phi_m \\ \phi_{int} &= \frac{SP-MP}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \frac{SP'-MP}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \phi_{atm} + \phi_{ruido} \\ \phi_{int} &= \phi_{topo} + \phi_{mov} + \phi_{atm} + \phi_{ruido}\end{aligned}$$

Donde:

ϕ_s y ϕ_m son las fases interferométricas de las imágenes esclava y maestra.

ϕ_{atm} es la componente atmosférica.

ϕ_{ruido} es la componente del ruido.

ϕ_{topo} es la componente topográfica.

ϕ_{mov} es la componente del movimiento o deformación.

SP es la distancia del satélite esclavo al punto P.

MP es la distancia del satélite maestro al punto P.

λ es la longitud de onda del radar.

Cuando un sismo deforma la superficie, la distancia entre el terreno y el satélite será mayor o menor con relación a una imagen que se denomina "Máster", previa al evento. Debido a que la señal del radar es emitida a la superficie con un ángulo de incidencia oblicuo, la deformación será en dirección de la línea de visión del satélite LOS (Line Of Sight) (Meng *et al.*, 2012), como se observa en la Figura 2.

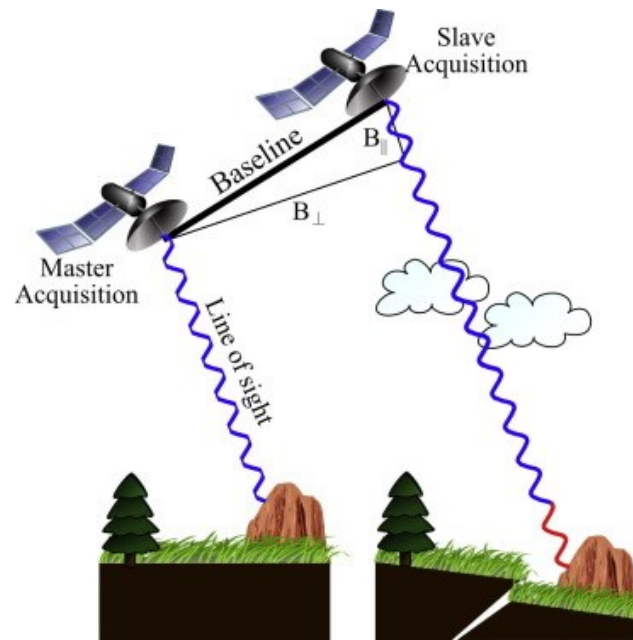


Figura 2. Identificación del movimiento sobre la superficie a través de la medición de la diferencia en la fase entre dos imágenes adquiridas en fechas distintas.

Caso de estudio 1:

Sismo de M 7.4, del 23 de junio del 2020 en Crucecita, Oaxaca

El 23 de junio del 2020 a las 10:29 horas (hora del centro de México), el Servicio Sismológico Nacional reportó un sismo de magnitud 7.4 cercano a la localidad de Crucecita, en la costa del estado mexicano de Oaxaca, con epicentro en las coordenadas Lat. 15.784°, Long. -96.12 y a una profundidad de 22.6 km. La intensidad produjo que se percibiera en los estados de Oaxaca, Guerrero, Chiapas, Michoacán, Jalisco, Querétaro, Morelos, Tabasco, Veracruz, Puebla, Estado de México y en la Ciudad de México (SSN, agosto 2020) (Figura 3).

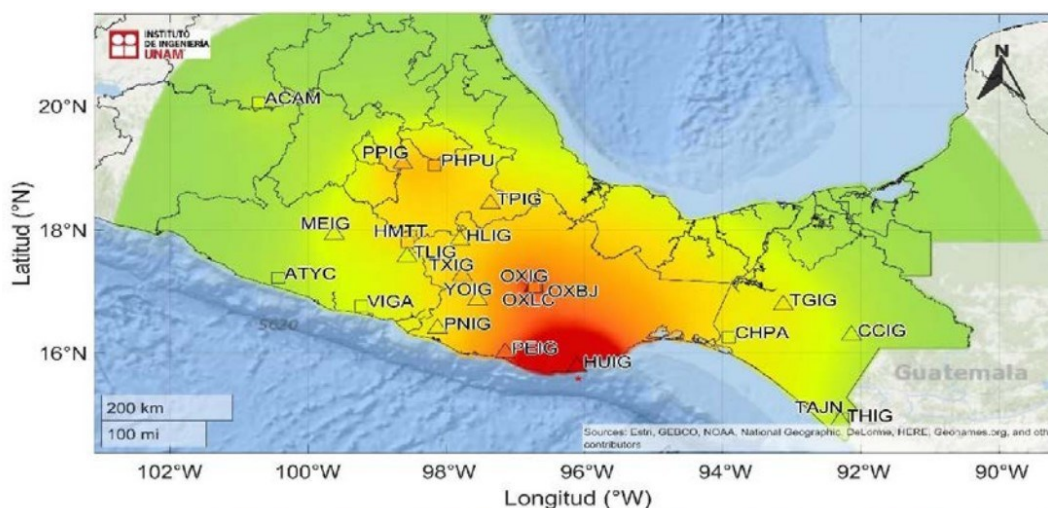


Figura 3. Mapa de intensidades del sismo.

Fuente: Instituto de Ingeniería de la UNAM.

PGA (cm/s ²)	<1	2	4	11	30	90	110	130	>150
Percepción del movimiento	Leve			Moderado			Fuerte		

El origen de la sismicidad en esa zona se debe al contacto convergente entre dos importantes placas tectónicas: la placa de Cocos que subduce bajo la placa de Norteamérica. La interacción entre estas dos placas tiene lugar en la costa del Pacífico desde Chiapas hasta Jalisco (SSN, agosto 2020) (Figura 4).

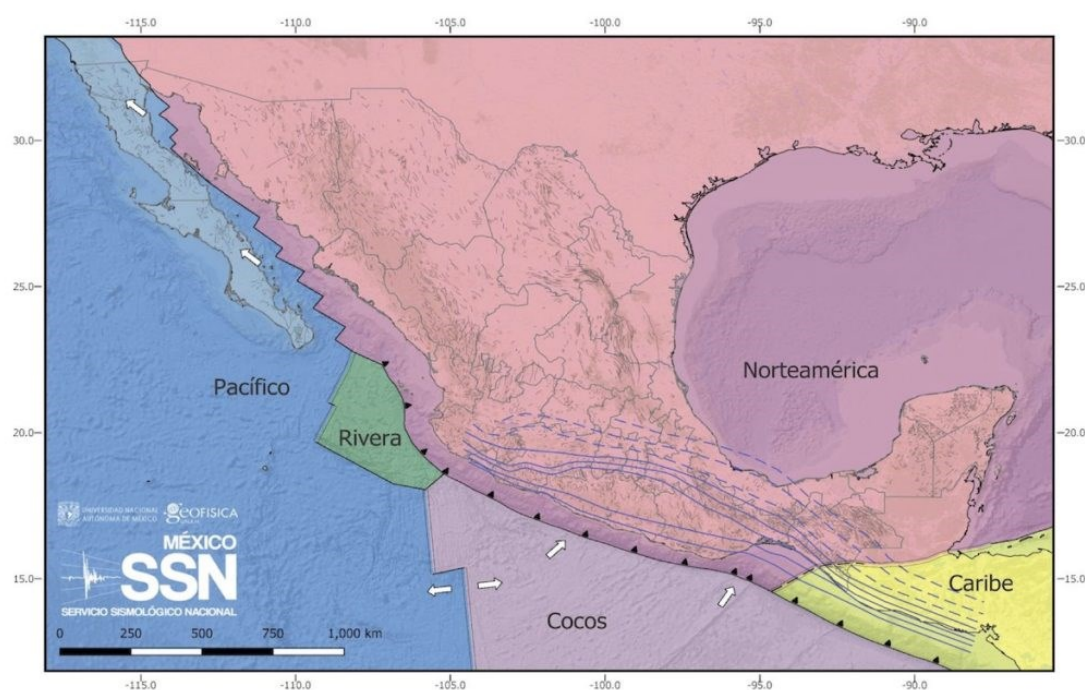


Figura 4. Mapa de interacción de las placas tectónicas en México.

Fuente: Servicio Sismológico Nacional de México.

Cada vez que ocurre un sismo de magnitud moderada a fuerte, las rocas que se encuentran cerca de la zona de ruptura sufren desplazamientos y reajustes, ocasionando nuevos sismos a los que se les llama réplicas (SSN, agosto 2020). El reajuste de rocas y la liberación de energía por lo general produce deformación sobre la superficie, que se puede manifestar como subsidencia o levantamiento del terreno, ocasionando daños en la infraestructura urbana, deslizamientos y derrumbes.

Identificación de la señal de deformación de la superficie a causa del sismo

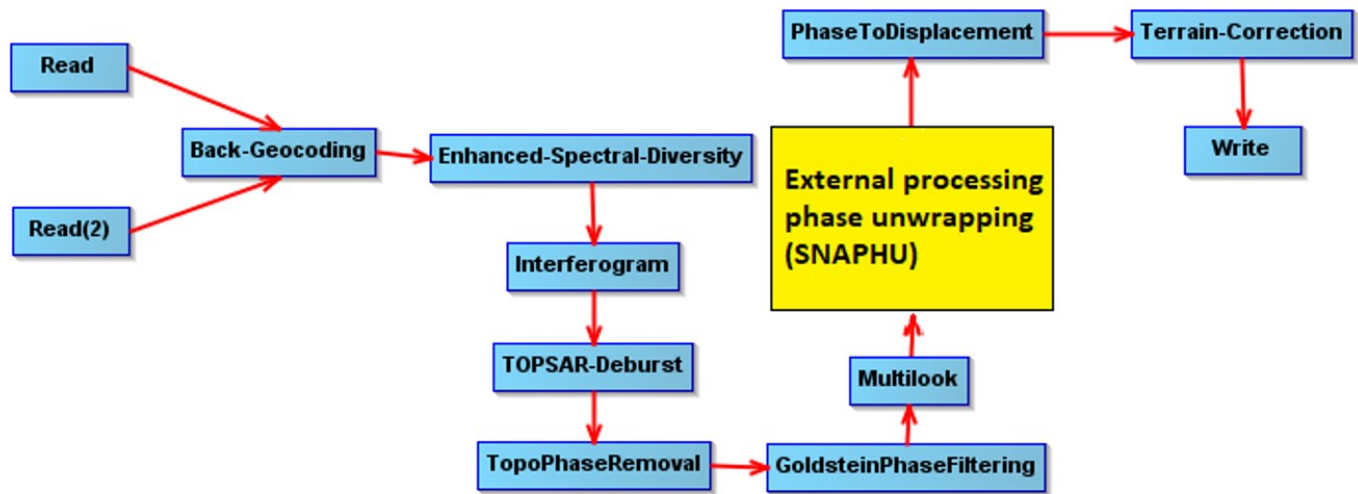
Se realizó un estudio para identificar la deformación de la superficie en la zona donde ocurrió el sismo, aplicando la técnica DInSAR para evaluar la magnitud y determinar al área de afectación. Los satélites utilizados fueron Sentinel-1A/B de la Agencia Espacial Europea. Se descargaron dos imágenes, una correspondiente al 22 de junio y la segunda al 28 de junio, el PATH utilizado fue el 70, polarización VV y órbita descendente (Figura 5).



Figura 5. Huella de cobertura de las imágenes radar Sentinel-1A/B sobre la zona del sismo.



Las imágenes fueron sometidas al flujo de procesamiento para obtener el interferograma, compuesto por los siguientes pasos (Figura 6):



El interferograma es el resultado del conjugado complejo entre la primera imagen por la segunda, mostrando las franjas en un módulo de 2π radianes (Hanssen, 2001). Cada círculo concéntrico representa aproximadamente 2.8 cm ($\lambda/2$) de deformación del terreno en la línea de visión del satélite. El círculo del centro representa el punto de mayor deformación y es coincidente con el epicentro del sismo. Si se cuenta el número de franjas y se multiplica por la deformación correspondiente a cada una, se obtienen 42 cm (Figura 7).

Figura 6. Flujo básico de procesamiento DInSAR para identificación de deformación por sismos.

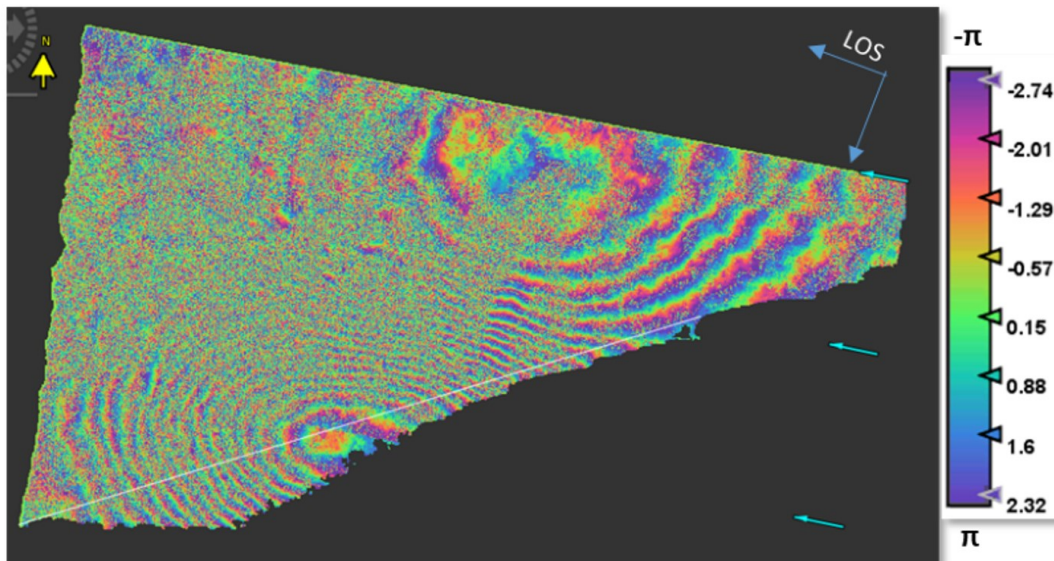


Figura 7. Interferograma diferencial que evidencia la deformación sufrida en la superficie, en el estado de Oaxaca a causa del sismo del 23 de junio del 2020.

Esta es la manera más habitual de representar la deformación por sismos empleando la interferometría, pero si se desea obtener la señal de desplazamiento continua, es necesario realizar el procedimiento llamado "desenvolvimiento de la fase" (phase unwrapping), que consiste en realizar una estimación válida para recuperar la señal original y así obtener un mapa de deformación en metros (Chen & Zebker, 2002) (Figura 8).

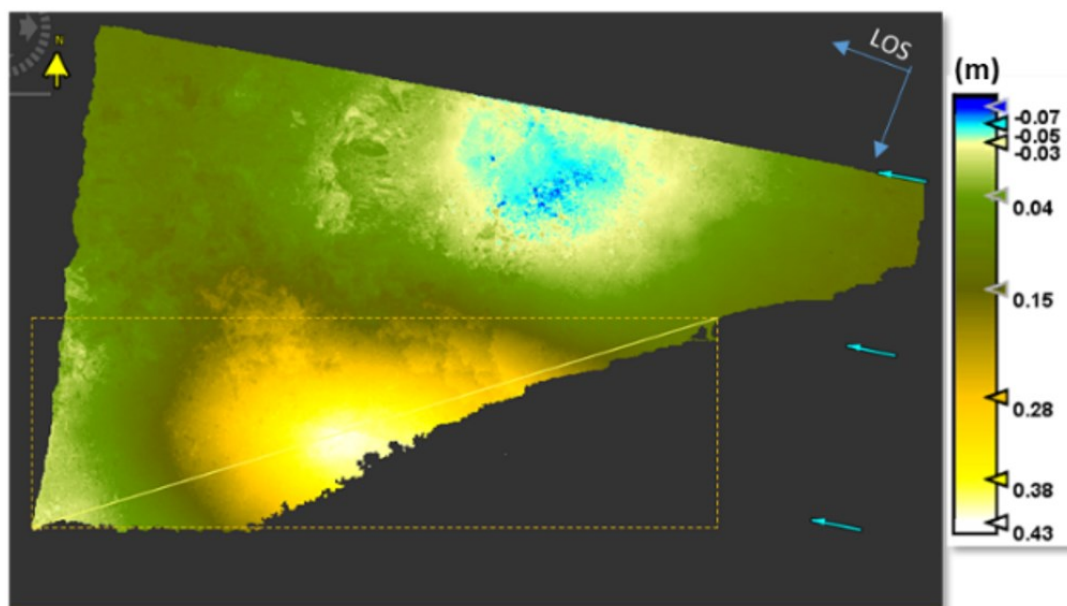


Figura 8. Mapa de deformación de la superficie en metros producto de aplicar el procedimiento de desenvolvimiento de la fase al interferograma, utilizando el algoritmo SNAPHU.

Para conocer la dirección de la deformación y su comportamiento respecto del entorno que se asume, no tuvo movimiento, se trazó una línea de perfil para visualizar de mejor manera el comportamiento de la superficie.

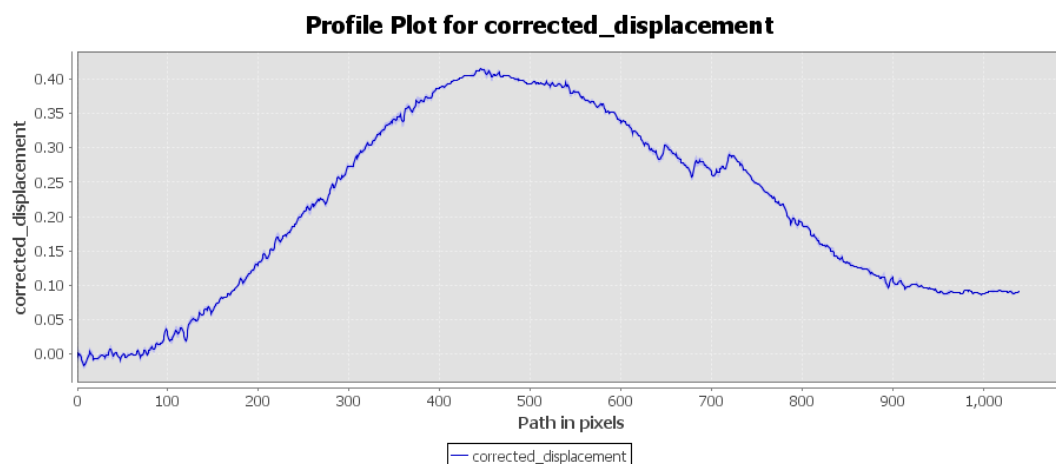


Figura 9. Perfil de deformación de la superficie a causa del sismo.

Se observa en la Figura 9 que el movimiento fue positivo, indicando levantamiento del terreno en la línea de visión del satélite con hasta 42 cm. La NASA (National Aeronautics and Space Administration) realizó el mismo estudio utilizando imágenes del satélite japonés ALOS PALSAR -2, que opera en banda L (24cm de longitud de onda) encontrando el mismo patrón de deformación y con una magnitud similar a la determinada en este estudio (Nasa, June 2020) (Figura 10).

Finalmente, se tuvo acceso a datos de observación de la estación OXUM GNSS, perteneciente a la red TLALOCNet (Cabral-Cano & Salazar-Tlaczani, 2015). Los datos indican que en el momento del sismo hubo movimiento horizontal y vertical en el sitio. Aunque la estación se localiza fuera del área de influencia de las franjas interferométricas, es interesante observar que inicialmente el movimiento vertical fue positivo, es decir, levantamiento de la superficie, para posteriormente regresar, incluso, un poco más bajo de la elevación donde se encontraba previo al sismo (Figura 11).

Los productos obtenidos del estudio DInSAR pueden ser visualizados en cualquier medio de representación de información geográfica para una mejor interpretación. En la Figura 12, se observa que la deformación llega incluso a la localidad de Santa María Huatulco y San Miguel del Puerto.



Figura 12. Mapa de deformación sobre plataforma de Google Earth.

PSI para la evaluación de la deformación de la superficie por actividades antrópicas

Persistent Scatterer Interferometry (PSI) es una técnica desarrollada para el procesamiento de interferometría radar, que ofrece una manera de reducir los principales errores que se producen en las metodologías convencionales como DInSAR; logrando disminuir la decorrelación temporal y geométrica, así como el ruido atmosférico. Esto se consigue a través del análisis de la fase interferométrica de dispersores individuales y coherentes en el tiempo, en una pila de decenas de interferogramas diferenciales con una imagen maestra (Figura 13).

Las principales características de este método de procesamiento de múltiples imágenes son el uso de una sola pila de interferogramas diferenciales con un máster único y que solo los píxeles coherentes en el tiempo, es decir, "dispersores permanentes", son considerados. Además, esta técnica se distingue de otros métodos de procesamiento interferométrico comunes por el hecho de que se pueden utilizar todas las imágenes adquiridas, incluidas aquellas con líneas de base grandes. Este es el caso, ya que los píxeles con dispersión puntual no sufren decorrelación geométrica como lo hacen los objetivos con un mecanismo de dispersión distribuida, y dichos píxeles permanecen coherentes en todos los interferogramas (Kampes, 2006) (Figura 14).

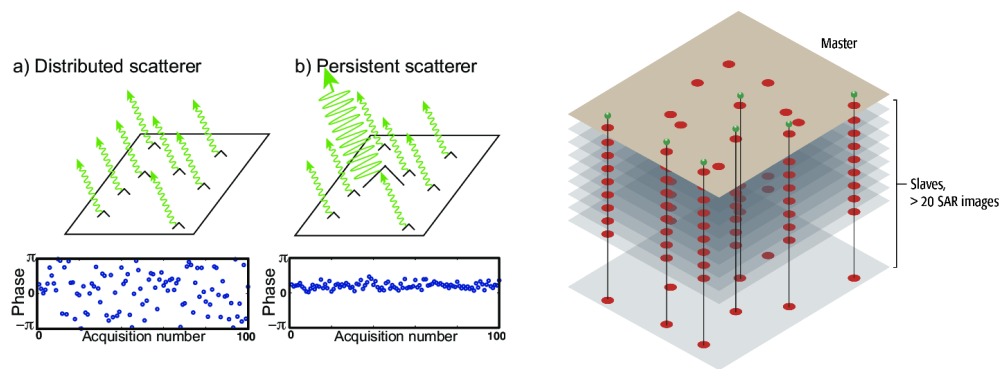


Figura 13. Mecanismo de dispersión distribuida y puntual dominante persistente.

Utilizando esta técnica es posible generar series de tiempo largas sobre sitios que favorecen la retrodispersión y la coherencia como centros urbanos, desiertos, zonas rocosas y áreas con escasa vegetación. Aunque la técnica está desarrollada para obtener información altamente precisa y baja en ruido de algunos sitios con características específicas, es posible implementarla en zonas que no cumplen con las características requeridas, ya que los dispersores permanentes pueden ser tanto naturales como artificiales (Figura 15).



Figura 14. Reflector triédro para retrodispersión persistente de la señal radar en un sitio con alta decorrelación.



Figura 15. Aunque las minas son estructuras hechas por el hombre, funcionan como reflectores naturales ya que no es necesario instalar ningún dispositivo para obtener información coherente de la fase y amplitud, debido a su composición, condiciones y orientación.

Caso de estudio 2:

Identificación de subsidencia de la superficie en el campo geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, México

El campo geotérmico Cerro Prieto (CGCP) está localizado a 30 km al sureste de Mexicali, Baja California, México (Figura 16). Centrado entre la falla Imperial de deslizamiento lateral derecho y la falla de Cerro Prieto, el área es una cuenca de separación en la parte sur de la depresión Salton. La extracción de agua y vapor del sistema geotérmico, a una profundidad de 1500–3000 m, provoca una tasa máxima de hundimiento del orden de 8 cm/año (Hanssen, 2001; Fabriol y Glowacka, 1997).



Figura 16. Localización geográfica del campo geotérmico de Cerro Prieto. Elaboración propia.

El golfo de California es el resultado de la actividad tectónica que creó una serie de centros de expansión y fallas transformadoras. Como resultado, en Cerro Prieto, la corteza terrestre se está abriendo ("cuenca de separación"). Un afloramiento de magma de la astenosfera, combinado con intrusiones en forma de diques, son la principal fuente de calor del depósito. Esto provoca que el agua subterránea en las areniscas y las lutitas grises del delta del río Colorado se caliente en profundidad. Las temperaturas a 2500 m se estiman en 350 °C. Una de las manifestaciones más notables de la actividad termal en la zona es el volcán Cerro Prieto, con una elevación de unos 210 m. El área este presenta una alta actividad agrícola, mientras el área al oeste es seca y muestra manifestaciones geotérmicas en la superficie como volcanes de lodo y fumarolas. El clima de la zona es extremo: las temperaturas varían de -2 °C en invierno a 47 °C en verano. Las precipitaciones son muy escasas, con una media anual de 80 mm (Hanssen, 2001).

Datos

Con la finalidad de conocer la tasa de subsidencia asociada a la extracción de agua y vapor del sitio, se aplicó la técnica de interferometría para series de tiempo PSI. Se adquirieron mediante el portal Alaska Satellite Facility, 38 imágenes del satélite Sentinel-1A/B, en modo de adquisición IW, Path 173, dirección de vuelo descendente y polarización VV. El período de estudio es de dos años, desde enero del 2018 a diciembre del 2019 (Figura 17).



Figura 17. Portal Alaska Satellite Facility de la NASA, del cual se descargaron las imágenes necesarias para el estudio.

Date	Base line (m)	Date	Base line (m)
05-01-18	5.00	01-03-19	71.00
29-01-18	11.00	25-03-19	63.00
10-02-18	21.00	30-04-19	119.00
06-03-18	-48.00	24-05-19	44.00
30-03-18	83.00	17-06-19	16.00
23-04-18	-57.00	11-07-19	-38.00
17-05-18	42.00	04-08-19	10.00
10-06-18	44.00	22-08-19	21.00
04-07-18	-91.00	03-09-19	16.00
28-07-18	8.00	15-09-19	22.00
21-08-18	-22.00	27-09-19	144.00
14-09-18	8.00	09-10-19	-50.00
08-10-18	10.00	21-10-19	-10.00
01-11-18	-7.00	02-11-19	-40.00
25-11-18	25.00	14-11-19	72.00
19-12-18	-53.00	26-11-19	49.00
31-12-18	-16.00	08-12-19	2.00
12-01-19	-29.00	20-12-19	-18.00
05-02-19	0.00	26-12-19	82.00

Figura 18. Tabla de fechas de adquisición y línea base perpendicular en metros para cada imagen adquirida.

METODOLOGÍA

Se utilizó el método SNAP-StaMPS, un procesamiento en conjunto entre el software SNAP de la ESA y Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS) que fue desarrollado inicialmente en la Universidad de Stanford, EE.UU. y continuado posteriormente en la Universidad de Leeds, Inglaterra, por un equipo de investigadores liderado por el Dr. Andy Hooper. El método consiste en realizar el corregistro de todas las imágenes respecto de la imagen maestra, que fue determinada a partir del análisis de líneas base temporales y perpendiculares, y corresponde a la del 5 de febrero del 2019 (Hooper, 2006) (Figura 18).

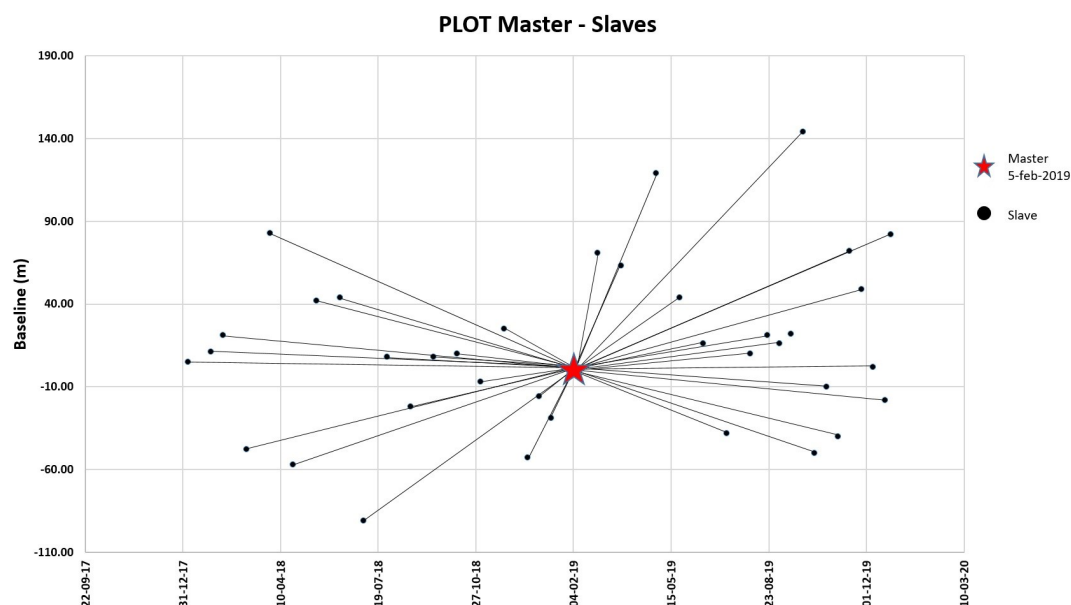


Figura 19. Grafico de pares interferométricos con base en la línea base temporal y perpendicular.

Posteriormente, se generan los interferogramas diferenciales de cada imagen esclava contra el Máster común, obteniendo como resultado una pila de interferogramas que debe ser exportado para su procesamiento en el algoritmo StaMPS (Figura 19). El algoritmo se compone de 8 etapas que, en general, consisten en la preselección de los puntos candidatos, estimación del ruido de fase, selección de los puntos persistentes, eliminación de los puntos que no cumplen con los parámetros de calidad, corrección de la fase, desenvolvimiento de la fase, estimación del error del ángulo de visión espacialmente correlacionado y filtrado de aportaciones atmosféricas (Hooper, 2006).

RESULTADOS

El resultado del flujo general del algoritmo StaMPS proporciona los PSI en su contribución completa. Se observan franjas onduladas correspondientes a las aportaciones atmosféricas y ruido asociado al DEM. Debido a que en los pasos anteriores fue calculada la atmósfera sintética y el error por DEM, es posible extraerlos de las estimaciones, generando los PSI correspondientes solo al movimiento y ruido aleatorio que se puede considerar despreciable (Figura 20).

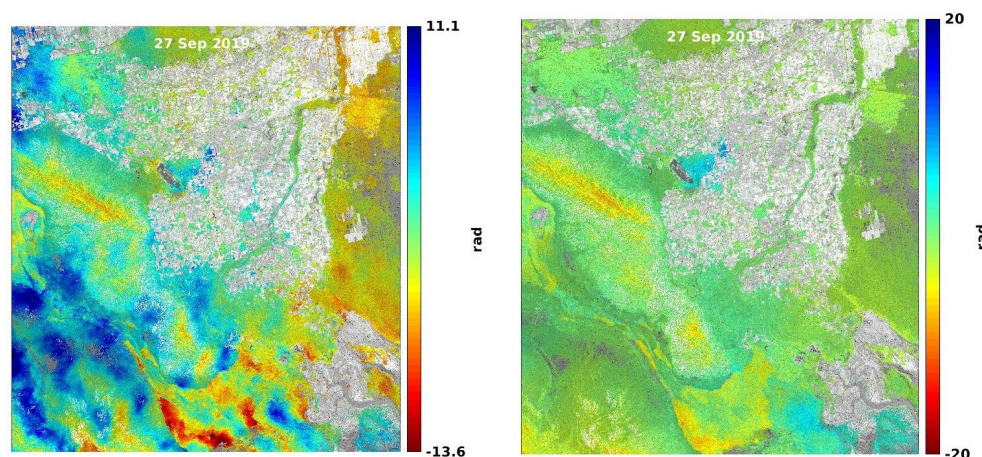


Figura 20. PSI con aportaciones atmosféricas, ruido aleatorio y asociado el DEM (izquierda) y PSI corregido por aportaciones atmosféricas, ruido aleatorio y asociado el DEM (derecha).

Se calcula la desviación estándar para evaluar la calidad de la solución para cada punto observando que, en la zona del campo geotérmico, la desviación estándar es aproximadamente de 1 mm. Finalmente, se calculó la velocidad media de subsidencia en términos de milímetros por año, evidenciando que en la zona del campo geotérmico, se está presentando subsidencia con una velocidad de hasta 80 mm/año (Figura 21).

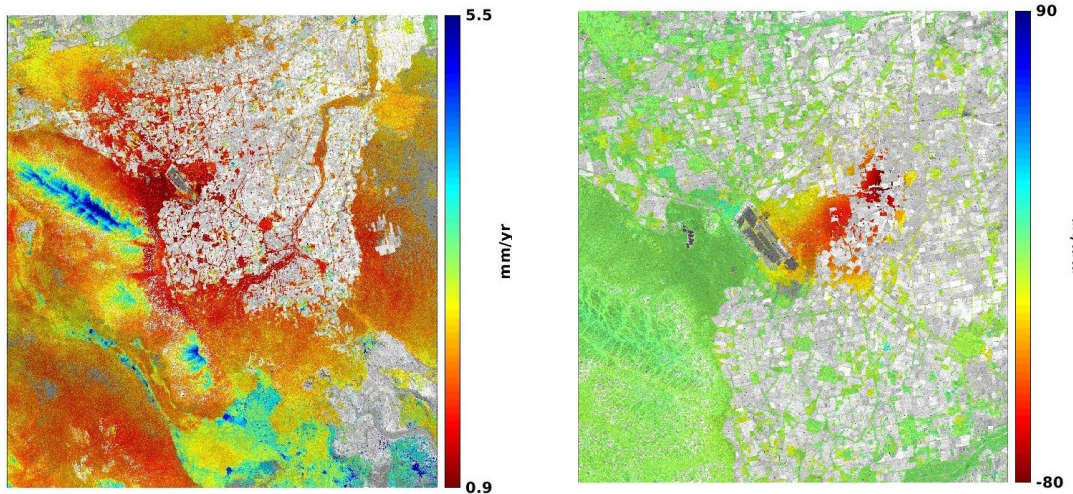


Figura 21. Desviación estándar de la solución para cada punto PSI (izquierda), velocidad media de subsidencia en mm/año (derecha).

Finalmente, es posible observar el desplazamiento acumulado para cada punto. Los datos fueron cargados al sistema de información geográfica QGIS y se utilizó el complemento PS Time Series Viewer, el cual permite graficar el comportamiento en el tiempo de los valores de subsidencia para cada punto. Se realizó un análisis para identificar el punto con mayor subsidencia acumulada para el periodo completo. Es interesante observar cómo el patrón de subsidencia tiene una orientación al noreste (Figura 22).

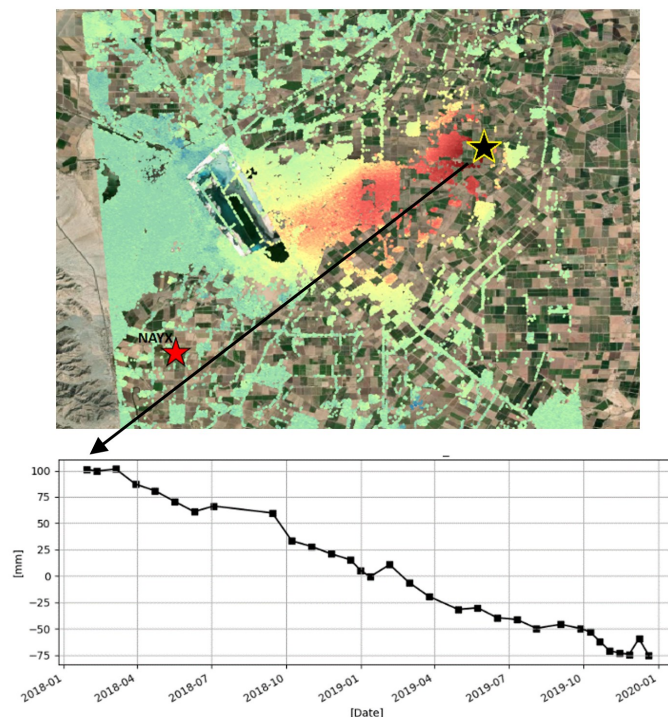


Figura 22. Desplazamiento acumulado mayor identificado al Este de la mancha de deformación de subsidencia en el campo geotérmico Cerro Prieto.

Las zonas con puntos en color verde-azul representan áreas estables, mientras que el rojo oscuro representa la mayor subsidencia acumulada en el período de estudio (Figura 23).

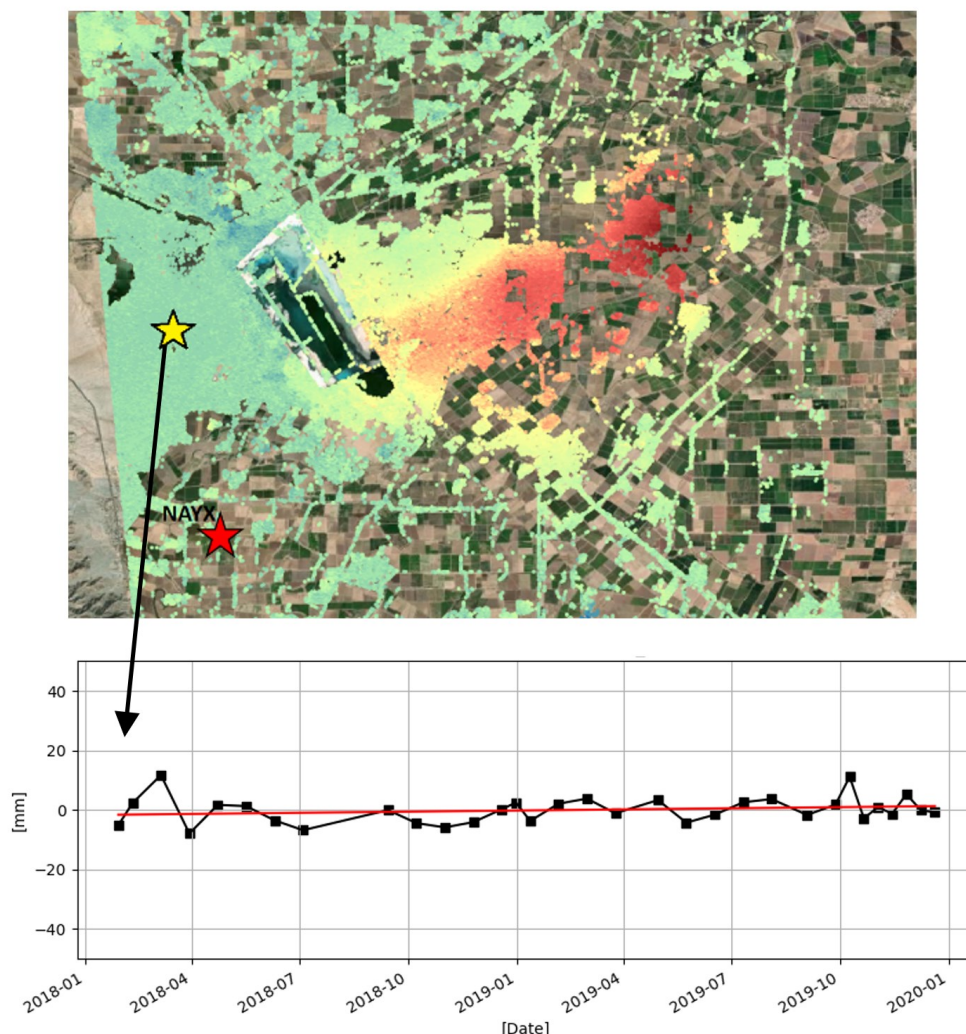


Figura 23. Zona que se considera estable al no presentar subsidencia acumulada en el período de estudio.

Finalmente, se compararon los resultados con los datos de observación de la estación GNSS llamada NAYX, localizada a 7km al sur del campo geotérmico. Se graficaron las observaciones de la estación GNSS, así como del punto más cercano observando que presentan una tendencia similar. Aunque las observaciones GNSS corresponden solo al período de agosto del 2018 a diciembre de 2019, es posible observar la similitud en la tendencia entre los resultados de la técnica PSI y el GNSS (González-Ortega, 2018) (Figuras 24 y 25).

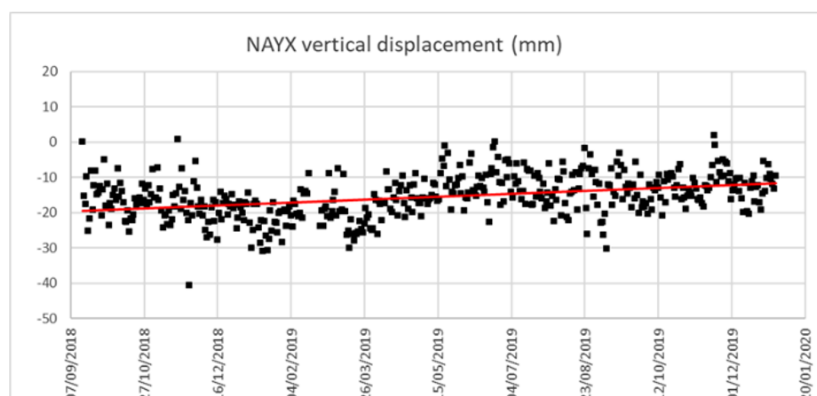


Figura 24. Observaciones GNSS de la estación NAYX a 7 km al sur del campo geotérmico de agosto del 2018 a diciembre del 2019.

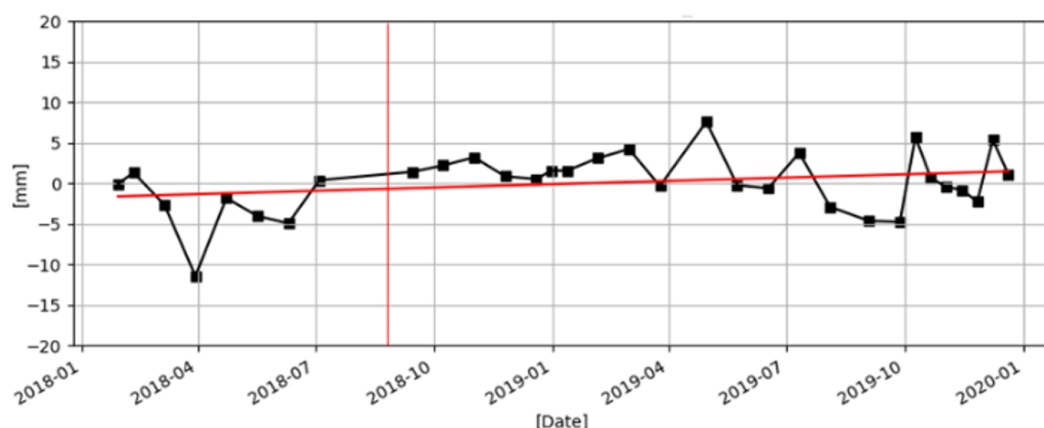


Figura 25. Comportamiento y línea de tendencia del punto más cercano a la estación GNSS, NAYX, se observa un comportamiento similar comparado con las observaciones GNSS.

Ambos set de datos fueron sobrepuestos en un gráfico de series temporales. La línea azul corresponde a los valores de desplazamiento acumulado del punto producto del análisis PSI más cercano a la estación GNSS-NAYX; mientras que la línea naranja corresponde a la media móvil del mismo set de datos calculada a un periodo de $n=7$.

El gráfico de línea en color verde corresponde a los valores que la estación GNSS-NAYX observó durante el periodo de estudio, mientras que la línea en color rojo representa la media móvil calculada a un periodo de $n=50$.

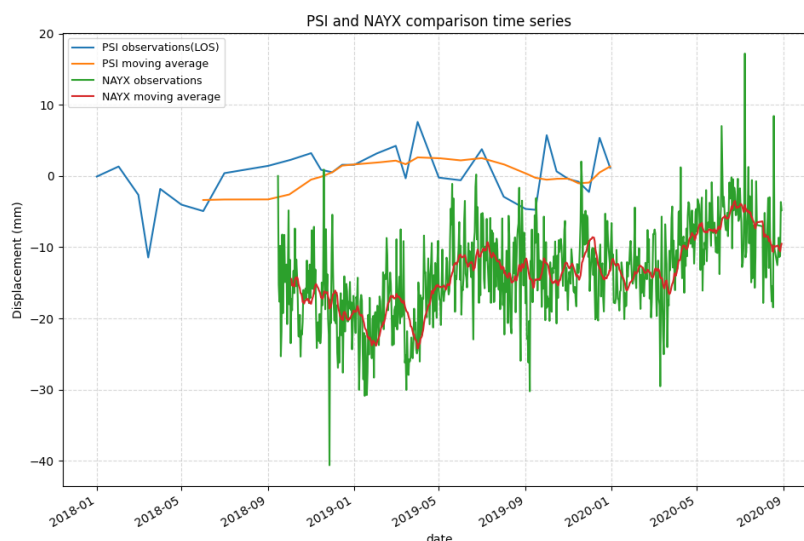


Figura 26. Sobreposición de los valores de desplazamiento del estudio PSI y las observaciones GNSS de la estación NAYX en el mismo punto.

CONCLUSIONES

Gracias a la implementación de la interferometría satelital mediante la técnica DInSAR, se logró determinar que el sismo del 23 de junio de 2020, con magnitud 7.4, produjo un levantamiento de la superficie en la zona de Crucecita, Oaxaca de hasta 42 cm en la línea de visión del satélite.

Con base en los resultados del estudio, y de la bibliografía existente para otros casos, se concluye que la técnica DInSAR es altamente confiable, proporciona información útil y oportuna para la evaluación de los daños y la toma de decisiones, con el fin de prevenir riesgos a la población.

Con la implementación de la técnica PSI, fue posible identificar, medir y mapear la subsidencia que se presenta en el campo geotérmico Cerro Prieto con hasta 18 cm de subsidencia acumulada por el período de dos años y una velocidad media anual de 80 mm/año. Las técnicas de interferometría de grandes paquetes de imágenes para el análisis de series de tiempo como PSI, proporcionan una metodología de alta fiabilidad, alta precisión y bajo costo, para el estudio de las deformaciones lentas y prolongadas de la superficie, permitiendo realizar estudios históricos y monitorizaciones programadas por largos períodos de tiempo.

La integración de metodologías como el GPS y la interferometría robustecen los resultados obtenidos, incrementando su fiabilidad.

Se hace evidente como la tecnología espacial ha contribuido en la generación de conocimiento sobre nuestro planeta. En los próximos años, se pondrán en órbita nuevos satélites, cada vez con mejores capacidades, de manera que permitirán obtener información a menor costo y con mayor tiempo de anticipación. Para ello, los profesionales debemos estar preparados para desarrollar y operar dichos sistemas.

REFERENCIAS

1. Cabral-Cano, E. , & L. Salazar-Tlaczani (2015). TLALOCNet - OXUM-oxum_tnet_mx2001 P.S., The GAGE Facility operated by UNAVCO, Inc., GPS/GNSS Observations Dataset. <https://doi.org/10.7283/T5J964RP>
2. Chen, C. W. & H. A. Zebker (2002). Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, pp. 1709-1719.
3. Fabriol, H., & E. Glowacka (1997, January). Seismicity and fluid reinjection at Cerro Prieto geothermal field: Preliminary results. In Proceedings of 22nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA (Vol. 1117).
4. González-Ortega, A., J. E. Galetzka, & J. González (2018). CICESE REGNOM GPS Network - NAYX-nayxREGNOMmx2010 P.S., The GAGE Facility operated by UNAVCO, Inc., GPS/GNSS Observations Dataset. <https://doi.org/10.7283/W2YN-FX25>
5. Hanssen, R. (2001). Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis. 10.1007/0-306-47633-9.
6. Hooper, A. J. (2006). Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation (PhD). University of Stanford, United States. <https://1bestlinks.net/AOW9K>
7. Kampes, B. (2006). Radar Interferometry - Persistent Scatterer Technique. 10.1007/978-1-4020-4723-7.
8. Meng, G. J., L. L. Ge, J. C. Wu, & Y.Q. Dai (2012). Application of DInSAR in Earthquake Deformation Studies [J]. Earthquake. Hanssen, Ramon. (2001). Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis. 10.1007/0-306-47633-9
9. NASA. Earth Science Disasters Program (2020, June). Mexico Earthquake June 2020. <https://1bestlinks.net/AOW9K>
10. Servicio Sismológico Nacional – SSN (2020, agosto). “Sismo del 23 de junio de 2020, costa de Oaxaca” (M 7.4). <https://1bestlinks.net/AOW9K>
11. Sillerico, E., M. Marchamalo, J. G. Rejas, & R. Martínez (2010). La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción. *Informes de la Construcción*, 62(519), 47-53.

12. Xu, X., D. T. Sadwell, E. Tymofyeyeva, A. González-Ortega, & X. Tong (2017). Tectonic and anthropogenic deformation at the Cerro Prieto geothermal step-over revealed by Sentinel-1A InSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(9), 5284-5292.
13. Young, N. (2018). Detecting the Impact of an Earthquake using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) with Sentinel-1A TOPS Data: A case study of the May 2015, Nepalese earthquake.

Gilberto Daniel Hermosillo Camacho

Egresado en Ingeniería Topográfica de la Universidad de Guadalajara, México, en 2012. Obtuvo el grado de Máster en Geotecnologías Cartográficas para la Ingeniería y Arquitectura por la Universidad de Salamanca, España, en 2018. Ha cursado los diplomados en Geomática y Gestión del Territorio por la Universidad de Guadalajara y CONABIO, en 2014, y el diplomado en Fotogrametría en el CITAC, en 2016.

Egresado del programa "Geotechnical Radar Monitoring" de la Universidad de Arizona y del programa "Synthetic Aperture Radar" de la Universidad de Alaska, Fairbanks, EE.UU., en 2020. Posee entrenamiento en el uso del algoritmo GMTSAR en UNAVCO, EE.UU, en 2020, y diversas capacitaciones en tecnología Radar-SAR en el NASA-Jet Propulsion Laboratory (JPL), en el período 2018 - 2020.

En el 2021, cursa el entrenamiento "Computer Vision with Artificial Intelligence WATSON and Open CV IBM", la carrera en "Data Science, Machine Learning and Artificial Intelligence", Diplomado en Estabilidad de Taludes y estancia semestral en Microwave Remote Sensing en la Universidad de Alaska Fairbanks, EE.UU.

Trabaja en la Comisión Federal de Electricidad como especialista en geotecnologías, donde ha participado en proyectos de relevancia nacional e internacional en el campo de las geociencias.

Se sugiere citar:

Hermosillo, G. (2021). Tecnología radar satelital InSAR para la detección y monitorización de la deformación de la superficie terrestre por procesos geodinámicos y/o actividades antrópicas. *Revista Cartógrafo.CL* 1(1), pp. 15-32-



Bajo Licencia Creative Commons
Atribución 4.0 Internacional.



Cartógrafo.CL/01-2021



Sebastián Hormazábal Madrid
Ingeniero Ambiental

Mauricio Aguayo Arias
Ingeniero Forestal
Doctor en Ciencias
Ambientales

Centro EULA
Universidad de Concepción

Chile



sehormazabal@udec.cl

Análisis de vulnerabilidad hídrica en la cuenca del río Muco ante un escenario de expansión forestal

RESUMEN

Numerosos impactos sobre los servicios ecosistémicos han sido producidos por cambios en el uso o cobertura de la tierra, posicionándolos como uno de los principales factores que impulsan el cambio ambiental global. Más de la mitad del agua generada en el mundo a través del proceso de escorrentía es usada por el hombre. En el centro-sur de Chile, las cuencas abastecedoras de agua han sido sometidas a grandes modificaciones territoriales, incluidas la expansión de plantaciones forestales de especies exóticas de rápido crecimiento.

Este estudio busca evaluar la vulnerabilidad de una cuenca frente a una posible expansión forestal, utilizando el modelo hidrológico SWAT (Soil & Water Assessment Tools). El escenario futuro de uso del suelo fue construido mediante el modelo de regresión logística, proyectando el desarrollo forestal al año 2041. Los resultados muestran una tendencia a la disminución de hasta un 16 % de los caudales, especialmente en la época de estiaje, provocando un aumento de la vulnerabilidad, principalmente, en la sección baja de la cuenca. Esta tendencia decreciente de los caudales, producto del aumento de la cobertura forestal, es consistente con la reportada por otros autores en cuencas de pequeña y mesoescala.

INTRODUCCIÓN

El agua es esencial para la vida y el bienestar humano, y su demanda va en aumento. Muchas personas ya viven en condiciones de escasez de este recurso. La concentración cada vez mayor de población en zonas urbanas hace del suministro de agua en el futuro, un problema sensible a nivel mundial (Stehr *et al.*, 2010).

En la actualidad, existe una competencia por el uso múltiple del agua, debido principalmente a las demandas poblacionales, energéticas y agrícolas. Países más desfavorecidos presentan incipientes políticas nacionales de desarrollo de los recursos hídricos, y una falta de legislación sobre aguas que les ayuden a establecer nuevos marcos institucionales para su gestión (Martínez & Villalejo, 2018). A nivel nacional existe una frágil situación del recurso hídrico, cerca de un 76 % de la superficie chilena se encuentra afectada por la sequía, y un total de 110 acuíferos en el país están con una demanda comprometida superior a su recarga (Fundación Chile, 2018).

Las modificaciones más importantes del cambio de suelo se deben a las actividades agrícolas y forestales. Estas últimas son las que han tenido una ganancia mayor de hectáreas. Según Echeverría *et al.* (2006), las plantaciones a nivel nacional tienen una ganancia de 627.000 hectáreas, y las hectáreas de bosque nativo una pérdida igual a 184.000, equivalente a una tasa de 3,64 % al año; ratificado por Aguayo *et al.* (2009). Por su parte, Heilmayr *et al.* (2016) estudió la transición de las plantaciones forestales entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos, durante los periodos 1986-2001 y 2001-2011, dejando en evidencia que el avance de estos ejemplares ha ocurrido en la zona centro sur del país, con un rápido crecimiento durante los periodos de estudio (4,3 % y 2,2 % anual respectivamente). El cambio de uso de suelo generado por la expansión forestal se ha cuantificado en periodos de raleo, donde se ha visto un aumento considerable en los caudales; mientras que, durante el crecimiento de estas especies, se ha apreciado una disminución de la escorrentía (Webb, 2009; Webb & Kathuria, 2012; Webb, Kathuria, & Turner, 2012; Iroumé & Palacios, 2013).

En la hidrología, los modelos se utilizan para entender sus procesos, los que ocurren a nivel de las cuencas, tales como la escorrentía superficial, evapotranspiración, interceptación, entre otros. Asimismo, para predecir el comportamiento de estos procesos en diferentes escalas espaciales, con base en parámetros que definen las características del sistema (Ponce, 1989). La evaluación de los impactos generados por el cambio de uso del suelo, a través del uso de modelos hidrológicos, se centra en determinar cómo estos cambios alteran el régimen de caudal (Fohrer *et al.*, 2001; Bronstert *et al.*, 2001 y Eckhardt *et al.*, 2003). Cuando se requiere conocer la respuesta de una cuenca frente a forzantes como los cambios de los usos de suelo, los modelos semidistribuidos y distribuidos son los más capacitados para predecir y conocer los efectos que ocurrirán en la vulnerabilidad hídrica del sistema (Beven *et al.*, 1984; Yang *et al.*, 2000; Stehr, 2008 y Devia *et al.*, 2015).

La mayoría de las investigaciones realizadas en Chile estudian los efectos hidrológicos del reemplazo de praderas y bosque nativo por plantaciones forestales a escala de microcuencas (por ejemplo, Huber *et al.*, 2008; Lara *et al.*, 2009). Los escasos estudios realizados en cuencas de meso o gran escala evidencian el potencial impacto que tiene la expansión forestal sobre la escorrentía superficial (Little *et al.*, 2009; Iroumé & Palacios, 2013). En este sentido, es importante considerar que la principal fuente de abastecimiento hídrico del centro-sur de Chile corresponde a cursos de agua superficial, cuya recarga depende del régimen de precipitaciones. Muchas de las cuencas que dan origen a estos cuerpos de agua han sido sometidas a intensos cambios en el uso del suelo, incluyendo la tala de bosque nativo, el desarrollo de actividades agropecuarias y, en las últimas décadas, la forestación masiva con especies exóticas de rápido crecimiento, subsidiada por el Estado a partir de la entrada en vigor del Decreto Ley N° 701 en 1974 (Aguayo *et al.*, 2009; Lara *et al.*, 2012 y Altamirano *et al.*, 2013). Los problemas de abastecimiento de agua son cada vez más frecuentes en cuencas que proveen de este recurso a comunidades rurales, sobre todo en los meses de verano (Iroumé *et al.*, 2005 y Iroumé & Palacios, 2013).



El concepto de vulnerabilidad es definido como: “La condición en la cual los asentamientos o actividades humanas se encuentran en peligro, en virtud de su proximidad a una amenaza o exposición a un evento de riesgo (fenómeno natural)”. Distintos estudios de vulnerabilidad advierten efectos de escasez de agua en sistemas más frágiles y sus consecuencias en el ciclo hidrológico (Vicuña *et al.*, 2008; Abraham, 2008; Ravindranath *et al.*, 2011; Jyrkama *et al.*, 2005; Takeuchi, 2009 y Espinosa *et al.*, 2011).

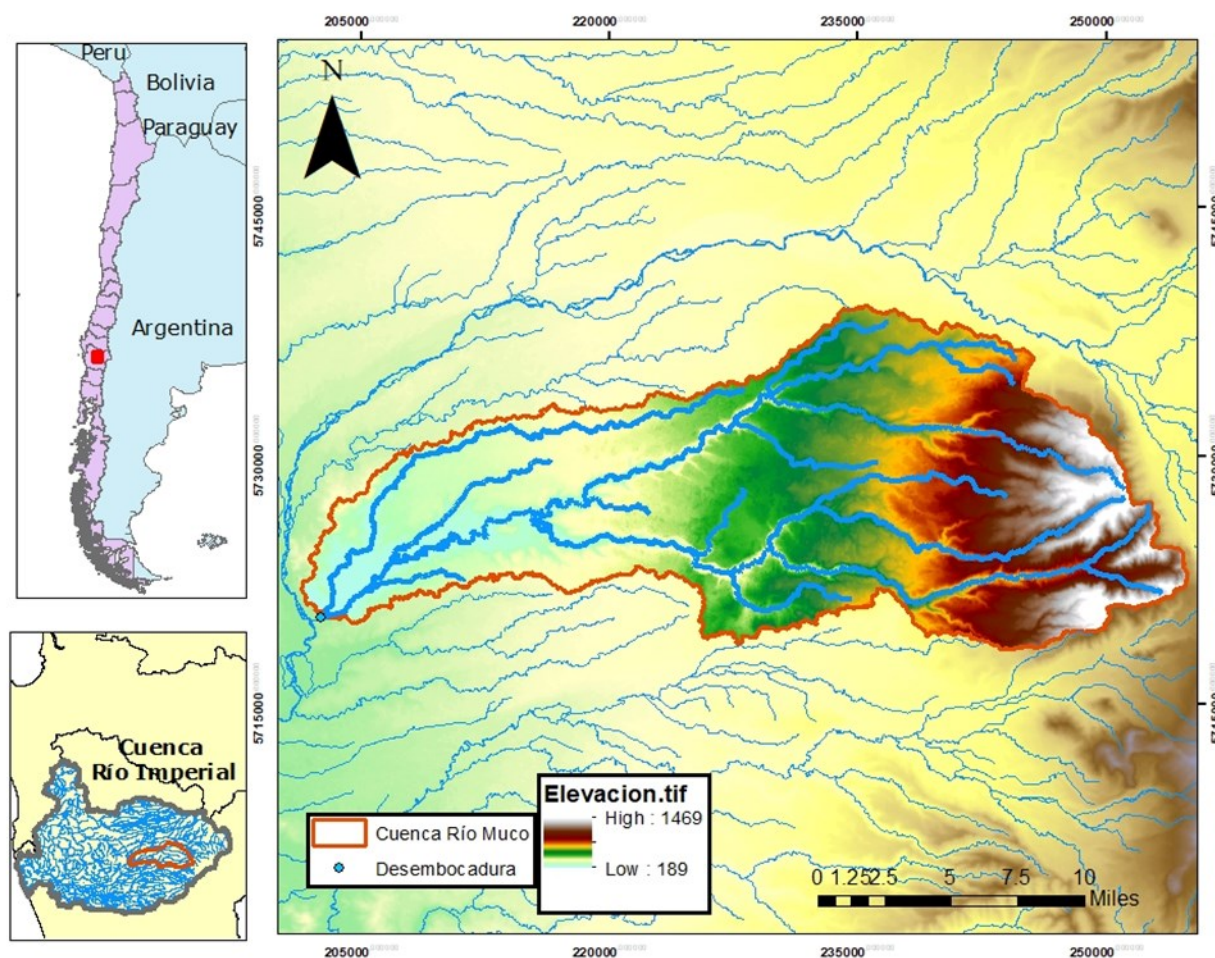
En este contexto, surge la necesidad de analizar la vulnerabilidad hídrica de las cuencas hidrográficas, que permita aportar información básica y estratégica para un plan de gestión integral del recurso hídrico. Para acometer lo anterior, se han formulado los siguientes enunciados:

-**Hipótesis de investigación:** El aumento de la cubierta forestal en la cuenca del río Muco, provocará un aumento sustancial en su vulnerabilidad hídrica.

-**Objetivo del estudio:** Evaluar la vulnerabilidad hídrica de la cuenca del río Muco, frente a escenarios de expansión forestal.

A partir de los resultados, se pretende proporcionar antecedentes objetivos que orienten la planificación y toma de decisiones hacia una gestión integrada y sustentable de cuencas hidrográficas en Chile.

Figura 1. Mapa de ubicación cuenca de río Muco. Elaboración Propia.



METODOLOGÍA

Cuenca de Estudio

La cuenca del río Muco ([Figura 1](#)) se ubica entre las latitudes 38°25'S y 38°40'S, y entre las longitudes 71°48' W y 72°24' W. Se encuentra administrativamente emplazada en la región de la Araucanía, entre las comunas de Lautaro, Vilcún y Curacautín, con un 43 %, 11 % y 6 % de su superficie comunal, respectivamente. Corresponde a una subcuenca del río Imperial y posee un área de 651 Km², lo que la clasifica como una cuenca de mesoescala.

Análisis de tendencia

Para realizar el análisis de tendencia se estudiaron datos de la estación de precipitación Vilcún de la DGA (Dirección General de Aguas), de la estación fluvio-métrica río Muco, en el puente Muco, y los datos disponibles en la base de datos de precipitación CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station data). Los datos fueron evaluados con la prueba estadística de Mann-Kendall (MK), la cual corresponde a una evaluación no paramétrica que permite comparar y ordenar las tendencias de una serie de tiempo valor por valor (González-Reyes & Muñoz, 2013), identificando así los valores que tienden a aumentar o disminuir con el tiempo. La presencia de autocorrelación positiva dentro de la serie puede aumentar la probabilidad de detección de tendencia, cuando en efecto esa no existe; mientras que la autocorrelación negativa tiende a disminuirla (Yue & Wang, 2004). Para corregir este efecto, se utilizó la técnica de preblanqueo presentada por Yue & Wang (2002), que remueve la correlación serial sin alterar la tendencia presente en la serie de datos. Esta corrección se aplicó en las series de datos de las estaciones: verano (ene-mar), otoño (abr-jun), invierno (jul-sep) y verano (oct-dic).

De igual forma se aplicó el test de Petit, el cual corresponde a una prueba no paramétrica, utilizada para el análisis de la rotura de series o cambios en la media, con el fin de verificar la homogeneidad de la serie. Ambas pruebas (tendencia y homogeneidad) fueron evaluadas utilizando el software estadístico XLStat, en su versión 2015, compatible con el programa Excel.

Modelo SWAT

El modelo hidrológico SWAT (Soil & Water Assessment Tool, versión SWAT 2012) y su interfaz gráfica ArcSWAT fue utilizado para evaluar los potenciales efectos de una expansión forestal en la cuenca. SWAT es un modelo hidrológico continuo, semi-distribuido y físicamente basado, desarrollado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) a principios de la década de los noventa, como una herramienta para predecir el impacto de las prácticas de manejo de suelo en la generación de agua, sedimentos y producción de sustancias agrícolas en cuencas grandes y complejas con variedad de suelo, uso de tierra y condiciones de manejo sobre un tiempo prolongado (Neitsch *et al.*, 2005). Los datos de entrada para el modelo corresponden a un modelo digital de elevación, mapas de tipos y usos de suelo y datos climáticos.

En este estudio se utilizó un modelo digital de elevaciones de Alos Palsar, así como, las series de suelo presentes en la cuenca y que fueron descritas en el estudio agrológico de la región de la Araucanía (CIREN, 2002), y los usos de suelo generados por Heilmayr *et al.* (2016) para los años 1986, 2001 y 2011. Toda la información geoespacial fue procesada en formato ráster con una resolución espacial de 12,5 metros. Para un mejor análisis dentro de la cuenca fue necesario delimitar sub-cuencas, las cuales a su vez fueron subdivididas en unidades de respuesta hidrológica (HRU). Las HRU corresponden a unidades dentro de las cuales existen condiciones relativamente homogéneas de uso y tipo de suelo, porque se espera que en estas unidades presenten un comportamiento hidrológico igualmente homogéneo. Debido a la falta de valores locales para los parámetros que describen las características hidrológicas de los diferentes usos del suelo presentes en el área de estudio, estos fueron asociados a la base de datos disponible en el modelo SWAT (Stehr *et al.*, 2010). Las plantaciones forestales fueron consideradas como plantaciones adultas de *Eucalyptus spp.*, plenamente establecidas.



Indicadores	Muy Bueno	Bueno	Satisfactorio	No Satisfactorio
R^2	$R^2 > 0.80$	$0.70 \leq R^2 \leq 0.80$	$0.60 \leq R^2 \leq 0.70$	$R^2 \leq 0.60$
PBIAS (%)	$PBIAS < \pm 10.0$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$	$PBIAS > \pm 25$
KGE	$0.75 < KGE \leq 1.0$	$0.65 < KGE \leq 0.75$	$0.5 < KGE < 0.65$	$KGE < 0.5$

Para el proceso de calibración del modelo se utilizaron series de tiempo de precipitaciones, temperaturas y caudales, comprendidas entre los años 2005 y 2008. La cobertura del uso de suelo, para la modelación de caudales, corresponde al año 2011. Se utilizó el método de Curva Número (CN) para el cálculo de la escorrentía, debido a la disponibilidad de datos de precipitaciones y caudales mensuales.

La escorrentía fue modelada utilizando el método de onda cinética y la ecuación de Manning para determinar las velocidades de escurrimiento. Para la recarga de acuíferos subterráneos, SWAT utiliza la función de decaimiento exponencial propuesta por Venetis (1969) y modificada por Sangrey *et al.* (1984).

Los cálculos de evapotranspiración fueron realizados usando el método de Hargreaves, el cual requirió de una serie diaria de temperaturas máximas y mínimas. Las bases de datos climáticas fueron obtenidas desde la base de datos de Temperatura elaborada por Climate Forecast System Reanalysis (CFSR global base) y la base de datos de precipitación CHIRPS. Mientras que los datos de caudal fueron obtenidos de la estación fluviométrica río Muco en puente Muco de la DGA.

El modelo fue validado comparando los caudales medios mensuales simulados versus los caudales medios medidos en las estaciones fluviométricas, asociadas a la cuenca durante los años 2009-2013. El nivel de ajuste entre los caudales simulados y observados fue evaluado a través de los índices: 1) valor absoluto del porcentaje de desviación (PBIAS); 2) coeficiente de determinación (R^2); y 3) índice de Kling Gupta (KGE), según los rangos de calificación definidos por Moriasis *et al.* (2007); Gupta *et al.* (2009) (Tabla 1).

Escenario de expansión forestal

La modelación de escenarios en futuros usos de suelo se efectuó comparando la dinámica espacial de los cambios ocurridos en el período 1986 al 2001, y se proyectó un escenario futuro para la cuenca. Para los años mencionados, se utilizaron las bases de datos de coberturas de suelo elaboradas por Heilmayr *et al.* (2016).

Se identificaron los factores que determinan la localización de los diferentes usos de suelo (presentados en la Tabla 1), las relaciones entre la ocurrencia de una expansión forestal (variable dependiente) y los factores forzantes (variables independientes), utilizando un modelo de regresión logística de acuerdo con lo propuesto por distintos autores (Aguayo *et al.*, 2016; Miranda *et al.*, 2015; Nahuelhual *et al.*, 2012; Aguayo, 2008; Echeverría *et al.*, 2007; Mellado, 2019).

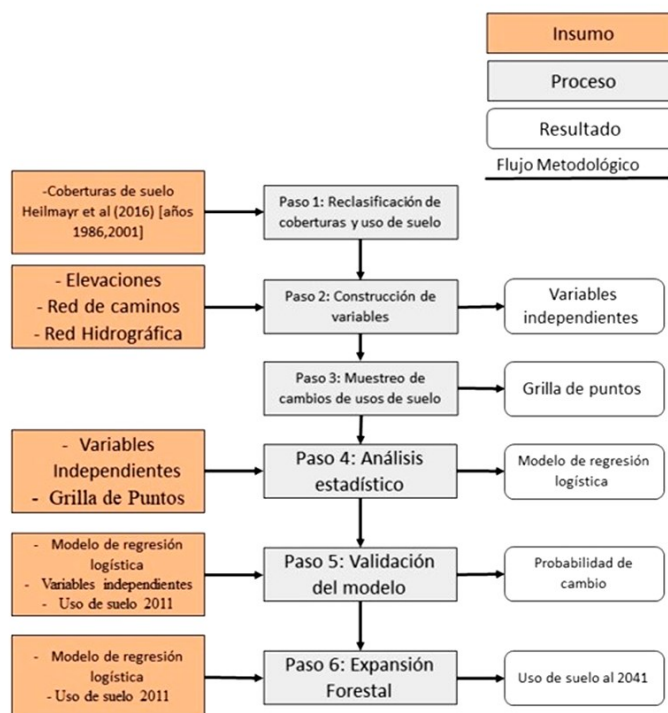


Tabla 1. Límite de desempeño de medidas de bondad de ajuste.

Fuente: Moriasis *et al.* (2007); Gupta *et al.* (2009).

Figura 2. Esquema metodológico expansión forestal. Elaboración Propia.

Este proceso se realizó con el software ArcGIS 10.4, siguiendo el esquema metodológico que se presenta en la [Figura 2](#).

Paso 1: Reclasificación de coberturas y usos de suelo.

Para la descripción de las coberturas de uso de suelo se utilizó las bases de datos de Heilmayr *et al.* (2016), para los años 1986 y 2001. Esta información fue reclasificada asignando los valores de Bosque Nativo (al bosque nativo y bosque de renova), Plantación Forestal, Terrenos Agrícolas, Uso de suelo urbano y otros usos.

Paso 2: Construcción de variables.

Con las coberturas de suelo reclasificadas se generaron las variables de Presencias y Distancias, utilizando las herramientas Distancia Euclidiana y Estadística Focal (con un radio de 500) implementadas en ArcGIS. De igual forma se utiliza un modelo de elevación digital obtenido del Sensor Alos Palsar para construir la variable de pendientes.

Paso 3: Muestreo de usos de suelo.

A partir de la cobertura del 2001, se extrajeron los polígonos de plantaciones forestales, que desde 1986 correspondían a los terrenos agrícolas y praderas. Utilizando la herramienta de geoprocésamiento Clip, se recortaron los polígonos de plantaciones del 2001, en función a los obtenidos de 1986. Luego, con la herramienta Creación de red, se generó una malla de puntos cada 250 metros, con los polígonos que cambiaron de terreno agrícola o pradera a plantación; se seleccionaron los puntos que están dentro de los parches de polígonos más representativos, y se les asignó el valor de 1. Para finalizar con base en los usos de suelo de terrenos agrícolas y praderas del año 1986 se comparan con los mismos usos de suelo del año 2001, para ver en qué polígonos no ocurrieron cambios, seleccionando así los puntos más representativos y asignándoles el valor 0.

Paso 4: Análisis estadístico

Con el conjunto de variables independientes (obtenidas en el paso 2) y la grilla de puntos obtenidos en el paso anterior, se utiliza la herramienta de Extracción de valores múltiples a puntos, se extraen los valores de cada variable independiente a los puntos de la grilla. Se exportan los datos a una tabla Excel y utilizando el complemento estadístico Xlstat, se calcula la ecuación de la regresión logística.

Paso 5: Validación del Modelo

Con la ecuación de regresión logística, obtenida en el paso anterior, y con las variables independientes, se elaboró el uso de suelo futuro al año 2011; utilizando el cambio histórico ocurrido (1986-2001), para el proceso de validación se reclasificaron las probabilidades obtenidas, comparando con el uso de suelo del año 2011, generado por Heilmayr *et al.* (2016). Con esto se buscaba encontrar la probabilidad de cambio que mejor se ajustara al modelo para que no se expandieran otros usos de suelo que no fueran plantación forestal, siendo en este caso seleccionada una probabilidad de 0,6.

Paso 6: Expansión forestal

Los parámetros obtenidos por medio del modelo de regresión logística se utilizaron para simular un escenario de expansión forestal al año 2041, generando un uso de suelo intermedio al 2026; esto debido a que el modelo de regresión logística lograba expandir 15 años hacia el futuro.

Análisis de Vulneración hídrica

Para calcular la vulnerabilidad hídrica de la cuenca frente a un escenario de expansión foresta, se calculó un índice de vulnerabilidad ([ecuación 1](#)) (Espinosa,

2011)). Este índice de vulnerabilidad compara la diferencia existente del caudal mensual histórico versus el caudal mensual obtenido en el escenario planteado en las distintas subcuencas del área de estudio. La clasificación empleada para categorizar este índice se encuentra recomendado por la Organización de Naciones Unidas (IDEAM, ONU, MDGIF, 2009), la cual corresponde a una adaptación de la metodología propuesta por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (Espinosa, 2011).

$$IV = ((S-E) / S) * 100 \quad \text{ecuación 1}$$

S corresponde al período de Línea de Base en el cual se considerará el período con el uso de suelo actual de la cuenca (1995-2013);

E son los valores de caudal obtenidos con el escenario de expansión forestal generado.

RESULTADOS

Análisis de tendencias

La [Figura 3a](#) muestra el comportamiento anual para la variable de precipitación junto a los diagramas de caja correspondientes, se ilustra la variabilidad de los datos en el período de 1981–2016 para las series de datos de la DGA (específicamente en la estación Vilcún), junto para la Base de Datos CHIRPS. Ambas series de datos presentan una tendencia decreciente, el estadístico S de ambas series así lo confirma ([Figura 3](#)).

De igual forma el valor-P muestra que las tendencias identificadas son significativas para un intervalo de confianza del 95 %. Asimismo, la [Figura 3a](#) muestra los resultados de las pruebas de homogeneidad para los datos de precipitación, donde se observa que ambas series no presentan un quiebre estadísticamente significativo en sus datos, lo que hace suponer que la tendencia decreciente viene dada de años anteriores.

Al comparar los datos de precipitación obtenidos por la estación Vilcún de la DGA y la base de datos CHIRPS, se puede observar que la Base de datos CHIRPS reproduce de manera aceptable la variabilidad de la serie de tiempo de precipitaciones. En efecto, Zambrano *et al.* (2017) comprobó que esta base de datos se ajusta adecuadamente a los datos de precipitación registrado por las estaciones meteorológicas a nivel nacional.

Mientras que, en el caso de la variable de caudal ([Figura 3b](#)) muestra el comportamiento anual para la variable de caudal junto al diagrama de caja correspondiente, en el cual se ilustra la variabilidad de datos en el período de 1981 – 2017 para la estación fluviométrica río Muco en el puente Muco. La serie de la estación presenta una tendencia negativa la que es confirmada por el estadístico S. Sin embargo, el valor P muestra que la tendencia identificada no es significativa para un intervalo de confianza del 90 %.

La prueba de homogeneidad que se le realizó a la serie de datos ([Figura 3b](#) líneas roja y verde) muestra un quiebre estadísticamente significativo el año 1995, donde disminuye en un valor promedio anual de 26,87 a 22,04 m³/s.

En la [Figura 3b](#) grafica el análisis de tendencia realizado en la época de verano (comprendida en los meses de enero – marzo), en donde se aprecia que, en los meses más secos, el caudal presenta una tendencia negativa, siendo su S de -94. Este valor igual es apoyado por el valor del estadístico P.

Mientras en la prueba de homogeneidad aplicada a estos datos se encontró un comportamiento homogéneo, siendo esto respaldado por el valor P que se obtiene en esta prueba.

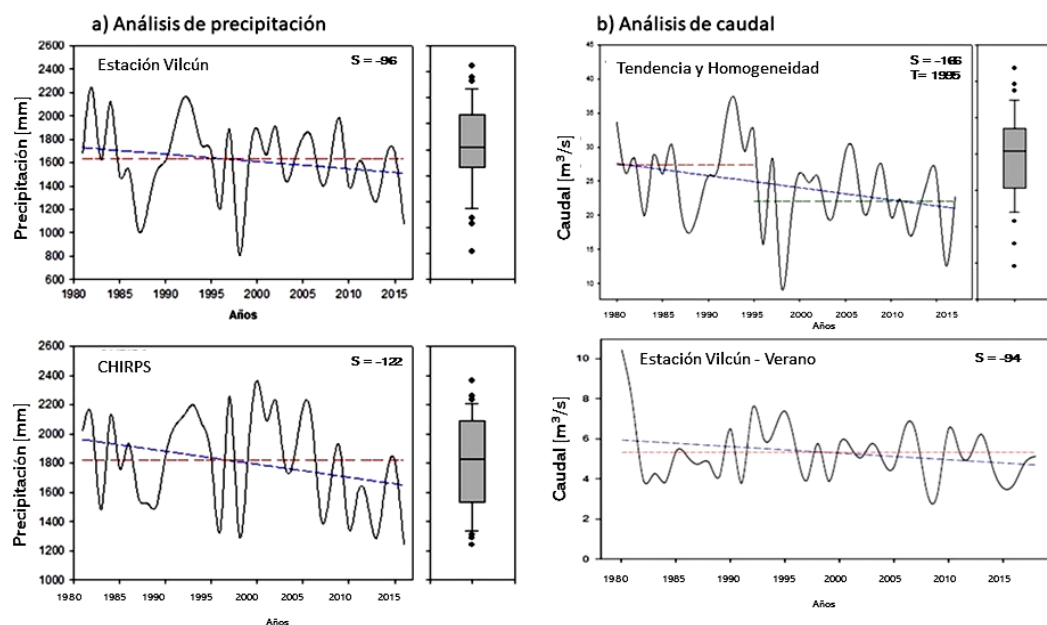


Figura 3. Análisis de tendencia y homogeneidad: a) Datos de precipitación, b) Datos de caudal. Elaboración propia.

Las series de caudales analizadas presentan las mismas tendencias que las series de precipitación de la estación Vilcún; es decir, una tendencia que demuestra una disminución de la disponibilidad de agua en la cuenca, principalmente, en las estaciones de primavera, verano y otoño, donde la tendencia es estadísticamente significativa.

Calibración y validación del modelo hidrológico

El análisis de sensibilidad implementado para la calibración del modelo en base a los distintos parámetros, obtenidos en la literatura, arrojó una combinación de 8 parámetros que son los más sensibles ($P\text{-value} \leq 0,5$) para la modelación de flujo en el área de estudio

Se encontró una gran sensibilidad en los siguientes parámetros:

CH_K2: el presente parámetro es el que posee mayor sensibilidad, tiene relación con la conductividad hidráulica efectiva en el cauce principal, la que es utilizada por el modelo para calcular las tasas de pérdidas por transmisión.

CH_N2: es el segundo parámetro con mayor sensibilidad, este corresponde al coeficiente “n” de Manning para el cauce principal, presenta relevancia al momento de calcular los valores de flujo en el cauce principal (Neitsch *et al.*, 2005).

LSUBBSN: Tercer parámetro más sensible corresponde a la longitud promedio de la pendiente, la que también se relaciona con la cantidad de flujo generado y el tiempo de concentración (Cibin *et al.*, 2010).

CN2: El cuarto parámetro más sensible corresponde a la curva Número, que determina la escorrentía y, por lo tanto, posee una influencia directa en la cantidad de flujo generado en cada URH.

Además, se observó una alta sensibilidad en los parámetros de aguas subterráneas (GWQMN.gw, GW_Delay.gw) debido a que estos parámetros poseen influencia sobre los niveles de recarga del acuífero superficial y subterráneo influyendo, por lo tanto, en la modelación del flujo base de escorrentía. En el caso de la cuenca del río Muco, estos parámetros aumentaron influyendo así en el flujo superficial, disminuyendo el flujo subterráneo.

Como último parámetro más sensible se destaca el parámetro Sol_AWC, el cual tiene relación con la cantidad de agua disponible en el suelo, lo que significa que influye en el proceso de infiltración para cada subcuenca, en consecuencia, el aumento de este parámetro está relacionado con una mayor evapotranspiración del suelo que, para este estudio, se decide aumentar en 2.0 (200 %), con el fin de reducir la sobreestimación de los caudales.

La Figura 4a muestra la serie de caudales simulados y observados para el período de análisis, el cual representan de buena forma los caudales base, medios y tiempos de concentración. Sin embargo, se presentan leves sobrestimaciones en los caudales peak, principalmente en los años 2005 y 2006. De igual manera en la Figura 4b muestra la serie de caudales simulados y observados para el período 2009-2013. Se aprecia que el modelo, al igual que para el período de calibración, pudo reproducir de buena forma los caudales base, caudales medios y tiempos de concentración, no llegando a los máximos de escorrentía, principalmente en los años 2011 y 2013. Sin embargo, la subestimación es menor en comparación al período de calibración. Esto se debe principalmente, a que la base de datos de precipitación (CHIRPS) subestima los máximos de precipitación caída, lo que se refleja en la incapacidad del modelo para generar los *peak* de escorrentía reales, además los autores Borah & Bera, 2003 y Borah *et al.*, 2007 señalan que el modelo SWAT posee poca capacidad para predecir los caudales máximos.

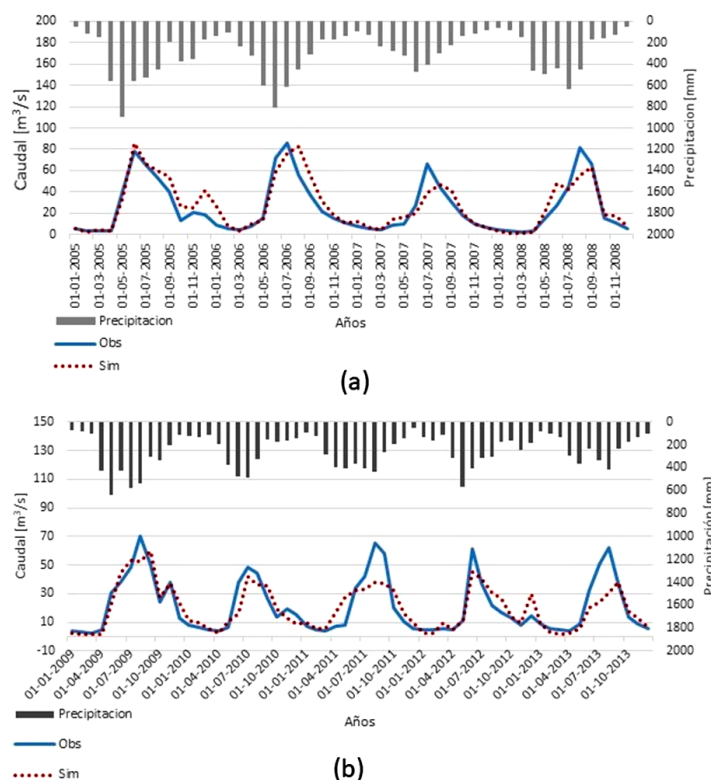


Figura 4: Calibración y validación del modelo hidrológico.
Elaboración propia.

Los resultados estadísticos para evaluar el desempeño del modelo mostraron un muy buen nivel en el KGE (0,83) coeficiente de determinación (0,77) y PBIAS (5,67 %) para la calibración según la clasificación de Moriasi *et al.* (2007) y Gupta *et al.* (2009) (Figura 4a, Tabla 2). El modelo fue validado para demostrar la idoneidad de los valores calibrados en los escenarios (Figura 4b, Tabla 5). El ajuste entre el flujo observado y validado en el período de los años 2009-2016 alcanzó un buen nivel para un R^2 de 0,73. Se obtuvo una buena clasificación para PBIAS y KGE, con valores de -5,7 % y 0,75, respectivamente.

Modelación de escenario de Expansión Forestal

Al cuantificar los cambios ocurridos en el uso de suelo entre el período 1984-2001 (Tabla 3), se puede observar un aumento en las coberturas de plantaciones forestales (6 %) y en los terrenos agrícolas (7 %), siendo esta última la segunda mayor cobertura en ambos períodos. Por su parte los matorrales y praderas presentaron una disminución de un 3 % en sus coberturas, lo que se puede entender que el uso de suelo dio paso a las plantaciones forestales y terrenos agrícolas, lo que fue evidenciado también por Heymair *et al.* (2016). Por último, el bosque nativo sufrió una disminución de un 10 %.

	Calibración		Validación	
	Valor	Desempeño	Valor	Desempeño
R²	0,84	Muy Bueno	0,73	Bueno
KGE	0,83		0,78	Muy Bueno
PBIAS	9,3		-5,7	

Tabla 2: Valores de los indicadores de bondad de ajuste para calibración y validación.

Elaboración propia.

Se aprecia también que durante el período de análisis de las coberturas (15 años aproximadamente) el uso de suelo ocupado por distintos centros urbanos sufrió un leve incremento en su área. Se evidencia que la cuenca presenta un desarrollo forestal y agrícola por sobre el aumento de industrias o crecimiento urbano (Tabla 3).

Usos de suelo	1986		2001		% de cambio
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	
Terrenos Agrícolas	13.360,06	21%	18.309,54	28%	7%
Bosque Nativo	31.369,10	48%	25.073,74	38%	-10%
Plantaciones Forestales	572,13	1%	4.858,33	7%	6%
Matorrales	10.063,16	15%	8.424,80	13%	-2%
Praderas	8.935,64	14%	7.090,20	11%	-3%
Centros urbanos	0,01	0%	0,23	0%	0%

Tabla 3. Variación temporal de los usos de suelo presentes en la cuenca (1986 - 2001). Elaboración propia a partir de las capas generadas por Heymair *et al.* (2016).

De acuerdo con los parámetros de regresión logística $\beta(i)$ se puede observar en la Tabla 4 que el avance de las plantaciones forestales se encuentra fuertemente determinado por la Pendiente, Distancia al Bosque Nativo, Presencia de Bosque Nativo, Distancia a centros urbanos y la Presencia de Terrenos Agrícolas.

El avance de las plantaciones forestales posee una relación indirectamente proporcional, principalmente por las variables de elevación ($\beta_b(i) = -0,00258079$). Esto se debe a que a mayor elevación es menor la posibilidad del establecimiento de plantaciones forestales, lo que también evidenció Aguayo *et al.*, 2016. Además la distancia al bosque nativo es la segunda variable que está relacionada indirectamente con el avance de las plantaciones, lo que se explica por la variable de elevación (mayor altura más difícil el poblamiento de plantaciones exóticas sobre las especies nativas).

Por su parte la variable de Presencia de Bosque Nativo ($\beta(i) = 16,12272000$) es la que posee una relación directamente mayor con la expansión forestal, ya que ofrece condiciones de sitio favorables para su asentamiento; principalmente, un suelo de aptitud preferentemente forestal (Aguayo *et al.*, 2016). Por otra parte, los parámetros de distancia demuestran que la actividad forestal se desarrolla cerca de plantaciones previamente establecidas, debido a que estas áreas presentan facilidades de infraestructura básica como caminos y centros de acopio (Aguayo *et al.*, 2016; Mellado, 2019).



Variables	$\beta(i)$	Error estándar	Wald a)	P
Elevaciones	-0,0026	0,002	0,949	0,33
Pendiente	0,0844	0,0266	10,07	**
Distancia al bosque nativo	-0,007	0,0017	16,411	**
Presencia de bosque nativo	16,1227	3,721	18,778	**
Distancia plantaciones forestales	0,0004	0,0003	1,826	0,177
Presencia plantaciones forestales	0,683	10,66	0,004	0,949
Distancia Terrenos Agrícolas	0,0064	0,0042	2,229	0,135
Presencia terrenos agrícolas	11,5232	3,941	8,548	**
Distancia a ríos	0,0003	0,0002	1,413	0,235
Distancia a caminos	0,0005	0,0002	5,206	0,023
Distancia centros urbanos	-0,0002	4×10^{-5}	18,727	**

Tabla 4. Parámetros de la regresión logística ajustados para la expansión forestal (**= $P < 0,01$). Elaboración propia, a partir de Xlstat (2019).

Los cambios ocurridos en los años 1984-2001 y la regresión logística permitieron la proyección del uso de suelo forestal hacia el año 2041 (Figura 6).

La Tabla 5 muestra el cambio histórico y futuro en los usos de suelo. En ella se puede apreciar que las plantaciones forestales aumentan en un 1 % al año 1986 y en un 14 % al 2011, alcanzando a cubrir un 22 % de la cuenca al año 2041. Este aumento de las plantaciones se produce por la disminución de algunos usos de suelo principalmente de los terrenos agrícolas, los cuales al año 2011 abarcaban un 28 % y disminuyen a un 26 % en el 2041. Asimismo, los matorrales pasan de ocupar un 8% a un 5 % de la cuenca. Diversos usos de suelo también disminuyen en menor medida pasando de un 15 % a un 12 %.

	1986		2001		2011		2041	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Terrenos Agrícolas	13.360	21%	18.309	28%	18.028	28%	16.710	26%
Bosque Nativo	31.369	48%	25.073	38%	22.842	35%	22.920	35%
Plantaciones Forestales	572	1%	4.858	7%	8.923	14%	14.445	22%
Matorrales	10.063	15%	8.424	13%	5.326	8%	3.184	5%
Otros Usos	8.935	14%	7.090	11%	9.704	15%	7.886	12%

Tabla 5. Cambio en la superficie (ha) de los principales usos de suelo.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5 muestra la distribución temporal de las coberturas de suelo donde se puede apreciar que las plantaciones forestales pasan de poblar un total de 8.923,47 ha al 2011 a un total de 14.444,50 ha, con una ganancia neta de 5.521,03 ha al 2041.

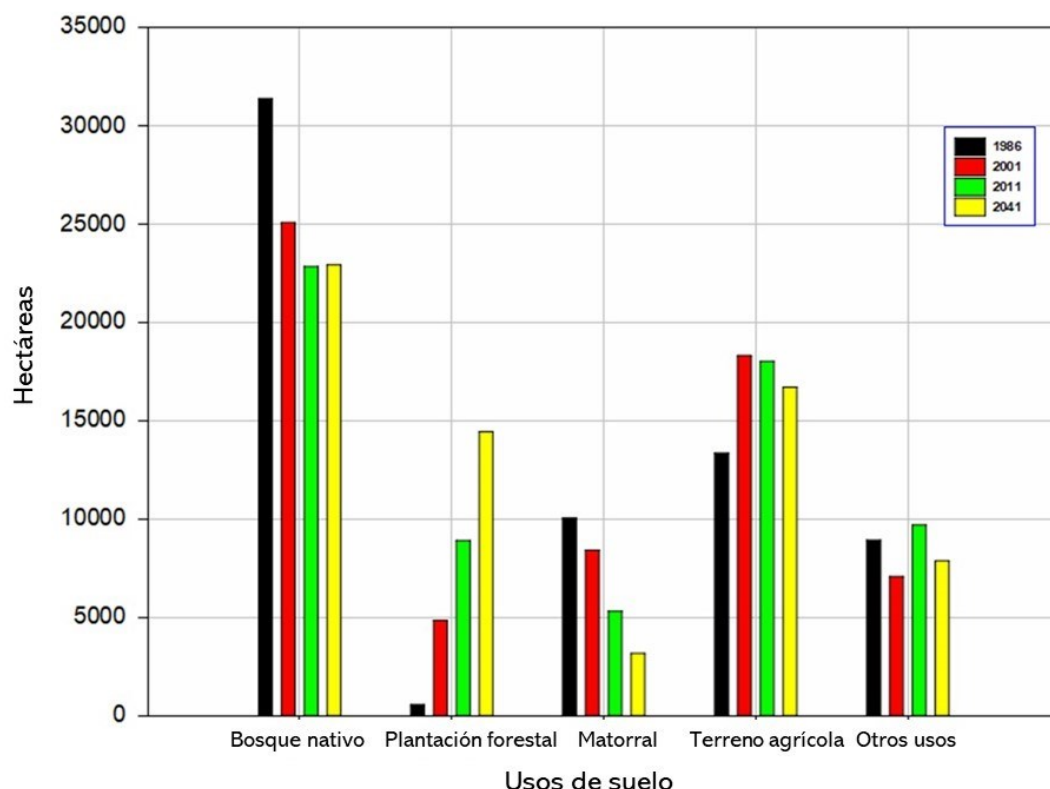


Figura 5. Variación temporal de los usos de suelo para los años 1986, 2001, 2011, 2041. Elaboración propia.

Se puede observar en las Figuras 5 y 6 que los usos de suelo de terrenos agrícolas y matorrales son las principales coberturas reemplazadas por plantaciones forestales; en menor medida, las coberturas agrupadas en otros usos (praderas, cuerpos de agua, suelo urbano). La cobertura con una mayor presencia en los años 1986, 2001 y 2011 corresponde al bosque nativo, proyectándose de igual forma al año 2041. Esto debido a que se trabajó bajo la Ley N° 20283 del Ministerio de Agricultura, en donde se prohíbe el reemplazo de especies nativas por plantaciones exóticas.

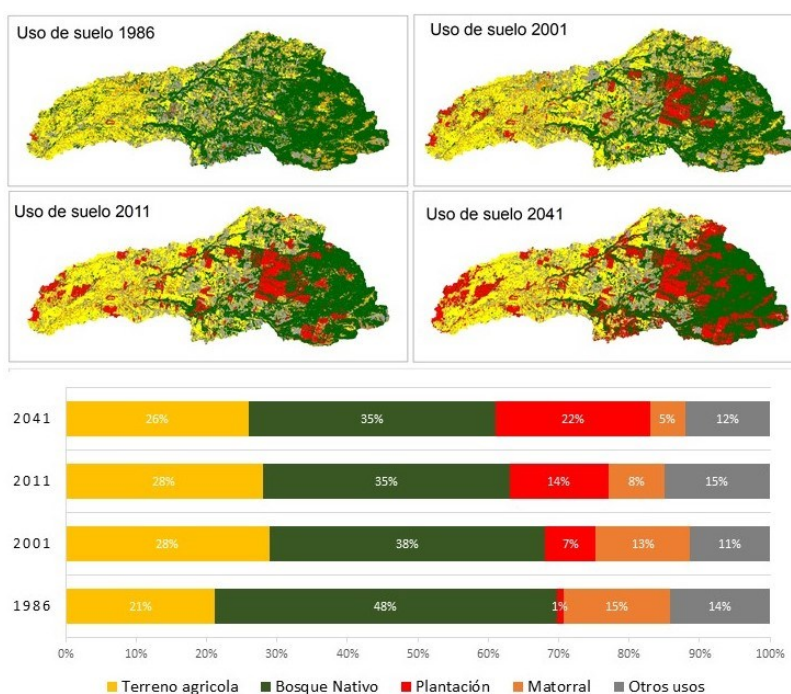


Figura 6. Distribución espacial de los usos de suelo. Elaboración propia

De igual forma se puede apreciar en la [Figura 3](#) que el modelo de regresión logística, utilizado para la expansión del uso de suelo forestal, logra reproducir la dinámica de cambio de suelo que presentó entre los periodos 2001-2011.

Análisis de Vulnerabilidad hídrica

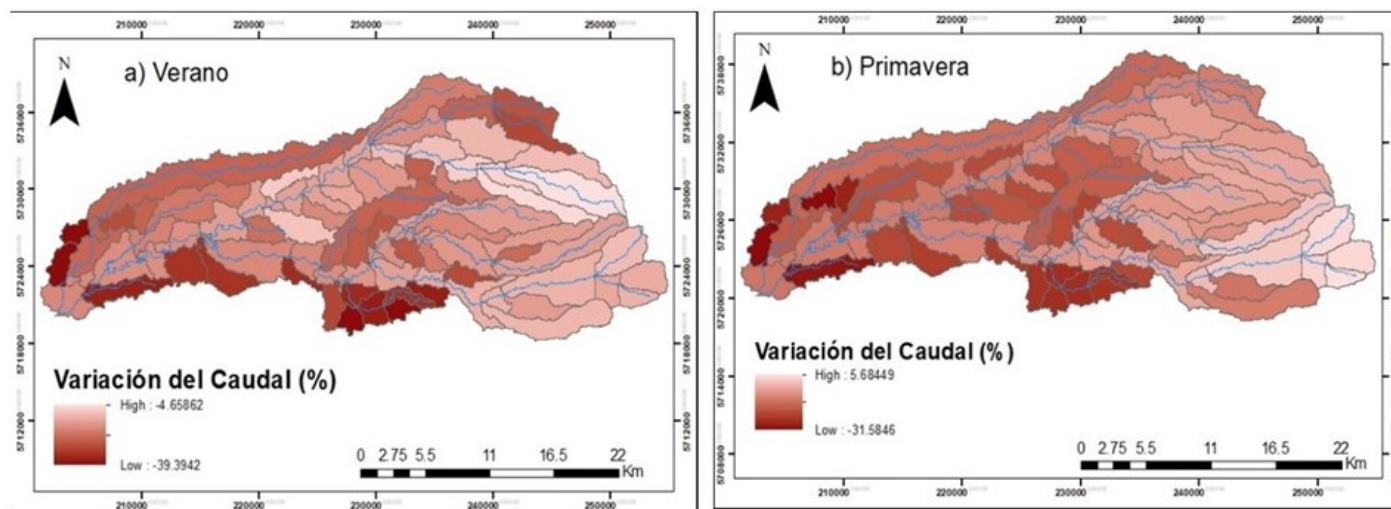
Al realizar una comparación de los caudales en el periodo de línea base (2000 -2013) *versus* los caudales futuros (2014-2043) bajo el escenario de una expansión forestal, se presentan variaciones espaciales en toda la cuenca.

Las principales reducciones de caudal se presentan en la parte media y baja de la cuenca (color más oscuro, [Figura 7](#)), además en el estero El Tambor, parte centro sur de la cuenca. Por el contrario, en lo alto de la cuenca (nacimiento del río Muco) no se prevén importantes reducciones de caudal, ya que el avance del uso de suelo forestal no logró poblar esos sectores. Se mantuvo el uso de suelo correspondiente al bosque nativo, el cual posee una correlación positiva en cuanto a su presencia y la producción hídrica (Lara *et al.*, 2009).

Las principales reducciones de caudal se presentan en la parte media y baja de la cuenca (color más oscuro, [Figura 7](#)), además en el estero El Tambor.

La [Figura 8](#) muestra la variación estacional del caudal provocada por la expansión forestal medidas en la estación fluviométrica río Muco en puente Muco (Subcuenca 90). La reducción anual corresponde a un 1 %; en el caso de las distintas épocas del año, las mayores reducciones de caudal se presentan en las estaciones de primavera y verano, teniendo un valor de 10 % y 16 %, respectivamente.

Figura 7. Variación espacial del caudal: a) Verano, b) Primavera.
Elaboración propia



Al cuantificar las variaciones de los percentiles para la estación fluviométrica, la mayor reducción recae en los percentiles bajos (P5, P10, P15), con una variación que va desde un -0,90 a un -7,84; los que afectan a los caudales medios mensuales, con un porcentaje de excedencia de un 80 % y 90 %, en los periodos de estiaje. Asimismo, se observa que existirá un aumento en la disponibilidad hídrica de hasta un 3 % en los caudales medios (P50 – P60).

Esta reducción cuantificada en los percentiles más bajos es consistente con lo mencionado por Little *et al.*, 2009, Huber *et al.*, 2010 y Mellado, 2019, quienes han evidenciado que el efecto de las plantaciones forestales sobre la disponibilidad de agua recae principalmente a los caudales mínimos, generando déficit hídrico en épocas estivales.

Al realizar el cálculo de la vulnerabilidad hídrica de cada subcuenca ([ecuación 1](#)) se aprecia un aumento en los índices de vulnerabilidad, comparando el escenario de expansión forestal *versus* el de línea de base. La [Figura 9](#) muestra la distribución espacial de los índices de vulnerabilidad por subcuenca en los meses

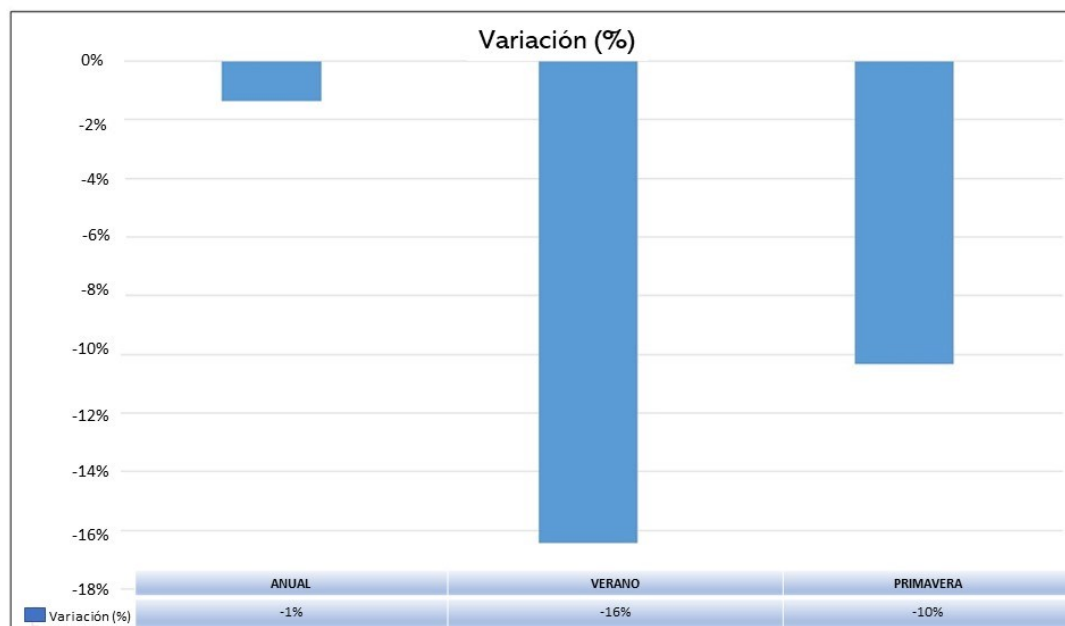


Figura 8. Variación estacional del caudal.
Elaboración propia.

de verano. Se observa en ella que la mayor vulnerabilidad al año 2041 se distribuye en la parte baja y media de cuenca (mismas zonas con mayor reducción de caudal), donde la mayor vulnerabilidad se encuentra en la zona perteneciente al estero El Tambor.

La zona alta de la cuenca presenta índices de vulnerabilidad menores a 10 %, esto debido a que esta zona de la cuenca tiene menores reducciones en el caudal. Al comparar con la Figura 6, al año 2041, se aprecia que en esa zona no existe gran aumento del poblamiento de las plantaciones forestales.

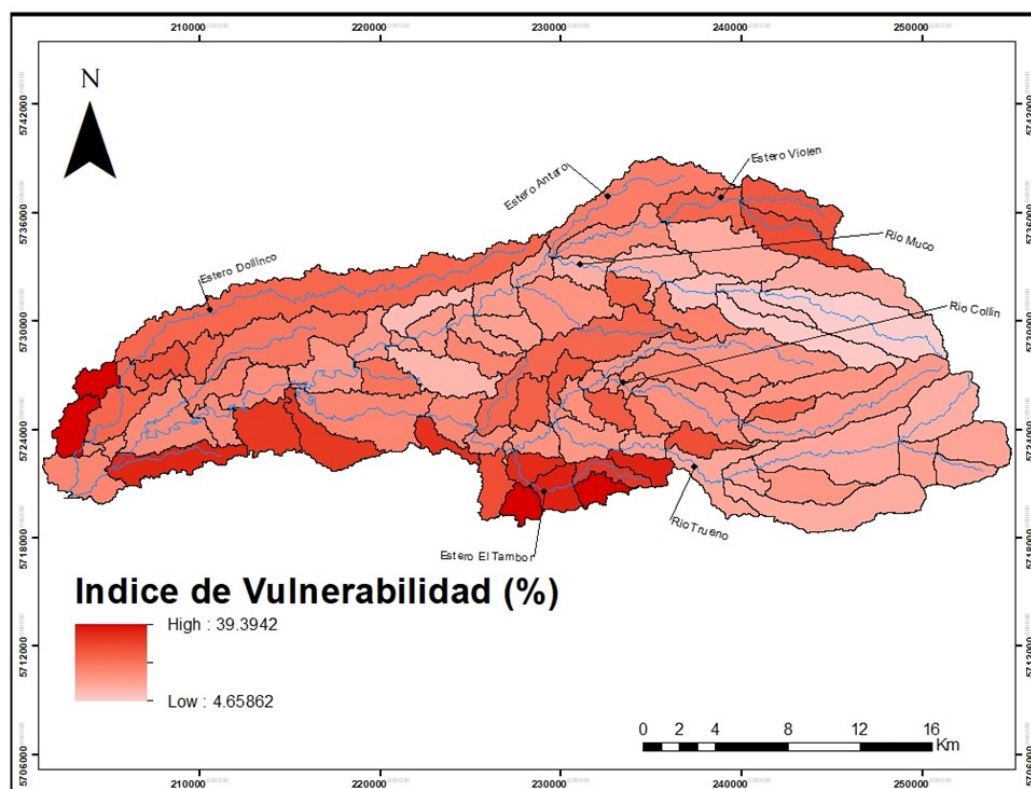


Figura 9. Vulnerabilidad hídrica espacial ante un escenario de expansión forestal.
Elaboración propia.

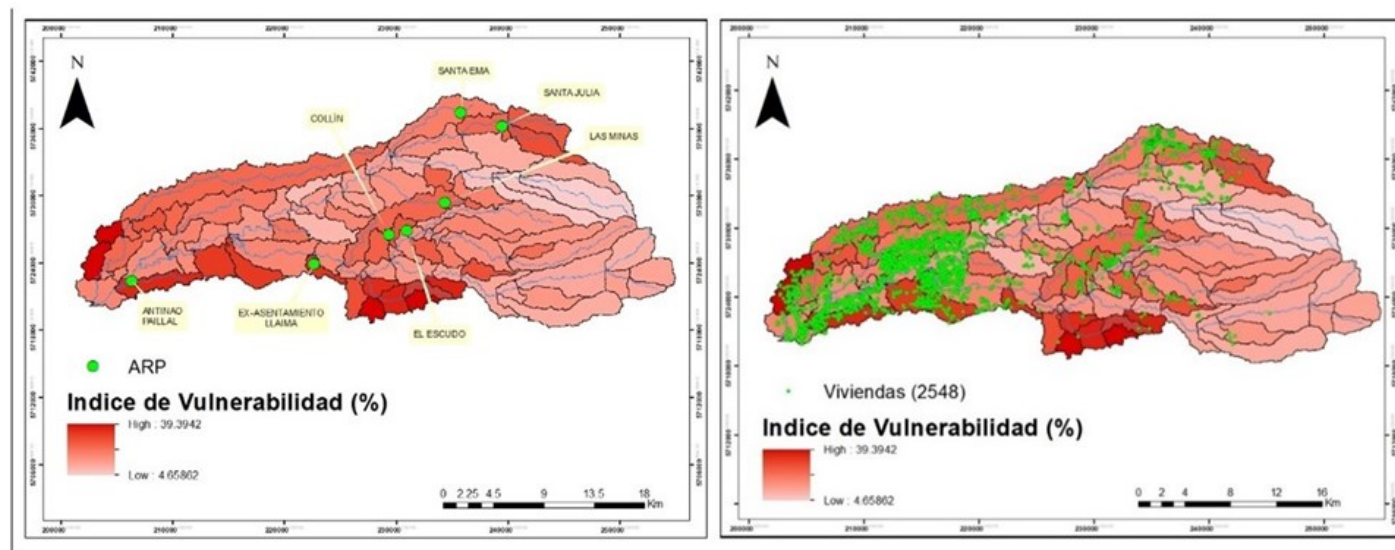
Analizando estos índices de vulnerabilidad, en relación con el servicio de provisión de agua, dentro del área de la cuenca se identificaron 7 sistemas de Agua Potable Rural (APR) presentados en la [Figura 10-A](#), de los cuales los sistemas más afectados corresponderían a los APR Antinao Paillal y el APR Ex Asentamiento Llaima: ya que ambos sistemas se encuentran en las zonas con mayor índice de vulnerabilidad dentro de la cuenca.

De igual forma se realizó un análisis en función de la población existente dentro de la cuenca, para el censo del año 2017 y a través de la unidad de Planeamiento del MOP se identificaron 2548 viviendas en el área de estudio ([Figura 10-B](#)), la cual representaría una población total de 10.192 habitantes, considerando que la mayor vulnerabilidad se concentra en la zona media y baja de cuenca; la cantidad aproximada de viviendas afectadas sería de 1247, siendo la población afectada de 4988 de habitantes aproximadamente representando un 49 % de población total de la cuenca.

Cabe señalar que estos resultados se trabajaron con una subestimación en la modelación de caudales, pues la base de datos de precipitación CHRIPS, para el período de validación del modelo, presenta una subestimación en los valores máximos de precipitación para los años estudiados, que podría significar que al año 2041 existiría una mayor reducción en los caudales de la cuenca y en consecuencia afectaría a una mayor cantidad de población dentro de esta.

Figura 10: a) Sistemas APR dentro de la cuenca del río Muco; b) Viviendas cuenca río Muco

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) y Datos de la Dirección de Planeamiento (Dirplan) del Ministerio de Obras Públicas.



CONCLUSIONES

Este estudio destaca la importancia de la modelación hidrológica y de usos de suelo espacialmente explícitos para el cálculo de la vulnerabilidad hídrica, y permitió someter a prueba la hipótesis sobre los potenciales efectos de intervenciones en cuencas hidrográficas. Los resultados del proceso de validación prueban que el modelo empleado en este caso de estudio es capaz de reproducir adecuadamente la respuesta hidrológica bajo distintos escenarios de expansión forestal.

En efecto, las simulaciones muestran una tendencia a la disminución de los caudales, lo cual es especialmente preocupante en la época de estiaje donde el caudal se reduce a más del 16 % respecto al período base. Esta tendencia es consistente con el análisis realizado de los datos del período base, y con las tendencias reportadas por otros autores en cuencas de pequeña y mesoescala.

Los resultados del presente estudio pueden ser utilizados en discusiones de políticas públicas y toma de decisiones que involucren cambios en la cobertura del suelo, ya que brindan herramientas con base científica, y cuantifica los impactos causados sobre los recursos hídricos durante los últimos treinta años, principalmente como resultado de la sustitución de bosques nativos por plantaciones forestales. También puede ser una base importante para la investigación futura, incluidas las proyecciones del cambio de uso combinándolos con los efectos del cambio climático.

REFERENCIAS

1. Abraham, E. (2008). Asociación española de ecología terrestre, tierras secas, desertificación y recursos hídricos. *Ecosistemas*.
2. Aguayo, M. (2008). El cambio de uso de suelo en el centro-sur de Chile. Comprendiendo su dinámica a través de la modelación espacialmente explícita y explorando sus efectos ambientales en una cuenca hidrológica de mesoescala. Concepción: Tesis Doctorado en Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción.
3. Aguayo, M., A. Pauchard, G. Azócar y O. Parra (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista chilena de historia natural*.
4. Aguayo, M., A. Stehr y O. Link (2016). Respuesta hidrológica de una cuenca de meso escala frente a futuros escenarios de expansión forestal. *Revista de geografía norte grande*.
5. Altamirano, A., P. Aplín, A. Miranda, L. Cayuela, A. Algar, & R. Field (2013). High rates of forest loss and turnover obscured by classical landscape measures. *Applied Geography*, 40.
6. Beven, K., M. Kirkby y N. Schofield (1984). Prueba de un modelo de pronóstico de inundaciones con base física (modelo) para tres captaciones del Reino Unido. *Revista de hidrología*.
7. Borah, D., & M. Bera (2003). Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases. Transactions of the ASABE.
8. Borah, D., J. Arnold, B. Modeling, C. Krug, & X. Liang (2007). Storm Event and Continuous Hydrologic Modeling for Comprehensive and Efficient Watershed Simulations Storm Event and Continuous Hydrologic Modeling.
9. Bronstert, A., U. Fritsch, & D. Katzenmaier (2001). Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluss in Flussgebieten. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam, 243pp.
10. Cibir, R., K. Sudheer, & I. Chaubey (2010). Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. Hydrological processes.
11. CIREN. (2002). Estudio Agrologico, Descripción de suelos Materiales y Símbolos, IX Región. Centro de Información de Recursos Naturales.
12. Devia, Gayathri K., B. P. Ganasri, & G. S. Dwarakish (2015). A review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007.
13. Echeverría C., D. Coomes, J. Salas, J.M. Rey-Benayas, A. Lara, & A. Newton (2006). Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. *Biological Conservation*, 130.
14. Echeverría, C., A. Huber, & F. Taberlet (2007). Estudio comparativo de los componentes del balance hídrico en un bosque nativo y una pradera en el sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 28 (3), 271-280.
15. Eckhardt, K., L. Breuer, & H. G. Frede (2003). Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects. *J. Hydrol.*, 273.
16. Espinosa, J., H. Uribe, J. Arumí, D. Rivera, & A. Stehr (2011). Vulnerabilidad del recurso hídrico respecto a actividades. Gestión ambiental.
17. Fohrer N., S. Haverkamp, K. Eckhardt, & H. G. Frede (2001). Hydrologic Response to land use changes on the catchment scale. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: *Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26.
18. Fundación Chile (2018). Radiografía del Agua: Brechas y riesgos hidrológicos en Chile, Escenarios Hídricos 2030. Santiago, Chile.
19. González-Reyes, Á., & A. Muñoz (2013). Cambios en la precipitación de la ciudad de Valdivia (Chile) durante los últimos 150 años. Bosque.

20. Gupta, H. V., H. Kling, K. K. Yilmaz, & G. F. Martinez (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* 377 (1), 80-91.
21. Heilmayr, R., C. Echeverría, R. Fuentes, & E. Lambin (2016). A plantation-dominated forest transition in Chile. *Applied geography*.
22. Huber, A., A. Iroumé, & J. Bathurst (2008). Effect of *Pinus radiata* plantations on water balance in Chile. *Hydrological processes*.
23. Huber, A., A. Iroumé, C. Mohr, y C. Frêne (2010). Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *Bosque*.
24. IDEAM, ONU y MDGIF (2009). Indicadores, tendencias y escenarios hidrológicos para el cambio climático, Programa conjunto de integración de ecosistemas y adaptación al cambio climático 12-28.
25. Iroumé, A., A. Huber, & K. Schulz (2005). Summer flows in experimental catchments with different forest covers, Chile. *Journal of Hydrology*, 300 (1-4), 300-313.
26. Iroumé, A., & H. Palacios (2013). Afforestation and changes in forest composition affect runoff in large river basins with pluvial regime and Mediterranean climate, Chile. *Journal of Hydrology*.
27. Jyrkama, M., J. Sykes, & S. Normani (2005). Recharge Estimation for Transient Ground Water Modeling. *Ground water*.
28. Lara, A., C. Little, R. Urrutia, J. McPhee, C. Álvarez-Garretón, C. Oyarzún, . . . I. Arismendi (2009). Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. *Forest ecology and management*.
29. Little, C., A. Lara, J. McPhee, & R. Urrutia (2009). Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile. *Journal of hydrology*.
30. Martínez, Y., y V. Villalejo (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería hidráulica y ambiental*.
31. Mellado, M. (2019). Análisis de la disponibilidad hídrica para la cuenca del río Duqueco considerando escenarios de cambio climático y una expansión de las plantaciones forestales hacia el año 2030. Universidad de Concepción.
32. Miranda, A., A. Altamirano, L. Cayuela, F. Pincheira, & A. Lara (2015). Different times, same story: Native forest loss and landscape homogenization in three physiographical areas of south-central of Chile. *Applied geography*.
33. Moriasi, D., J. Arnold, M. Van Liew, R. Bingner, R. Harmel, & T. Veith (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*.
34. Nahuelhual, L., A. Carmonaa, A. Lara, C. Echeverría, & M. González (2012). Land-cover change to forest plantations: Proximate causes and implications for the landscape in south-central Chile. *Landscape and urban planning*.
35. Neitsch, S., J. Arnold, J. Kiniry, & J. Williams (2005). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005.
36. Ponce, V. (1989). *Engineering Hydrology*. Englewood Cliffs. New Jersey.: Prentice Hall.
37. Ravindranath, N., S. Rao, N. Sharma, M. Nair, R. Gopalakrishnan, A. Rao . . . & G. Bala (2011). Climate change vulnerability profiles for North East India. *Current science*.
38. Sangrey, D. A., K. O. Harrop-Willims, & J. A. Klaiber (1984). Predicting ground-water response to precipitation. *ASCE J. Geotech. Eng.* 110 (7), p. 957-975
39. Stehr Gesche, A. (2008). Análisis del comportamiento hidrológico y disponibilidad de agua, bajo escenarios de cambio climático, para dos sub-cuencas cuencas del río Biobío incorporando el impacto del aporte nival en la zona cordillerana. Universidad de Concepción.

40. Stehr, A., P. Debels, J. Arumi, H. Alcayaga y F. Romero (2010). Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua*, antes *Ingeniería hidráulica en México*.
41. Takeuchi, K. (2009). Increasing vulnerability to extreme floods and societal needs of hydrological forecasting. *Hydrological sciences journal*.
42. Venetis, C. (1969). A study of the recession of unconfined aquifers. *Bull. Int Assoc. Sci. Hydrol*, 14 (4), p. 119-125.
43. Vicuña, S., R. Garreaud, & J. McPhee (2008). Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt. *Springer*.
44. Webb, A., & A. Kathuria (2012). Response of streamflow to afforestation and thinning at Red Hill, Murray Darling Basin, Australia. *Journal of hydrology*.
45. Webb, A., A. Kathuria, & L. Turner (2012). Longer-term changes in streamflow following logging and mixed species eucalypt forest regeneration: The Karuah experiment. *Journal of hydrology*.
46. Yang, D., S. Herath, & K. Musiak (2000). Comparison of different distributed hydrological models for characterization of catchment spatial variability. *Hydrological processes*.
47. Yue, S., & C. Y. Wang (2002). Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water resources research*, 38 (6), 4-1.
48. Yue, S., & G. Wang (2004). The Mann-Kendall Test Modified by Effective Sample Size to Detect Trend in Serially Correlated Hydrological Series. *Water resources management*.
49. Zambrano, F., B. Wardlow, & T. Tadesse (2017). Evaluating satellite-derived long-term historical precipitation datasets for drought monitoring in Chile. *Atmospheric research*.

Sebastián Hormazábal Madrid

Ingeniero Ambiental de la Universidad de Concepción, Diplomado en Geomática Aplicada de la Universidad de Chile (en desarrollo), con experiencia en el manejo de Sistemas de Información Geográficos (SIG), cartografía, modelación espacial, manejo post-proceso de imágenes de drones.

Consultor y profesional en el área de SIG, sector público y privado. Áreas de investigación y de interés: modelación espacialmente basada, teledetección, ecología del paisaje, drones.

Mauricio Aguayo Arias

Ingeniero Forestal, Licenciado en Ciencias Forestales y Doctorado en Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción, Chile. Profesor Asociado del Departamento de Ordenamiento Territorial, Facultad de Ciencias Ambientales, Centro EULA, Universidad de Concepción.

Posee numerosas publicaciones y presentaciones en congresos científicos en áreas relacionadas con ciencias ambientales, ecología del paisaje, cambio de uso del suelo, servicios ecosistémicos e hidrología.

Se sugiere citar:

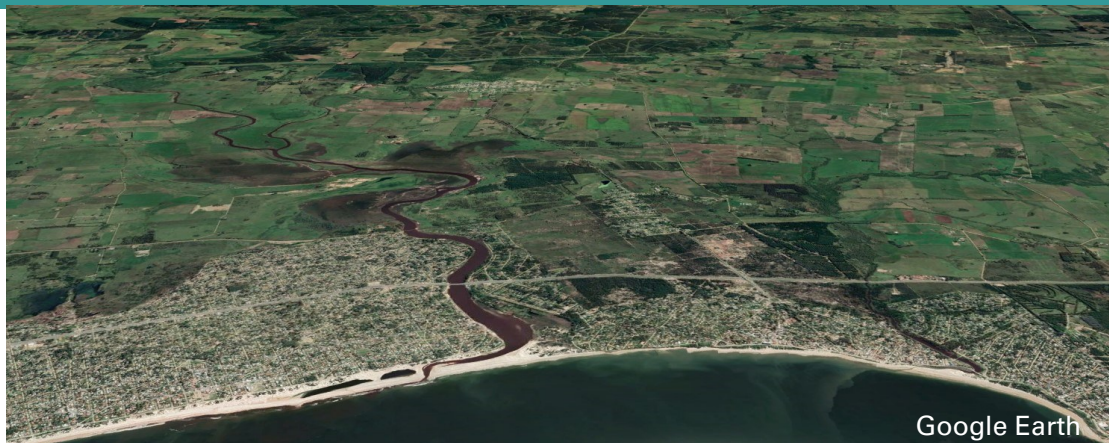
Hormazábal, S. y M. Aguayo (2021). Análisis de vulnerabilidad hídrica en la cuenca del río Muco ante un escenario de expansión forestal. *Revista Cartógrafo.CL* 1 (1), pp. 33-50.



Bajo Licencia Creative Commons
Atribución 4.0 Internacional.



Cartógrafo.CL/01-2021



Néstor López Dos Santos

Licenciado en Geografía
Universidad de la República

Uruguay



nlopezuy@gmail.com

Caracterización dasimétrica para Uruguay

auxiliada por el mapa de uso y cobertura del suelo (*)

RESUMEN

El presente trabajo corresponde a un estudio teórico-metodológico de un tema de interés geográfico, relacionado con la distribución de la población y el análisis espacial.

La inquietud fundamental fue conocer y emplear nuevas formas de abordaje metodológico en la representación y transformación de los formatos de las unidades geográficas para Uruguay, en particular, sobre la cartografía dasimétrica, que corresponde al ajuste de la densidad de población con el uso de la cobertura terrestre. Los datos públicos del Censo de Población (Instituto de Estadísticas) y el Mapa de Cobertura del Suelo del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, y la sincronía de relevamiento para el año 2011, suministraron un marco óptimo para la aplicación dasimétrica en Uruguay.

Analizar las características de las unidades geográficas y el cambio de escalas de representación, así como diferentes técnicas dasimétricas de desagregación y agregación de población, han orientado la elección de tres formas de caracterización en la tesis: Ponderación Areal Modificada, Método Dasimétrico Inteligente y Cálculo proporcional por área de un *grid* de 1km.

Los mapas dasimétricos resultantes, los indicadores, la cartografía de error y los análisis estadísticos han determinado que los tres métodos tuvieron una representación y nivel de significación positiva. Ello posibilita el uso adecuado para situaciones del desconocimiento de la distribución de población propia de los mapas coropléticos.

La aplicación de métodos dasimétricos permite una mejor aproximación a la distribución de población en el territorio uruguayo, constituyéndose en una herramienta significativamente útil para el análisis territorial.

(*) Texto completo del trabajo en: <https://n9.cl/ku2nc>

INTRODUCCIÓN

La presente investigación^(*) realiza un estudio teórico y metodológico concerniente a la distribución de población y su análisis espacial. La inquietud principal fue emplear nuevos abordajes metodológicos de representación y tratamiento de datos geográficos de Uruguay. En particular, sobre la cartografía dasimétrica, que corresponde a la adaptación de la densidad poblacional a partir del uso de un dato complementario, por ejemplo, la cobertura terrestre.

El interés sobre cuestiones geográficas de importancia social, ambiental o económica impulsa a generar nuevos planteamientos teóricos y metodológicos para hallar respuestas y soluciones actuales. Temáticas como crecimiento poblacional, cambios en el uso del suelo terrestre, desarrollo productivo, aumento de manchas urbanas, hacinamiento, e incluso, la estimación de personas afectadas por un desastre natural, permiten crear técnicas y herramientas novedosas, y así, generar nuevos datos y cartografías que refuercen una mejor planificación del territorio.

Actualmente, desde la academia, ámbito público y privado, se han desarrollado diferentes formas de interpretar la ubicación aproximada de la población, disponiendo de un innumerable set de métodos para representar la técnica dasimétrica, y a la par, proponer acciones de gestión. Europa y Estados Unidos inicialmente, así como algunos países asiáticos, son los que han tomado muy seriamente esta preocupación. Institutos de estadística nacionales y universidades han elaborado herramientas para determinar modos de representación cartográfica de variables demográficas sin vulnerar el atributo del secreto estadístico. Por otro lado, las contribuciones conceptuales y metodológicas de distintas organizaciones, para conocer y medir los cambios y permanencias de la superficie terrestre y su uso, han potenciado el desarrollo de múltiples sistemas de clasificación de la cobertura terrestre. El Land cover (cobertura terrestre) se considera un indicador de relevancia en el diagnóstico y la planificación territorial.

En instancias de la investigación, la nutrida disponibilidad de antecedentes técnicos y la accesibilidad a datos nacionales suministran un marco óptimo para la aplicación dasimétrica en Uruguay (Figura 1). El Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) generó el Mapa de Uso y Cobertura del Suelo para el año 2011, así como, el Instituto Nacional de Estadística (INE) realizó el Censo de Población 2011. Ambos marcos de información que, por su concordancia temporal, facilitaron la propuesta de construcción dasimétrica para Uruguay.

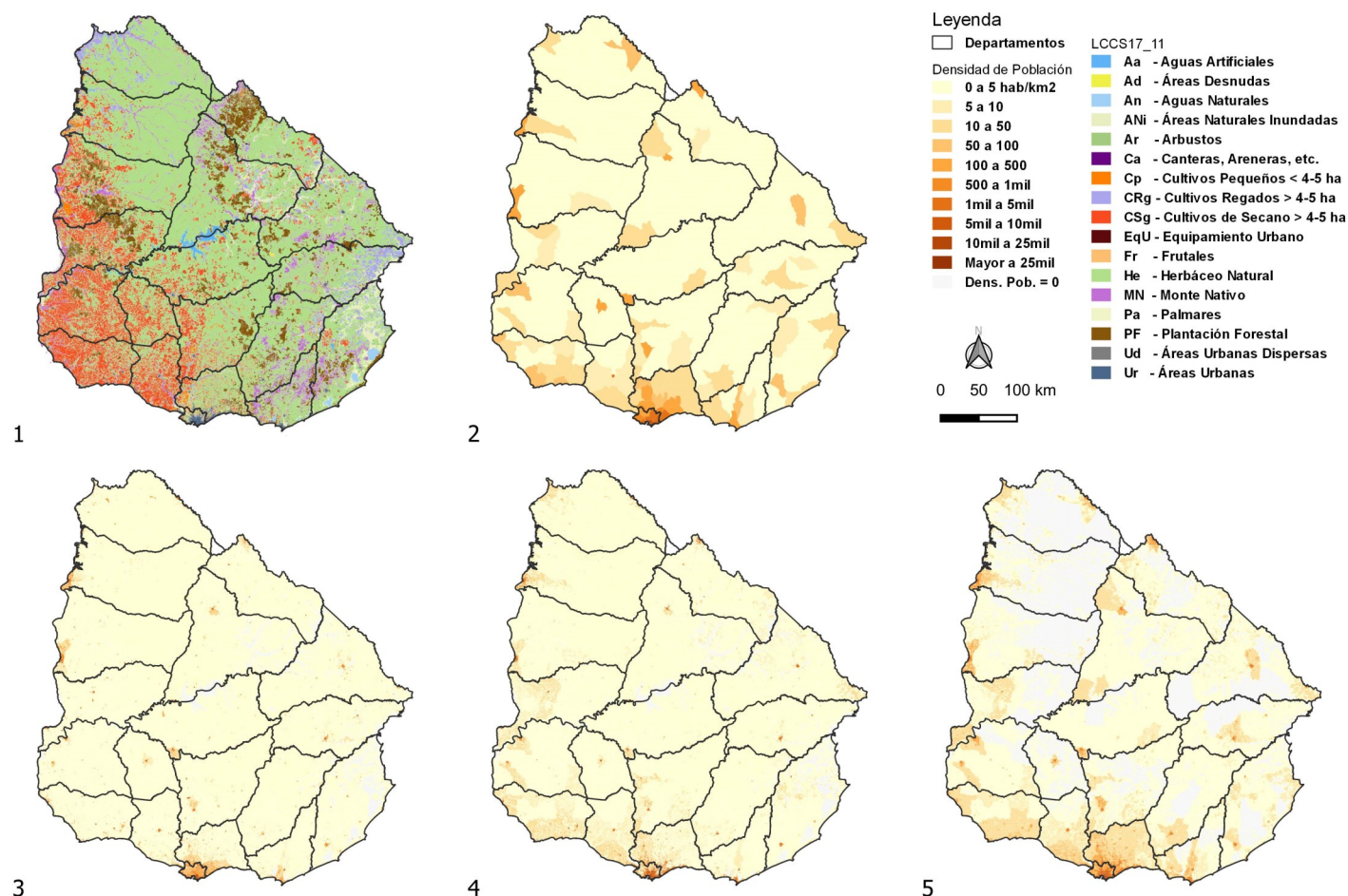
El objetivo general fue construir una representación de diferentes unidades geográficas hacia una caracterización de la densidad de población según la cobertura terrestre. Como objetivos específicos: investigar las distintas formas de representación de densidad de la población en el contexto científico-técnico; analizar las características de las unidades geográficas y las diferentes metodologías de cambio y/o transformación de los formatos y escalas de representación; aplicar y comparar algunas opciones metodológicas para representar la densidad de población según la cobertura terrestre; elaborar conclusiones que permitan indicar las limitaciones metodológicas y las recomendaciones pertinentes en los métodos de agregación y desagregación de los datos geográficos, para su aplicación en Uruguay.

(*) Proyecto de Investigación de la asignatura "Seminario de Tesis", Orientación Técnicas de análisis territorial / Geomática, de la Licenciatura en Geografía, Facultad de Ciencias, Universidad de la República (UDEAR), Uruguay, defendida a fines de 2017. Tutora: PhD. Virginia Fernández Ramos, y Co-tutor: PhD. Germán Botto Núñez.

En marzo de 2019, fue galardonada con el 2do. Premio del XIX Premio Internacional Francisco Coello, de la Universidad de Jaén (UJA), España, distinción dirigida a Trabajos Fin de Grado (TFG) y a Trabajos Fin de Máster (TFM) en el ámbito de la Ingeniería Geomática.

En noviembre de 2019, fue distinguida con Mención por el Premio Nacional de Urbanismo 2019 del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) de Uruguay, categoría de Trabajos de estudiantes - Monografías y tesis de grado.

Finalmente, hay que mencionar que por Ley N° 19889 (09/07/2020) el MVOTMA se dividió en Ministerio de Ambiente (MA) y Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial (MVOT), quedando en este último organismo la publicación oficial de los datos de cobertura de suelo utilizados en esta investigación.



MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar el proyecto de investigación fue necesario indagar sobre los requerimientos y parámetros de las técnicas existentes, operatividad y dificultades de implementación, los resultados y las formas de evaluar la calidad de información. Así como, reconocer específicamente, los métodos dasimétricos actuales e innovadores para tener una cabal comprensión de la problemática de estudio y hallar su uso adecuado.

El marco teórico se nutrió de conceptos actualizados de análisis espacial y Sistemas de Información Geográfica (SIG), y para valorar la técnica de representación cartográfica, se profundizaron sobre las características de los formatos de los datos geográficos. Particularmente, nos interesó conocer la problemática SIG en la superposición de datos geográficos, los efectos en atributos y geometría, así como, los conflictos en la representación del fenómeno geográfico, dadas por la elección de la escala y unidad de análisis.

Nuestra investigación se importó con el concepto de cambio de escala o escalado (*scaling*), ligado a la extensión, espaciamiento y el soporte de las observaciones (Barrios Peña, 2009), e identificó dos tipos distintivos: de desagregación o reducción de escala (*downscaling*), descomponiendo información de forma descendente a unidades menores; y de agregación o aumento de escala (*upscaling*), transfiriendo la información de manera ascendente a unidades mayores.

Se tiene también presente el concepto de error en la aplicación de distintos procesamientos y formatos de representación, y con ello, incorporar bibliografía sobre el manejo de los datos y las incidencias en la cartografía. Por ejemplo, Gotway & Young (2002) advierten sobre la incompatibilidad y modos de inferen-

Figura 1. Mapas de Uruguay:

- 1) Mapa de Uso y Cobertura del Suelo 2011, MVOTMA.
- 2) Mapa coroplético de Densidad de población INE 2011 por Secciones censales.
- 3) Mapa Método 1 (Ponderación Areal Modificada).
- 4) Mapa Método 2 (Método Dasimétrico Inteligente).
- 5) Mapa Método 3 (Cálculo proporcional por área: *grid* 1km).

Mapas 3-4-5 son resultados del Modelo de Coeficientes 3 y Base Vectorial.

cia de los datos, derivando en los clásicos problemas de la unidad de área modificable (PUAM), zonificación, falacia ecológica, alineación y bordes distintos, y el problema en el cambio de soporte. Como procedimientos claves recomiendan la importancia del análisis estadístico y el uso de métodos eficientes en la transferencia de datos.

Uruguay hasta ese momento representaba la Densidad de población –relación entre población y superficie de un territorio– a partir de las unidades geoestadísticas utilizadas por el INE (departamentos, secciones, segmentos y zonas censales).

Es importante tener presente, que la representación del uso de la tierra posee una importancia vital para la humanidad, ya sea por la necesidad de reconocer los recursos existentes como su dinamismo y afectaciones. En este contexto han surgido varios sistemas de descripción y clasificación de la tierra desde la década de 1960, algunos de carácter nacional, regional o global. En Uruguay existen varias cartografías oficiales de interés territorial, tanto por sus implicaciones productivas como de ordenamiento territorial. En nuestro caso de estudio, el Mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay se generó a partir del Sistema de Clasificación denominado Land Cover Classification System (LCCS), desarrollado por la Global Land Cover Network (GLCN) de la FAO¹ y la UNEP².

Con el interés de obtener un indicador más ajustado y eficiente de la representación demográfica, se investigaron los antecedentes académicos e institucionales, y entre ellos, trascendió la técnica de mapa dasimétrico, que resultaba ser una herramienta útil a este propósito. Regueira *et al.* (2013) define este concepto como un “mapa de coropletas en el que las áreas estadísticas se subdividen en áreas de homogeneidad relativa basándose en informaciones complementarias”.

En la investigación se presentaron varias técnicas dasimétricas y métodos de representación de cobertura y uso del suelo mundial, útil como información auxiliar. Finalmente, se seleccionaron tres formas de caracterización dasimétrica para aplicar en Uruguay (Figura 2), con variables y ecuaciones para desagregación de población en las 231 secciones censales, aplicando el Método 1 (Ponderación Areal Modificada) y/o el Método 2 (Método Dasimétrico Inteligente), y de agregación de población, utilizando el Método 3 (Cálculo proporcional por área de un *grid* de 1 km).

Para el Método 1 se tuvieron en cuenta los aportes de Gallego & Peedel (2001), Bielecka (2005, 2007), Rosina *et al.* (2012) y Goerlich y Cantarino (2012). De ellos se consideraron las ecuaciones y coeficientes de ponderación de distribución de población por cada tipo de cobertura de suelo, obtenidos de procesos iterativos (conocido como CLC-iterativo). Para el Método 2, los trabajos de Mennis y Hultgren (2006) y Batista e Silva (2009), que se basan en la estimación de población por unidad censal y su redistribución según el área de cada cobertura dentro de esa unidad censal. Para el Método 3, se estudiaron las sugerencias de Milego y Ramos (2011) y Goerlich y Cantarino (2012), que logran las estimaciones de agregación de población por cada celda *grid*, a partir de la suma de la proporcionalidad ponderada de la población según el área y el tipo de cobertura de suelo.

Inicialmente, para emplear los métodos, se realizaron ajustes en los atributos y la topología de las capas de cobertura terrestre y secciones censales. Conjuntamente, se prepararon tres formatos geométricos: una capa vectorial con la intersección entre secciones censales y cobertura (BV: Base Vectorial), una cuadrícula vectorial de 100 m, derivada de la rasterización del dato anterior (BRV: Base Raster-Vectorial), y una cuadrícula vectorial de 1 km (Base *grid*), que contenía 177.474 celdas para todo el Uruguay.

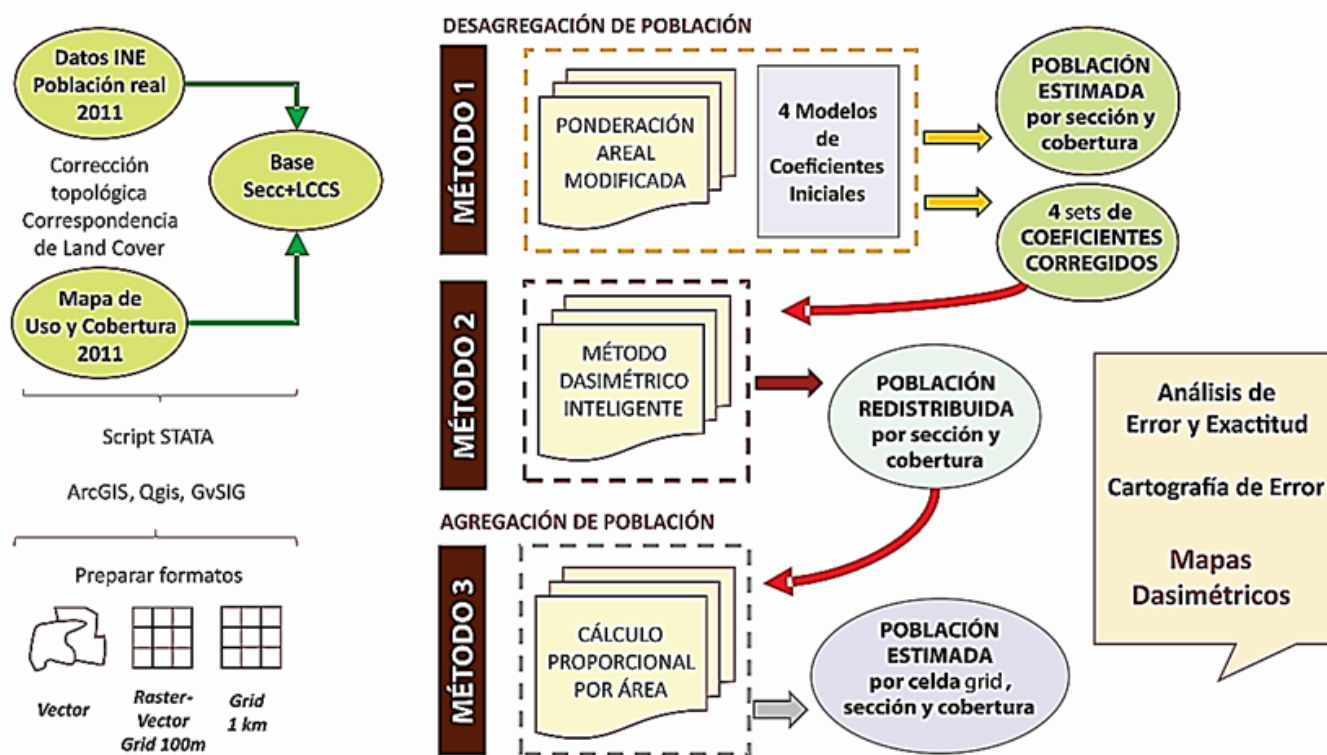
En la aplicación del Método 1, se determinaron cuatro Modelos de Coeficientes (MC) de distribución dasimétrica de la población (Tabla 1). El MC 1 considera todas las coberturas con el mismo nivel de distribución, por lo tanto, los coeficientes teóricos son de valor 1, como propone Rosina *et al.* (2012). El MC 2 considera los coeficientes iniciales de Gallego & Peedel (2001). El MC 3 considera los coeficientes finales de Gallego & Peedel (2001) y Bielecka (2005). El MC 4, creado en el marco de esta investigación, resulta de la adaptación a datos de Uruguay, y corresponde al porcentaje de población por cobertura del suelo, según una distribución aleatoria de la población 2011 por zonas censales INE.

¹Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés).

²Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente-PNUMA (UNEP por sus siglas en inglés).

Por otro lado, también hubo que adaptar los coeficientes teóricos al sistema de clasificación de cobertura terrestre (LCCS de FAO) de Uruguay, pues los modelos MC 2 y MC 3 utilizaban el sistema europeo CORINE Land Cover (CLC). Para ello, se adaptaron los coeficientes de las categorías de cobertura en bibliografía, y así, hallando los equivalentes más acordes.

Metodología Aplicada



En todos los casos, se procesaron las bases de datos unificadas (con datos censales y de cobertura) con scripts elaborados con el paquete estadístico *Stata*, para hallar las estimaciones de distribución de población y los nuevos coeficientes por cobertura terrestre. Los tres Métodos utilizaron los cuatro Modelos de coeficientes, y en estudios separados, una de las dos bases geométricas de entrada en la programación (Vectorial y Raster-Vectorial).

Al mismo tiempo, se hallaron los valores globales de diferencia entre población de referencia y estimada, y se calcularon indicadores de discrepancia absoluta Δ (equivalente al Error Total Absoluto), variando entre 0 y 2 veces el total de población de la unidad de análisis; indicadores de discrepancia relativa δ , re-escala entre [0,1] del anterior indicador; y el índice $100 \times \delta$, correspondiente al valor δ en porcentaje.

Para medir las diferencias, en el Método 1 se emplearon la población por departamento y sección censal, y para el Método 2, se usaron la población real por sección censal con la población estimada y definida por los coeficientes obtenidos con el Método 1. En el Método 3, se coteja una población "real" ficticia por celda *grid* de 1 km, construida a partir de puntos aleatorios de población 2011 por zona censal, con las estimaciones de agregación por celda obtenidas a partir de la población estimada por cada cobertura y sección censal del Método 2. Como se observa la aplicación del Método 1 fue fundamental para desarrollar e implementar teóricamente los Métodos 2 y 3.

Figura 2. Esquema metodológico de preparación de los datos geográficos y aplicación de los tres métodos dasimétricos propuestos. De ello resultaron diferentes estimaciones, para el cual se prepararon cartografías dasimétricas y de error, así como, gráficos del análisis de error.

Se complementa la verificación de los resultados, con el análisis de exactitud y error del método aplicado. Inicialmente se realizaron cálculos de correlación – Coeficiente de Pearson (R) y Coeficiente de determinación (R^2)– y nivel de significancia (α) para cada estimación de población; así como, los residuales de las observaciones. Para ello, se utilizaron los test estadísticos más frecuentes en estas aplicaciones geodemográficas: la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE) –rango $[0, \infty]$, entre la estimación perfecta y valores muy altos de menor ajuste–; el Error Total Absoluto (TAE) –rango $[0, (2 * Pt)]$, entre cero a dos veces la población total del área de estudio–; el Error Medio Absoluto (MAE) y el Error Total Absoluto Relativo (RTAE) –rango $[0, 2]$ –.

Incluso se valoraron visualmente las estimaciones y el error desde una representación cartográfica. Para ello, se observó la desviación del resultado, sea por infraestimación o sobrestimación, y complementándose a la visualización del error absoluto y relativo. Además, se elaboró la diferencia normalizada entre la población real y estimada por sección censal, tanto gráfica como cartográficamente.

Por último, para obtener mejores resultados se realizaron ajustes en algunas etapas de la aplicación metodológica. Entre ellos, la corrección topológica inicial en la geometría, adecuación de una codificación para la intersección de las unidades entre cobertura y sección censal, preparación de leyendas cartográficas a utilizar, así como, ajustes globales en los coeficientes y métodos a aplicar.

Por ejemplo, es importante destacar que el Método 3, de agregación de las estimaciones de población por celda *grid* de 1 km, presentaba una complejidad extra dada la unión del *grid* con la geometría superpuesta de cobertura y sección censal. Por un lado, se presentaban tres formas posibles de geoprocesos y obtención de geometrías con áreas distintas por cada cobertura en una celda: polígonos Multiparte, Polígonos disueltos y/o Partes sencillas. Por otro lado, se obtendrían de forma inconcebible, valores de población con decimales, y que al recurrir al redondeo de la estimación al inicio y/o al final del proceso se lograban valores muy diferentes. Por ello, se determinó seis tipos de cálculo: Tipo 1 y 2, para polígonos Multiparte; Tipo 3 y 4, para polígonos Disueltos, y Tipo 5 y 6, para polígonos en Partes Sencillas; siendo los tipos impares la suma de población en números enteros en las celdas *grid* al inicio del proceso, y los tipos pares, la suma decimal, para realizar el redondeo al final del cálculo. Luego de algunas verificaciones, se identificaron que los tipos pares estiman mejor, y que el Tipo 2 es el más aceptable, es decir, calcula la suma de población por celda *grid* con redondeo al final y geoproceso de polígonos Multiparte.

RESULTADOS

A continuación, se presentan el análisis de la asociación entre población real y estimada para los tres métodos dasimétricos, presentando los resultados de base estadística en formato gráfico y cartográfico.

El Método 1, inicialmente posee un estudio particular sobre la cantidad de iteraciones al aplicar las sintaxis *Stata* de análisis estadístico, para obtener las estimaciones equivalentes a la población real, así como los nuevos coeficientes ajustados a Uruguay para cada MC (Tabla 1). Resultaron pocas iteraciones en general: máximo 6 en el MC 1, y mínimo 1 iteración en el MC 4. A priori, es indeterminada la razón de pocas iteraciones, quizás sea por nivel de calidad del dato de origen y/o por una sintaxis con un diseño casi óptimo. Por ejemplo, la adaptación europea de Gallego & Peedel (2001) alcanza 40 iteraciones hasta lograr una población estimada equivalente.

En lo que corresponde al análisis del grado de asociación entre las variables de población real y estimada del Método 1 (Tabla 2 y Figura 3-1), todos los casos lograron un coeficiente de correlación de Pearson (R) positivo entre 0 y 1. El MC 3 en ambos formatos obtuvo el mayor valor (BV: $R = 0,8804$; BRV: $R = 0,8800$), y el MC 1 el peor resultado (BV: $R = 0,6728$; BRV: $R = 0,6885$). En correspondencia a lo anterior, los coeficientes de determinación R^2 del MC 1 y MC 3 respectivamente fueron los valores menores (BV: $R^2 = 0,4526$; BRV: $R^2 = 0,4741$) y mayores (BV: $R^2 = 0,7751$; BRV: $R^2 = 0,7744$) de ajuste lineal entre las variables.



COEFICIENTES RESULTANTES DEL MÉTODO 1		Base Vectorial / Modelo 1 (MC1)		Base Vectorial / Modelo 2 (MC2)		Base Vectorial / Modelo 3 (MC3)		Base Vectorial / Modelo 4 (MC4)	
Categorías del Mapa de Cobertura y Uso del Suelo LCCS 2011		Coeficientes Valor 1		Coeficientes Iniciales Europeos entre 0 y 32		Coeficientes Finales Europeos entre 0 y 176		Coeficientes Adaptados a Uruguay 2011	
MVOTMA Uruguay		Coeficiente Inicial Teórico	Coeficiente Final (6 iteraciones)	Coeficiente Inicial Teórico	Coeficiente Final (5 iteraciones)	Coeficiente Inicial Teórico	Coeficiente Final (3 iteraciones)	Coeficiente Inicial Teórico	Coeficiente Final (1 iteración)
Cód.	Categoría		Valor promedio		Valor promedio		Valor promedio		Valor promedio
Aa	Aguas Artificiales	1	2,65	0	0	0	0	0	0
Ad	Áreas Desnudas	1	3,45	0	0	0	0	0	0
An	Aguas Naturales	1	3,43	0	0	0	0	0	0
ANi	Áreas Naturales Inundadas	1	4,91	0	0	0	0	0	0
Ar	Arbustos	1	2,90	1	2,11	0,5	0,65	0,17	0,19
Ca	Canteras, Areneras, Minas a Cielo Abierto	1	4,67	0	0	0	0	0	0
Cp	Cultivos Regados y de Secano < 4-5 has	1	4,90	5	14,75	6	9,07	0,87	1,07
CRg	Cultivos Regados > 4-5 has	1	3,45	3	6,60	3	3,66	0,14	0,17
CSg	Cultivos de Secano > 4-5 has	1	2,98	3	6,07	3	3,98	1,43	1,76
EqU	Equipamiento Urbano	1	4,49	1	2,87	10	15,29	0,24	0,29
Fr	Frutales	1	4,77	5	14,11	6	8,60	0,24	0,30
He	Herbáceo Natural	1	0,89	1	0,87	0,5	0,43	5,4	4,33
MN	Monte Nativo	1	2,49	1	1,82	0,5	0,59	0,74	0,77
Pa	Palmares	1	5,39	1	3,51	0,5	0,80	0	0
PF	Plantación Forestal	1	1,20	1	1,07	0,5	0,49	0,95	0,91
Ud	Áreas Urbanas Dispersas	1	4,65	5	14,38	176	259,29	7,53	9,17
Ur	Área Urbana	1	5,11	32	96,85	176	295,68	82,21	101,60

Tabla 1. Coeficientes iniciales y resultantes de la aplicación de cuatro Modelos de Coeficientes en base a la bibliografía, según el Método Dasimétrico 1. Aquí se presentan los valores promedios resultantes del proceso de iteración de las sintaxis Stata, utilizados para crear (o recrear) los mapas dasimétricos según este método.

En el análisis del nivel de asociación de estimaciones según el Método 2 (Tabla 2), los cuatro MC y los dos formatos, se lograron coeficientes $R = 1$ y coeficientes de determinación R^2 también valor 1. Aunque esto representa un resultado dudoso, deviene porque la población de entrada y la estimada sumada en cada sección censal presentan valores muy similares.

En el Método 3 y agregación Tipo 2 resultaron con coeficientes R positivos entre 0 y 1 (Tabla 2 y Figura 3-3). El MC 3 fue el que mostró el mejor resultado (BV: $R = 0,9297$; BRV: $R = 0,9283$) y el MC 1 obtuvo el menor valor (BV: $R = 0,8240$; BRV: $R = 0,8274$). En correspondencia con lo anterior, los coeficientes R^2 del MC 1 y MC 3, respectivamente, fueron los valores menores (BV: $R^2 = 0,6789$; BRV: $R^2 = 0,6845$) y mayores (BV: $R^2 = 0,8644$; BRV: $R^2 = 0,8617$) de ajuste lineal entre las variables.

El nivel de significancia en los tres Métodos dasimétricos, para el 95% de intervalo de confianza, y los 8 MC (4 Vectorial y 4 Ráster-Vectorial), lograron un p-valor menor a 0.0001, indicando la característica de extremadamente significativo.

A partir del cálculo de error por sección censal de la estimación de población, se prepararon mapas de error relativo y de diferencia normalizada para Uruguay según los tres Métodos, los cuatro Modelos de coeficientes y ambos formatos geométricos (BV y BRV). En los mapas del Método 1 (Figura 4-1), resultaron para todos los MC, sobrestimaciones de población en la mayoría de las secciones censales "rurales", e infraestimaciones en Secciones "urbanas". Este problema ya lo había advertido Gallego & Peedel (2001) en la aplicación europea. Se reconoció infraestimación considerable en el centro de Montevideo, capitales departamentales y localidades de población. Las Secciones más periféricas o del interior de los departamentos se caracterizaron en general por tener algún nivel de sobrestimación. En el caso de los mapas normalizados los patrones mantuvieron la representación relativa de diferencia de población.

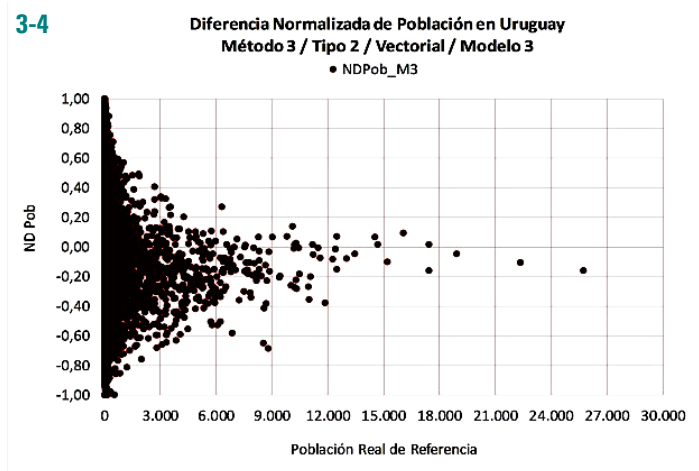
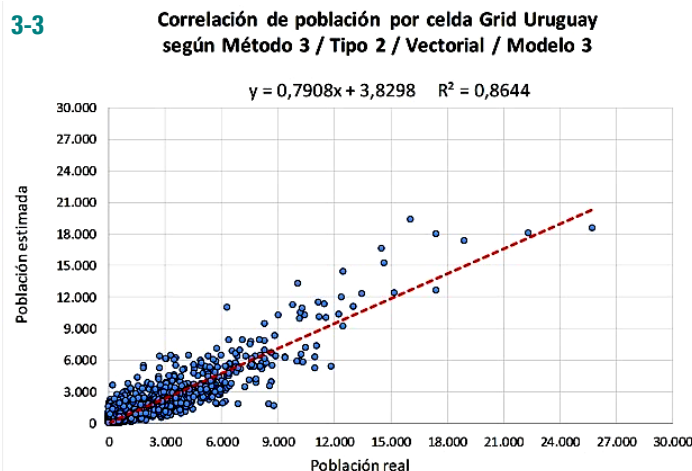
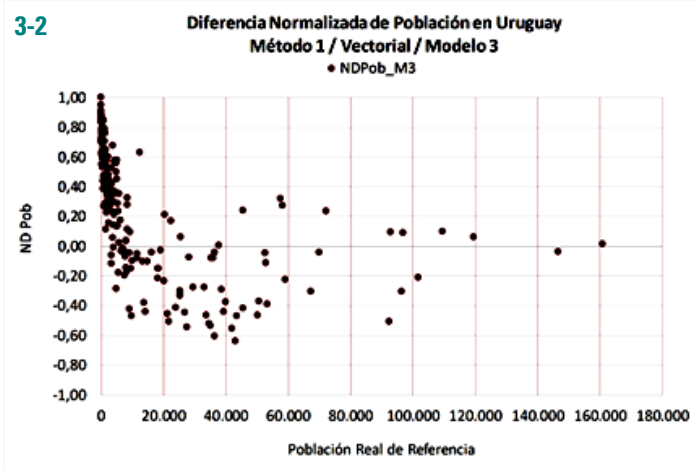
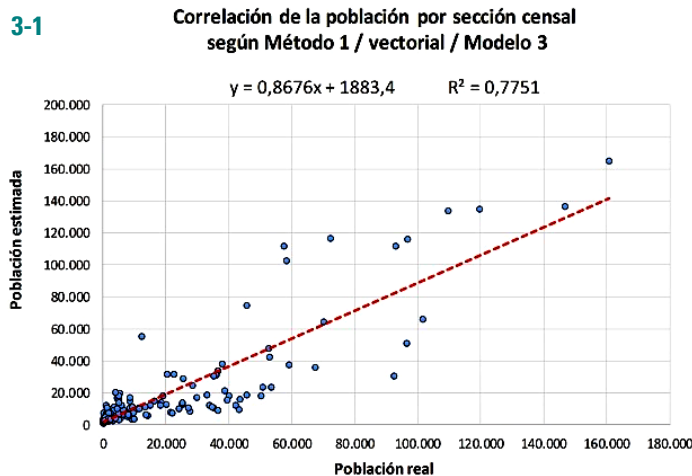
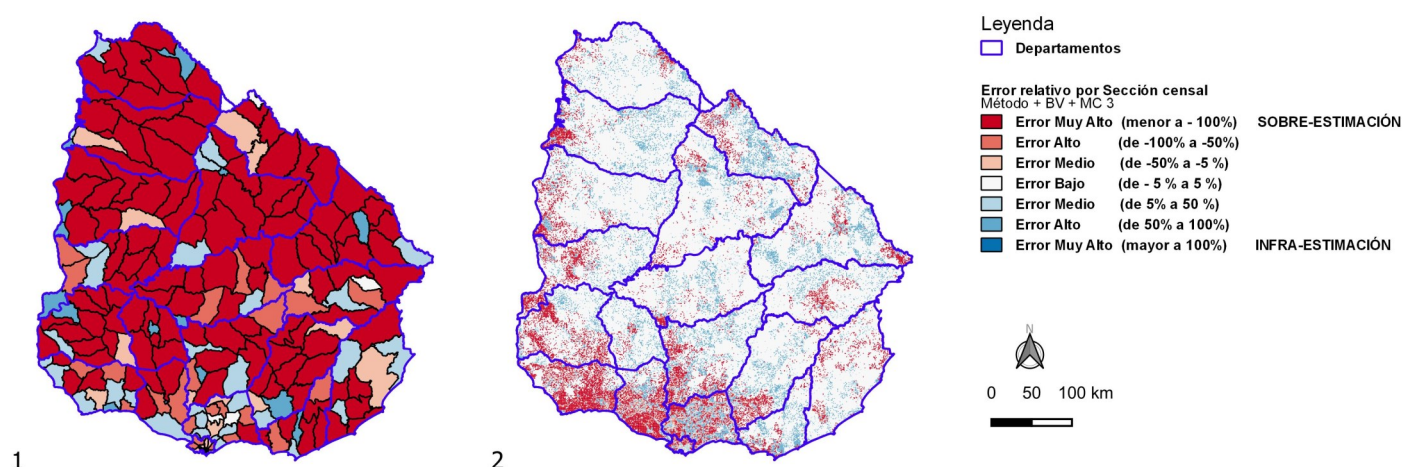


Figura 3. Análisis estadístico de los Métodos Dasimétricos 1 (de desagregación de población) y 3 (agregación del Tipo 2), según la base Vectorial y el Modelo de Coeficientes 3. Se presentan los gráficos de Correlación (1 y 3), indicándose el valor de Coeficientes de determinación R^2 , y de Diferencia normalizada (2 y 4) entre población real y estimada de 231 Secciones censales de Uruguay.

El Método 2 obtuvo errores de estimación entre un “-5% a 5%” del valor de población en las 231 secciones censales, en ambos formatos geométricos, resultando valores infraestimados y sobrestimados y una cartografía de error poco representativa. Como mencionado previamente, este método considera que la población inicialmente introducida en el algoritmo se mantenga íntegramente cuando realiza la redistribución, sin haber pérdidas por redondeo o asignación espacial.

En el Método 3, de agregación de población en un *grid* de 1km, los valores gráficos y cartográficos (Figura 4-2) resultaron de las diferencias entre población real y estimada en las 177.474 celdas del país. En todos los MC se observa una sobrestimación de población, principalmente en celdas suburbanas de alrededores de capitales departamentales y la franja sur del país con actividades indicativas de una dinámica metropolitana o de pequeñas localidades interconectadas. La infraestimación se verifica en el centro de ciudades importantes y algunas localidades urbanas dispersas, y una distribución dispersa en el entorno rural. Este error acompaña la tendencia detectada en el Método 1. El grupo de “- 5% a 5%” de bajo error estimado, incluyó la mayoría de las celdas en los 4 MC, indicando un buen desempeño general. Por ej., el error estimado de este grupo en base Vectorial, representó en el MC 1 el 72,59% de celdas incluidas, en MC 2 el 73,38%, en MC 3 el 73,94% y en MC 4 el 73,05%.



En consonancia, los indicadores de error y exactitud propuestos (RMSE, TAE, MAE y TAE) para el Método 1, se obtuvieron las mismas tendencias en el análisis de los 4 MC y los dos formatos geométricos. El MC 3 (Tabla 2) presentó los indicadores de menor desviación, seguido del MC 2. El peor rendimiento de ajuste de modelos de distribución de población según cobertura del suelo lo obtuvo el MC 1 (que utiliza los coeficientes valor 1). En el caso del Método 2, el MC 4 (coeficientes adaptados a Uruguay 2011) representó a los valores de menor desviación, seguido del MC 2. El peor rendimiento lo obtuvo el MC 1 en los cuatro indicadores. El indicador RTAE (Vectorial) presentó valores demasiado bajos, casi nulos. En el Método 3 Tipo 2, el MC 3 representó a los valores de desviación menores, seguido del MC 4. El peor rendimiento de ajuste lo obtuvo el MC 1 en los cuatro indicadores.

En los análisis de los índices de discrepancia absoluta Δ (equivalente a TAE), el índice de discrepancia relativa (δ) y el índice $100 \times \delta$, se estimaron los resultados para Uruguay y cada uno de los 19 Departamentos. Por ejemplo, el Método 1, BV y MC 3 obtuvo el valor más bajo de discrepancia absoluta y relativa ($\Delta = 1.684.347,24$; $\delta = 0,26$; $\delta \times 100 = 25,63$), y el MC 1 el más alto ($\Delta = 2.798.748,90$; $\delta = 0,43$; $\delta \times 100 = 42,59$). A nivel departamental, para los 4 modelos, se identifica en Montevideo al mínimo del conjunto (MC 1: $\delta = 0,24$; MC 2: $\delta = 0,15$; MC 3: $\delta = 0,17$; MC 4: $\delta = 0,15$) y en Flores al valor máximo (MC 1: $\delta = 0,82$; MC 2: $\delta = 0,76$; MC 3: $\delta = 0,59$; MC 4: $\delta = 0,77$). Coincide que Montevideo es el departamento de

Figura 4. Mapas de Error para Uruguay:

- 1) Error Relativo por Sección censal, según el Método 1 de desagregación, Modelo de Coeficientes 3 y Base Vectorial.
- 2) Error Relativo por Celda *grid* de 1 km, según el Método 3 / Tipo 2 de agregación, Modelo de Coeficientes 3 y Base Vectorial.

La leyenda en color rojo representa las sobrestimaciones y en azul las infraestimaciones de población.

mayor población (1.318.755 habitantes) y Flores el de menor población del país (25.050 habitantes).

En el Método 2, al obtener un total de población casi similar a la población real, en todos los modelos se alcanzaron valores casi nulos de discrepancia de población ($\delta = 0,00$; $\delta \times 100 = 0,00$), a pesar de que presentaran valores de discrepancia absoluta de 158, 130, 134 y 115 habitantes, respectivamente, entre los MC 1 al 4 (BV) o de 161, 127, 124 y 123 habitantes (BRV). Esto demuestra en parte, que la estimación en el Método 2 no es exacta.

Según el Método 3 Tipo 2, el MC 3 presentó el valor más bajo de discrepancia relativa ($\delta = 0,28$; $\delta \times 100 = 27,81$) y el MC 1 el más alto ($\delta = 0,52$; $\delta \times 100 = 51,95$). Incluso a nivel departamental se llegó a estos máximos y mínimos en conjunto, identificándose que Montevideo logra para los 4 MC el mínimo del conjunto (MC 1: $\delta = 0,22$; MC 2: $\delta = 0,15$; MC 3: $\delta = 0,16$; MC 4: $\delta = 0,15$). En el caso de los valores máximos, Flores era el de mayor valor de discrepancia absoluta (como en el Método 1), pero para el índice de discrepancia relativa tuvo a Río Negro como máximo para MC 1: $\delta = 0,90$; MC 2: $\delta = 0,76$, y MC 3: $\delta = 0,59$; y Lavalleja fue el máximo para el MC 4: $\delta = 0,77$.

Análisis estadístico		Base Vectorial / Modelo de coeficientes				Base Raster-Vectorial / Modelo de coeficientes			
Método dasimétrico	Parámetros	Población Real y MC 1	Población Real y MC 2	Población Real y MC 3	Población Real y MC 4	Población Real y MC 1	Población Real y MC 2	Población Real y MC 3	Población Real y MC 4
Método 1	Coefficiente R^2	0,4526	0,6922	0,7751	0,6183	0,4741	0,6778	0,7744	0,6180
	Coefficiente R	0,6728	0,8320	0,8804	0,7863	0,6885	0,8233	0,8800	0,7861
	RMSE	20.367	14.411	12.425	16.121	19.764	14.763	12.455	16.132
	RTAE	0,85	0,65	0,51	0,75	0,84	0,67	0,51	0,75
	Indicador δ	0,43	0,33	0,26	0,37	0,42	0,33	0,26	0,37
Método 2	Coefficiente R^2	1	1	1	1	1	1	1	1
	Coefficiente R	1	1	1	1	1	1	1	1
	RMSE	0,95	0,82	0,83	0,74	0,96	0,81	0,81	0,81
	RTAE	0,00005	0,00004	0,00004	0,00003	0,00005	0,00004	0,00004	0,00004
	Indicador δ	0	0	0	0	0	0	0	0
Método 3 (Tipo 2)	Coefficiente R^2	0,6789	0,8519	0,8644	0,8553	0,6845	0,8450	0,8617	0,8553
	Coefficiente R	0,8240	0,9230	0,9297	0,9248	0,8274	0,9192	0,9283	0,9248
	RMSE	170,63	118,00	112,59	116,13	169,25	120,49	113,50	116,05
	RTAE	1,04	0,68	0,55	0,67	1,03	0,70	0,56	0,67
	Indicador δ	0,52	0,34	0,28	0,33	0,51	0,35	0,28	0,33

Tabla 2. Resultados del análisis estadístico entre la población estimada y real de los Métodos Dasimétricos 1, 2 y 3, según las bases Vectorial y Ráster-Vectorial, y los cuatro Modelos de Coeficientes derivados del Método 1. Se presentan los valores de Coeficientes de determinación R^2 , Coeficientes de Pearson R, indicadores de error RMSE (rango $[0, \infty)$ y RTAE (rango $[0, 2]$), y el indicador de discrepancia relativa δ , entre población real y estimada de Secciones censales de Uruguay.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta investigación constituye una contribución novedosa a la representación cartográfica de la densidad de población en Uruguay. Actualmente, la cartografía nacional de densidad de población procede principalmente de mapas coropléticos según los distintos niveles de unidad censal; técnica de población/área censal, que nos parece correcta, pero limitada. Dada la importante bibliografía del tema dasimétrico y las diferentes adaptaciones regionales y nacionales, exploramos y seleccionamos los métodos más factibles de producción, ya sea por su aplicación sencilla como por las unidades geográficas más pertinentes.

La elección de tres métodos, dos de desagregación (Método 1, Ponderación Areal Modificada, y Método 2, Dasimétrico Inteligente) y uno de agregación de información (Método 3, Cálculo proporcional de área), proporcionó un abanico de posibilidades para la implementación y realización de mapas temáticos originales en futuras instancias. Estas alternativas están asociadas a la aplicación y estudio de dos unidades de trabajo: las unidades censales (en Método 1 y 2, donde se utilizó la información de sección censal cruzada con la cobertura del suelo) y el *grid* en base a celdas de 1 km x 1 km (utilizada en el Método 3). Pero más allá de este estudio operacional, se estimó la conveniencia del uso de dos formatos de construcción geométrica: Vectorial (cruce simple de las unidades censales y cobertura del suelo) y Ráster-Vectorial (capa vectorial “rasterizada” en una cuadrícula de 100 m x 100 m, posteriormente “vectorizadas”, indagando sobre situaciones similares con datos originalmente ráster).

A continuación, se indican las conclusiones y recomendaciones más importantes de la investigación:

1. Promover una adecuada topología y delimitación de los datos geográficos de entrada, que faciliten su integración y alineación, y en este sentido, evaluar la necesidad de lograr un *grid* como estándar nacional de geometrías multinivel codificadas (por ej., 50, 10, 1 km);
2. Obtención de un buen nivel de correlación y significancia estadística en los Métodos dasimétricos aplicados, aunque se sugiere utilizar el Modelo de Coeficientes 3 y/o 4;
3. En la aplicación del Método 1 se observó que las unidades espaciales (secciones censales) con mayor área y/o con menor cantidad de población tienen menores desviaciones en las estimaciones de error, facultando la oportunidad para futuros estudios sobre esos casos particulares;
4. El Método 3 logra los mejores resultados en todos los modelos de coeficientes y entre los tres Métodos, e incluso, esta técnica fue útil en la representación del *grid* de 1 km, utilizando solamente los datos coropléticos de población por zona censal;
5. Se propone investigar escalas a partir del uso de unidades censales menores a sección censal y/o cobertura de suelo de mayor resolución, y coeficientes para nuevas categorías o grupos de cobertura de suelo, así como, investigar nuevos métodos estadísticos y/o dasimétricos para ajustar mejor la representación;
6. Se propone que el INE y el MVOTMA se apropien de los resultados de la investigación para aplicaciones futuras y la planificación del territorio, y se sugiere que en años de censos de población se realicen mapas de cobertura de suelo.

Por último, en relación con los mapas dasimétricos resultantes, es bastante revelador, independiente del nivel de exactitud de un Método o Modelo de Coeficientes adoptado, la mejora en la representación de la densidad demográfica en el territorio nacional. Es fundamental el hecho de no distribuir población en zonas de coberturas de aguas, canteras, áreas desnudas y humedales, por ser categorías de suelo no habitables, y que en los mapas de los Modelos de Coeficientes 2, 3 y 4, se representan sin población, es decir, con valor 0. Así como de identificar, en contra-

parte, la huella de la alta densidad de población en localidades y centros urbanos de importancia.

El trabajo confirma la valiosa capacidad que genera este tratamiento de escalamiento y cambio de soporte, sea por desagregación o agregación de datos (Figura 5). Ello posibilita el uso adecuado para situaciones en que se desconoce la distribución de población propia de los mapas coropléticos. Por lo tanto, la aplicación de métodos dasimétricos permite una mejor aproximación a la distribución de población en el territorio uruguayo, constituyéndose en una herramienta significativamente útil para el análisis territorial.

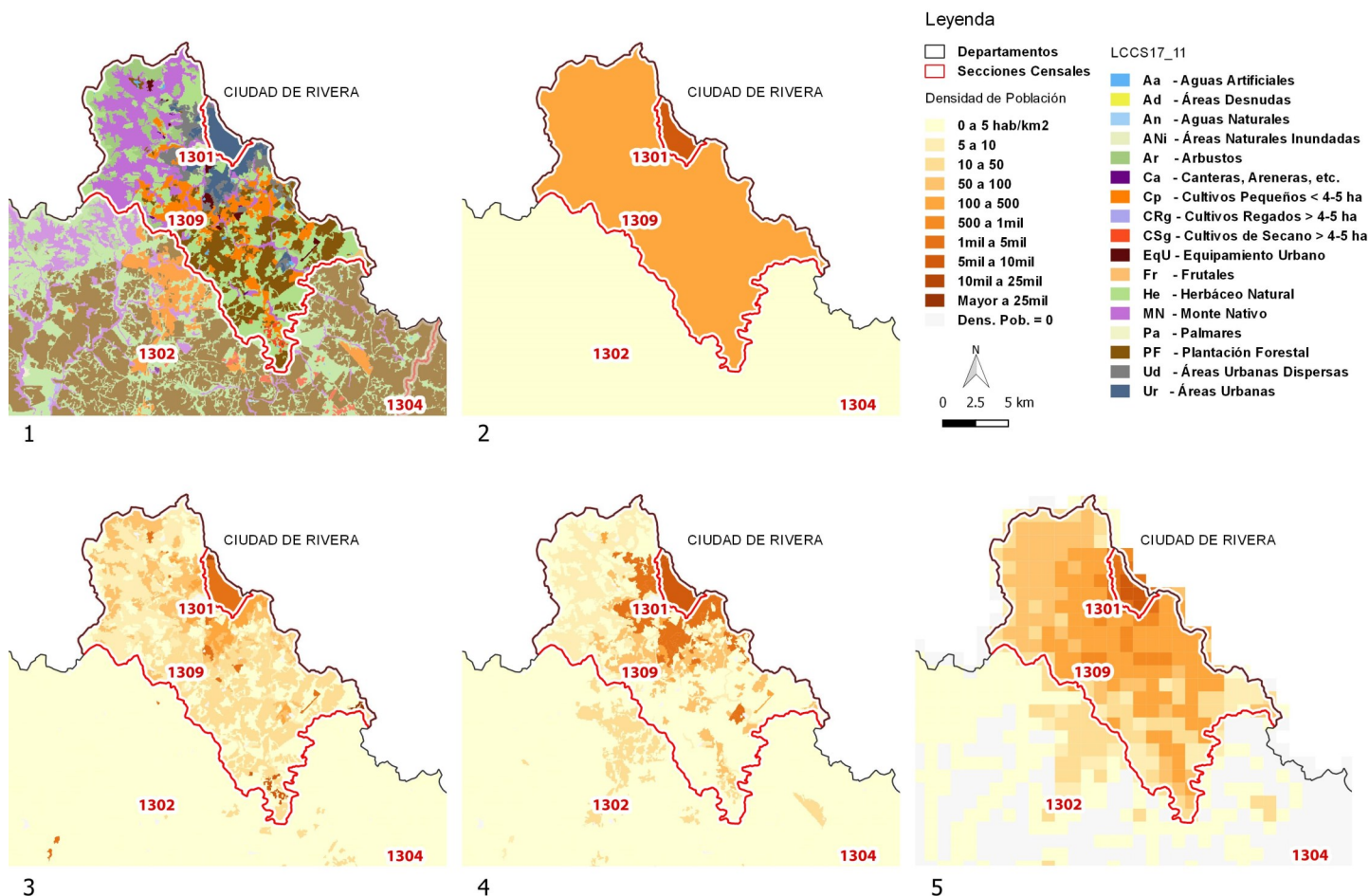


Figura 5. Mapas de las Secciones censales de la Ciudad de Rivera (1301 y 1309).

- 1) Mapa de Uso y Cobertura del Suelo 2011, MVOTMA.
- 2) Mapa coroplético de Densidad de población INE 2011 por Secciones censales.
- 3) Mapa Método 1 (Ponderación Areal Modificada).
- 4) Método 2 (Método Dasimétrico Inteligente).
- 5) Método 3 (Cálculo proporcional por área: *grid* 1km).

Mapas 3-4-5 son resultados del Modelo de Coeficientes 3 y Base Vectorial.

REFERENCIAS

1. Álvarez, A., A. Blum y F. Gallego (2015). *Atlas de cobertura del suelo del Uruguay. Dirección Nacional de Ordenamiento Territorial (DINOT)*, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Montevideo: Mosca.
2. Barrios Peña, M. I. (2009). *Análisis de escalabilidad espacial para un modelo conceptual de producción de escorrentía*. Tesina de Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia, España.
3. Batista e Silva, F. (2009). *Modelação Cartográfica e Ordenamento do Território: Um ensaio metodológico de cartografia dasimétrica aplicado à região Oeste e Vale do Tejo*. Tesis de Maestría en Sistemas de Información Geográfica e Ordenamento do Território, Universidade do Porto, Portugal.
4. Bielecka, E. (2005). A dasymetric population density map of Poland. En: ICC2005, International Cartographic Conference (XXII), *Proceedings*, 9-15 julio 2005, La Coruña, España. 9 pp.
5. Bielecka, E. (2007). Mapping Population Density Using Dasymetric Methods. In: D. Kereković (Ed.). *Richness and Diversity of GIS. Croatian Information Technology Association - GIS Forum*, University of Silesia, Zagreb, pp. 209-215.
6. Cal, A., A. Álvarez, C. Petraglia, M. Dell'Acqua, N. López y V. Fernández (2011). Mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay - *Land Cover Classification System*. Montevideo: Mosca.
7. Cantarino, I. y F. Goerlich (2013). Un modelo de distribución de población para España. *GeoFocus* (Artículos), n.º 13-1, pp. 246-269.
8. Gallego, J. & S. Peedel (2001). Chapter 6: Using CORINE land cover to map population density. In: *Towards agri-environmental indicators. Integrating statistical and administrative data with land cover information*. Topic report n.º 6. Luxemburgo: Eurostat, DG Agriculture, DG Environment, Joint Research Center, European Environment Agency, pp. 94-105.
9. Goerlich, F. J. y I. Cantarino (2012). *Una grid de densidad de población para España. Informe Economía y Sociedad*. 1ª ed. Bilbao: Fundación BBVA.
10. Gotway, C. & L. Young (2002). Combining incompatible spatial data. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 97 (458), pp. 632-648.
11. Instituto Nacional de Estadística (INE). *Base de Datos. Microdatos de Población. Marco censal año 2011*. Montevideo, Uruguay: INE. Recuperado de: <http://www.ine.gub.uy/web/guest/bases-de-datos> [Acceso 7/12/2017, 19/05/2021]
12. Instituto Nacional de Estadística (INE). *Mapas (Vectoriales y/o shapefiles de Unidades Geoestadísticas)*. Montevideo, Uruguay: INE. Recuperado de: <http://www.ine.gub.uy/web/guest/cartografia> [Acceso 7/12/2017, 19/05/2021]
13. Mennis, J., & T. Hultgren (2006). Intelligent Dasymetric Mapping and Its Application to Areal Interpolation. *Cartography and Geographic Information Science*, Vol. 33 (3), pp. 179-194.
14. Milego, R. & M. J. Ramos (2011). Disaggregation of socioeconomic data into a regular grid and combination with other types of data. *Technical Report, ESPON Database 2013, European Observation Network for Territorial Development and Cohesion Programme*, Bruselas: Comisión Europea.
15. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), Dirección Nacional de Ordenamiento Territorial (DINOT). *Sistema de Información Territorial. Mapa de Cobertura y Uso del Suelo*. Montevideo: MVOTMA. Recuperado de: <http://sit.mvotma.gub.uy/js/cobertura/> [Acceso 7/12/2017, 19/05/2021]

16. Regueira, I., J. Molina, S. Ojeda, M. Escudero y G. Pérez (2013). La distribución especial de la población en Andalucía. Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. En: *IV Jornadas Ibéricas de Infraestructura de Datos Espaciales*, 13-15 noviembre 2013, Toledo, España.
17. Rosina, K., P. Hurbánek, & P. Atkinson (2012). Spatial disaggregation of population data using maps of land cover and imperviousness / Priestorová dezagregácia populačných dát s využitím máp krajinej pokrývky a nepriepustnosti povrchu. En: *Symposium GIS Ostrava 2012. Současné výzvy geoinformatiky: proceedings*. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 23-25 enero 2012, Ostrava, República Checa.

Néstor López Dos Santos

Licenciado en Geografía por la Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay. Es profesor de "Representación y Análisis de la Información Geográfica" de la Licenciatura en Gestión Ambiental, del Centro Universitario Regional Este, Maldonado.

Imparte docencia en la Universidad de la República desde 2007, sobre distintas Tecnologías de la Información Geográfica, principalmente Cartografía y SIG. Actividad realizada para las carreras de grado en Geografía (Facultad de Ciencias), Desarrollo (Facultad de Ciencias Sociales), Diseño Integrado (CENUR Salto) y Licenciatura en Gestión Ambiental (CURE Región Este). Participó en proyectos de investigación del Departamento de Geografía (Facultad de Ciencias) y del Instituto de Teoría y Urbanismo (Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo).

Cuenta con amplia experiencia de consultorías al sector público en la preparación de productos cartográficos relacionados con el ordenamiento territorial (Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial), medio ambiente (Ministerio de Ambiente) y gestión de riesgos de desastres (Sistema Nacional de Emergencias, Intendencia de Rivera). Actualmente, asesora en SIG y gestión de información geográfica a la Dirección de Cambio Climático, Ministerio de Ambiente, y desarrolla el Proyecto "SIG para la gestión del patrimonio arqueológico" de la Comisión del Patrimonio Cultural de la Nación (CPCN).

Se sugiere citar:

López Dos Santos, N. (2021). Caracterización dasimétrica para Uruguay auxiliada por el mapa de uso y cobertura del suelo. *Revista Cartógrafo.CL* 1 (1), pp. 51-64.



Bajo Licencia Creative Commons
Atribución 4.0 Internacional.



Cartógrafo.CL/01-2021



Bárbara Loreto

Geógrafo con
Maestría en
Planificación Integral
del Ambiente.
Cursa Doctorado
en Urbanismo
Universidad Central

Venezuela



loretob.barbarae@gmail.com

Propuesta para el uso de sistemas solares térmicos en el municipio Baruta, Estado Miranda Una opción para la diversificación de la matriz energética

RESUMEN

Se considera la energía solar como una de las fuentes de diversificación energética que está liderando a nivel mundial, por integrarse con los entornos urbanos, reducir emisiones contaminantes y aumentar la eficiencia y gestión de los municipios.

La presente propuesta se encuentra enmarcada en la planificación urbana solar, el caso de estudio es el municipio Baruta, estado Miranda., Venezuela. Su objetivo es determinar la ubicación para el uso de sistemas solares térmicos que permitan obtener la mayor capacidad de generación de energía. El diseño de la metodología planteó, en primer lugar, la profundización de los conocimientos teóricos, prácticos e instrumentales de la planificación urbana solar; así como también, se detallaron las variables en función del estudio del sistema urbano, desde la perspectiva energética alternativa.

Lo anterior, mediante un análisis de los instrumentos de planificación territorial y la elaboración del diagnóstico analítico conformado por la síntesis físico-geográfica del área de estudio. A continuación, se estimó el potencial solar con el uso de herramientas geomáticas y de análisis espacial, interrelacionando este potencial con las variables a través de herramientas de evaluación multicriterio y aplicaciones de Sistemas de Información Geográfica. Esto permitió obtener la ubicación geográfica de los equipamientos y de las edificaciones para la integración de la energía solar en el municipio y analizar las bondades de la implementación de dicha propuesta.



INTRODUCCIÓN

Actualmente, en la era del conocimiento y del uso de las tecnologías de la información es imposible realizar actividades sin el uso de la energía, de hecho, a nivel mundial no existe cultura generalizada de la importancia que tiene el uso eficiente de la misma. El desarrollo de las sociedades va ligado intrínsecamente al consumo de energía, es decir, mientras mayor desarrollo mayor consumo. Esta es una relación directamente proporcional donde, en la mayoría de los casos, el consumo es ineficiente (Robles y Rodríguez, 2018).

En consecuencia, a ello se une el cambio climático como una externalidad negativa global que es originada en principio por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, que además no tiene un costo económico claro en la mayoría de los países (Heres, 2015). De acuerdo con PNUMA (2019):

Durante la última década, las emisiones de GEI aumentaron a un ritmo del 1,5 % anual y solo se mantuvieron estables brevemente entre 2014 y 2016. Las emisiones totales de GEI en 2018 que engloban las que se derivan del cambio del uso de la tierra, alcanzaron una cifra sin precedentes: 55,3 GtCO₂e. Ese mismo año, las emisiones de CO₂ de los combustibles fósiles destinados al consumo de energía y a los procesos industriales, que constituyen la mayor parte de las emisiones totales de GEI, aumentaron en un 2 % y se situaron en 37,5 GtCO₂e al año, un nivel nunca visto (p. 4).

La principal contribución al cambio climático proviene del consumo de combustibles fósiles, principalmente para la generación eléctrica y la transmisión, sin olvidar las actividades industriales como el refino de petróleo, la fabricación de cemento y la siderurgia. En la actualidad, los hidrocarburos aportan más de la mitad de la energía primaria consumida en todo el mundo, tan solo el 39,7 % del consumo energético primario global proviene del petróleo, que lo hace la fuente energética más utilizada. Revisando el panorama mundial con relación al uso del petróleo como fuente de energía, también puede notarse una dependencia generalizada de este tipo de combustible (REPSOL, 2019).

La generación de energía eléctrica por fuentes renovables, a nivel mundial, es de 26,1 %, agrupa las fuentes de hidroeléctrica, biomasa, eólica, solar y otras renovables (REPSOL, 2019). De acuerdo con los datos anteriores, se estima que, en los próximos años, los combustibles fósiles aún podrán satisfacer gran parte de los requerimientos del futuro de un mundo que sigue en constante crecimiento. Sin embargo, es necesario ser relevante como país en el panorama energético mundial, esto obliga a que no solo se anticipen los requerimientos energéticos futuros, sino también que se actualicen y adecuen las ciudades con exigencias mundiales referente al uso de energías alternativas, cambio climático y otras variables (De Francesco y Hernández, 2015).

Razón por la cual las energías renovables y la eficiencia energética son, junto con la electrificación de usos finales, elementos claves para lograr una transición energética satisfactoria y para reducir las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía. Aunque en la práctica, estas transiciones exigen en diversos ámbitos, una mayor interdependencia del sector de la energía y otros sectores de la infraestructura. Toda transición de esta envergadura es sumamente difícil y tiene que hacer frente a una serie de barreras y obstáculos económicos, políticos y técnicos (PNUMA, 2019); razón por la que se encuentran ciertos factores impulsores de la acción climática, tales como:

En primer lugar, los avances tecnológicos y económicos brindan oportunidades para descarbonizar la economía y el sector energético en particular, a un costo más bajo que nunca. En segundo lugar, se conocen más a fondo las sinergias entre la acción climática, el crecimiento económico y los objetivos de desarrollo; por ejemplo, las formas de encarar los efectos distributivos. Por último, el impulso para la elaboración de políticas en distintas instancias guberna-

mentales y el auge de las obligaciones en materia de acción climática que contraen agentes no gubernamentales crean oportunidades para que los países emprendan transiciones reales (p. 14).

Los retos que surgen a partir del cambio climático en el sector energético involucran a múltiples actores que no solo abarcan a las empresas y al Estado, sino también a organizaciones como las universidades e institutos técnicos, de investigación y desarrollo, así como la formación de capital humano. Si bien es cierto que Venezuela asumió el compromiso pleno con el cambio climático y con el sistema multilateral, establecido por la Comisión Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, durante la Conferencia de las Naciones Unidas Cambio Climático en la COP24, también, participó en la 25ª conferencia de la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP25), llevada a cabo en Madrid, España, y, reafirmando su compromiso con el 5º objetivo histórico de la Patria. Sin embargo, la sociedad venezolana no puede, ni debe aislarse de este debate, sino más bien, comenzar a buscar el entorno político, institucional y social que sirva de apoyo para el desarrollo de sectores productivos competitivos.

También, debe comenzar a generar bases desde todas las áreas de investigación que permitan la preparación para un futuro que ya es inmediato. Ya en otros países como España y Alemania (por nombrar solo algunos), los gobiernos locales se han adaptado al compromiso de hacer frente a uno de los mayores retos: convertir a las ciudades en un ejemplo de sostenibilidad (De Francesco y Hernández, 2015). Como se ha vuelto una necesidad tener ciudades autosuficientes, con menor impacto sobre el entorno, la energía es, sin duda, uno de los campos en los que las entidades locales deben realizar mayores esfuerzos; los municipios no son ajenos a los procesos de producción, distribución y consumo de energía, pues ellos deben convertirse en los propios gestores, productores y administradores de la energía que puedan producir (Loreto, 2017).

Debido a lo antes mencionado, este artículo expone uno de los elementos que deben considerarse en el futuro inmediato, para establecer un nuevo rumbo en el funcionamiento de las ciudades, desde el punto de vista de la energía; pues, las ciudades venezolanas deben actualizarse con respecto a la política energética, eficiencia y sistemas de energías renovables. A pesar de las diferentes limitaciones tanto políticas, institucionales y económicas existentes en el país, se realizó esta propuesta que toma en cuenta principalmente la variable espacial, para el uso de los sistemas solares térmicos (SST) dentro del municipio Baruta, estado Miranda; con el fin de diversificar su [matriz energética](#)¹, incorporando los SST para el calentamiento de agua en residencias y hoteles, producción de calor para los procesos realizados en las industrias y la refrigeración de espacios tanto de hospitales como de centros comerciales.

Es importante destacar que la propuesta se enmarca en el ámbito del metabolismo urbano, integrando la autosuficiencia energética, con captación de energías renovables, y la generación e instalación de dispositivos, que actúen como pasivos para el ahorro y la eficiencia energéticos. Es por ello, que en los últimos años se están incluyendo a las energías alternativas, como la solar, en la planificación de las ciudades, y se emprende con la planificación urbana solar para contribuir con la sostenibilidad urbana a escala local.

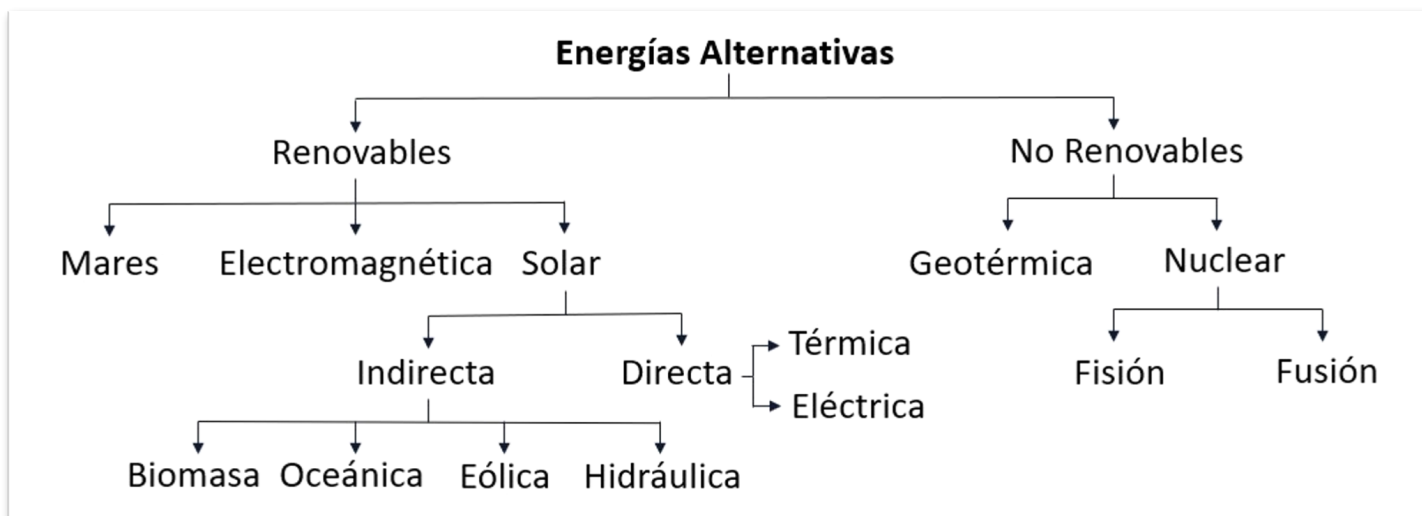
A continuación, se presentan algunos aspectos conceptuales referentes a la energía solar, SST y radiación global; luego, se describe el panorama energético actual en Venezuela, sus acuerdos internacionales y referentes legales. Se muestra la metodología utilizada y los resultados obtenidos respecto a implementación de los SST, para finalmente cerrar con algunas discusiones referentes al caso de estudio.

Energía solar

La energía solar es una fuente de energía abundante, no contaminante y se encuentra disponible, en mayor o menor medida, en cualquier parte del planeta, pudiendo ser colectada y transformada en energía térmica o eléctrica en el lugar de su utilización. El valor exacto de la radiación global va a depender de la intensidad,

¹Entendiendo por matriz energética, como la combinación de fuentes de energía primaria que se utiliza en una determinada zona geográfica. En el caso del municipio Baruta, es dependiente del Sistema Eléctrico Nacional. La propuesta va a favor de la autonomía e independencia energética.

la insolación o el soleamiento del lugar en estudio, aspectos que se hallan en función de las condiciones atmosféricas del punto en la tierra. Es decir, este valor varía según sea la zona geográfica de la localidad del objeto, la altura sobre el nivel del mar, la estación del año, la hora y la calidad atmosférica (PNUMA, 2019).



Tal como se observa en la [Figura 1](#), de acuerdo con lo establecido por Páez (2009), las energías alternativas están constituidas por dos grupos:

1. Energías no renovables (ENR). Son aquellas que existen en la naturaleza en una cantidad limitada; no se renuevan a corto plazo y por eso se agotan cuando se utilizan. La conforman la energía nuclear (fusión y fisión) y la geotérmica.
2. Energías renovables (ER). Son aquellas cuyo potencial es inagotable, ya que provienen de la energía que llega a nuestro planeta de forma continua, como consecuencia de la radiación solar o de la atracción gravitatoria de la luna. Están constituidas por energía solar (directa e indirecta), de las mareas y electromagnética. En particular, se estudiará y analizará las energías alternativas de tipo renovables, específicamente la solar directa.

En la actualidad, ha aumentado el interés con respecto a la energía solar, por la diversidad de problemas ambientales que se han generado por el uso de energía de origen fósil, en particular esta permite dar soluciones puntuales a nivel urbano, ya que se han desarrollado diversas tecnologías que varían de acuerdo con los métodos de concentración y de conversión de energía; en este sentido, se especifican los SST.

De acuerdo con lo establecido por Páez (2009), en la [Tabla 1](#) se especifican las principales aplicaciones potenciales de los SST:

Figura 1. Energías alternativas (Elaboración propia con base en Páez, 2009).

Tabla 1. Aplicaciones potenciales de los sistemas solares térmicos (SST) (Elaboración propia con base en Páez, 2009).

Fuente	Sistema	Subsistema	Tecnología	Finalidad
Energía Solar	Solar Térmico	SST desacoplado	Colectores solares planos	Calefacción de agua
		SST con almacenamiento de calor	Colectores solares planos	Calor solar para procesos industriales
		SST integrado o compacto	Colector de tubo evacuado	Refrigeración de espacios

Es importante destacar que la eficiencia de los SST va a depender del promedio de radiación global anual. Es decir, el promedio entre la radiación directa que es la que predomina en los días soleados y que además produce sombras; y la radiación difusa que es la que llega después de haber incidido con cualquier elemento de la atmósfera (polvo, nubes, contaminantes, etc.) (Loreto, 2017).

El crecimiento de las ER se ha visto impulsado por el aumento en la relación costo-competitividad, lo cual ha hecho que en muchos países los costos sean competitivos con las fuentes de energía convencional. Existe el mito de que la ER es muy costosa en comparación a los combustibles fósiles; sin embargo, entre 2009 y 2014 los costos de generación de energía solar disminuyeron en un 80 %; destacando además que la energía solar ofrece numerosos beneficios no comerciales, especialmente relacionados con la mitigación del cambio climático y la reducción de los riesgos a la salud (PNUMA, 2019).

Síntesis del panorama energético en Venezuela

El mundo está bajo transformación constante, ningún país escapa a sus efectos, los cuales se pueden apreciar en todos los campos y en cada uno de sus sectores. No solo es el campo económico, sino también el social, el político, el educativo. Venezuela tiene un significativo registro histórico, al ser uno de los países pioneros en el desarrollo de la industria eléctrica mundial, ya que desde 1886 incorporó los primeros contratos de suministro eléctrico. A partir de 1958, el país, se caracterizó por ofertar energía eléctrica principalmente con el uso de energías renovables (Loreto, 2017).

Sin embargo, en los últimos años el sector eléctrico ha desmejorado significativamente por la severa crisis que enfrenta el sistema eléctrico nacional. Este ha cambiado su matriz energética por la urgencia de satisfacer la demanda creciente, con el aumento de generación térmica mediante el consumo de combustibles fósiles. Esta situación ha incrementado los impactos ambientales y ha generado altos costos económicos (Loreto, 2017).

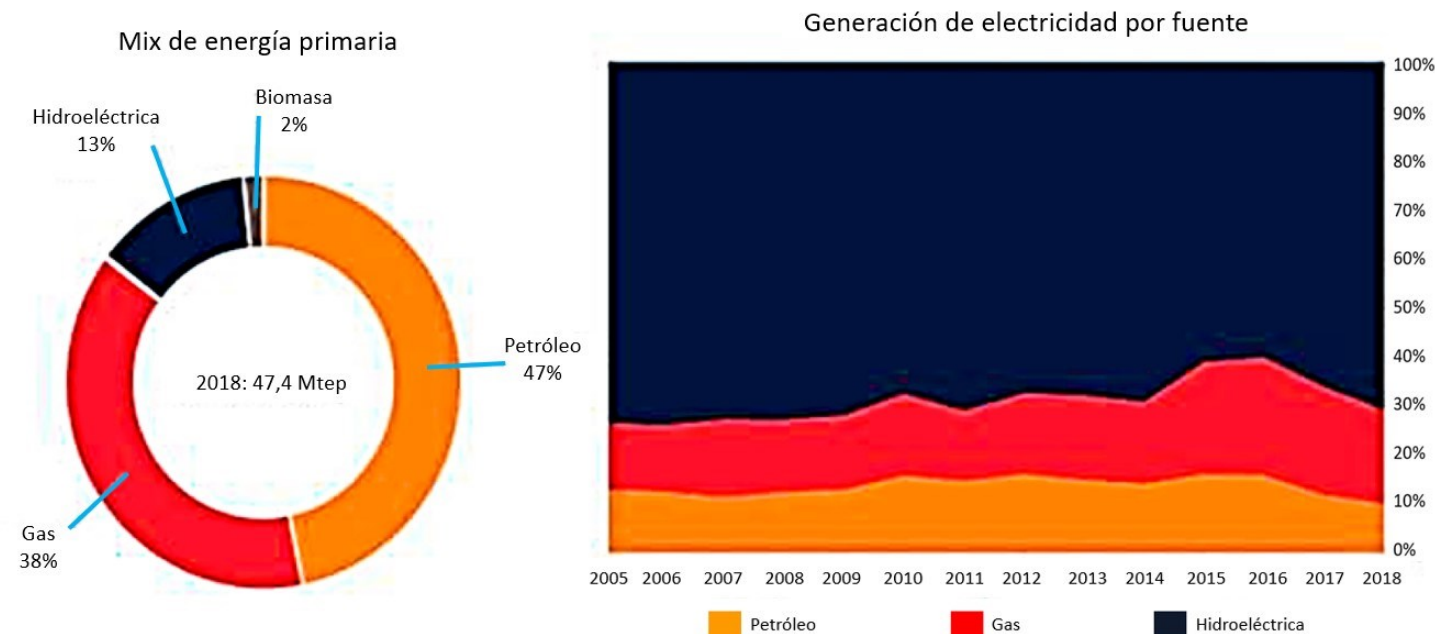
En la **Figura 2** se observa que Venezuela para el año 2018 consumía 47,4 Mtep (1 Mtep, equivale a un millón de toneladas de petróleo) en energía primaria, en donde más del 80 % de la energía primaria consumida es de tipo ENR²; tan solo el 47 % de consumo energético primario proviene del petróleo, seguido del gas con un 38 % y el restante perteneciente a las ER, 13 % para las hidroeléctricas y 2 % para biomasa (REPSOL, 2019)³.

² Aun cuando en la página oficial de CORPOELEC, se indica que: "El Sistema Eléctrico Nacional ofrece más del 62% del potencial eléctrico mediante fuentes renovables..."

<http://www.corpoelec.gob.ve/>

³ Para efectos de este artículo, se utilizó como fuente de información REPSOL 2019; debido a que, no está disponible al público el Informe Oficial Anual, que detalla la demanda de energía primaria en Venezuela a diferentes escalas, ni por sectores de consumo.

Figura 2. Demanda de energía primaria en Venezuela (izquierda). Generación de electricidad por fuente (derecha). REPSOL, 2019.



Los derivados del petróleo fueron, una vez más, la principal fuente de consumo energético de los venezolanos, representando más de la mitad de este. Se mantuvo al alza el porcentaje de derivados utilizados para el transporte, que alcanzó 64%; y continuó siendo la gasolina el principal producto (en torno al 52 % de todos los derivados del petróleo), además, del consumo final del gas, que principalmente con un 83 % fue usado con fines industriales (REPSOL, 2019).

En cuanto a la generación de electricidad, la principal fuente del país es la hidroeléctrica, que a inicios de su funcionamiento aportaba más del 70 % de la producción anual, seguido por el gas con 19 % y petróleo con 10 %. Sin embargo, en los últimos años ha ido en aumento el uso de energía fósil para la producción de energía eléctrica del país, hecho que se ve de forma marcada a partir del año 2010, e incrementa de forma significativa en los años 2015 y 2016 ([Observe el gráfico de la derecha de la Figura 2](#)); en consecuencia, las emisiones de CO₂ a la atmosfera por parte de Venezuela para el año 2018 fueron de 103,3 Mt CO₂. Es decir, que la emisión de CO₂ *per cápita* es 3,2 tCO₂/hab. (REPSOL, 2019).

Esta realidad desmejora la situación ambiental de Venezuela, de acuerdo con lo establecido en el Protocolo de Kioto del Convenio Marco sobre Cambio Climático de la ONU (1998), aprobado en ley (Loreto, 2017). Así como también, las implicaciones de la COP21 para Venezuela, debido a que está directamente ligado con el punto de vista económico, ya que tendrá un efecto directo sobre el negocio de las exportaciones petroleras, lo que obligará al país a desarrollar una economía distinta, diversificada y menos dependiente del petróleo (Sánchez, 2016).

Es importante destacar que Venezuela es altamente vulnerable al cambio climático, por lo que le conviene adherirse a la única posibilidad de reducción eficaz de la amenaza del cambio climático global. Referente al desarrollo de las energías renovables en Venezuela, Sánchez (2016) plantea que:

Las posibilidades de desarrollo de sus fuentes renovables de energía son muy limitadas, debido al elevadísimo subsidio de los combustibles fósiles que existe en el mercado interno, principalmente de los combustibles de las plantas termoeléctricas, y a la insuficiencia de políticas para su promoción (p. 28).

Por lo que, frente al desarrollo de fuentes alternativas en el país, Sánchez (2016) señala que se requiere:

De una política impulsora y de estímulo a la inversión en estas fuentes, con incentivos fiscales y cambiarios para la importación de equipos; asimismo, es necesario el desarrollo de normas técnicas para la operación y mantenimiento de los sistemas de generación y conexión a la red, el establecimiento de un marco legal, el fortalecimiento de las incipientes iniciativas existentes de programas de formación e investigación básica y aplicada que adelantan algunas Universidades y Centros de Investigación, y la eliminación progresiva de los subsidios a los combustibles fósiles. En síntesis, en materia de energías renovables está casi todo por hacer, pero no existe la suficiente voluntad política para ello (p. 29).

Así como también, es necesario el desarrollo de los diferentes escalones legales que sirvan como fundamento y/o contexto para enmarcar y establecer los criterios para la diversificación energética, considerando todos los tipos de ER, y en particular como esta investigación lo precisa, que es referente al uso de la energía solar. En consecuencia, las ciudades venezolanas deben ir adaptándose a los diferentes requerimientos para satisfacer las necesidades de sus ciudadanos y mejorar su calidad de vida, por ello estas deben pensarse y planificarse con una visión de modernidad y sustentabilidad para cumplir principalmente con sus habitantes y con los acuerdos internacionales sobre adaptación y mitigación del cambio climático.

METODOLOGÍA UTILIZADA

Para la realización de la propuesta se han establecido las siguientes fases descritas secuencialmente:

- A. **El diagnóstico:** Se basó en numerosos estudios, investigaciones y documentos provenientes de diversas fuentes como organismos público, universidades y profesionales. La síntesis físico-geográfica se realizó mediante la interpretación de las variables físico-naturales (clima, unidades, procesos geomorfológicos, unidades hidrográficas) y socioeconómicos (aspectos demográficos, actividades económicas y servicios, sectorización funcional, potencial de desarrollo urbano y uso generalizado de la tierra).
- B. **La radiación global (RG):** Para el cálculo se utilizó el software SAGA a través del modelo de radiación, donde se generó información referente a la orientación, pendiente y sombras del área de estudio.
- C. **El potencial solar (PT):** Se determinó mediante la metodología de Torres (2017): "Cálculo del potencial solar mediante la sectorización ambiental" (citado por Loreto, 2017 p. 97); junto con la elaboración de una matriz multicriterio, para generar el potencial solar del municipio. Se elaboró una matriz geográfica y se interrelacionaron las variables: Radiación global, sectorización ambiental, uso generalizado de la tierra, consumo anual de energía eléctrica por habitantes y los estratos socioeconómicos.

Los siguientes criterios fueron los utilizados para el llenado de la matriz geográfica, en estos se especifican los porcentajes correspondientes para cada una de las variables según su valor específico, es decir, que, a través de estos criterios, se ponderó a cada sector de acuerdo con el dato diagnosticado en el paso 1. Por lo tanto, se establecieron por variables cuatro rangos (en función del valor mínimo y valor máximo existente en el área de estudio de cada variable), y en estos se distribuyó el porcentaje asignado.

De manera que los criterios para llenar la Matriz Geográfica son los siguientes:

La Radiación Global por Sectorización Ambiental tiene una ponderación de 50%, debido a que es la fuente principal para la generación de energía eléctrica mediante sistemas solares térmicos. Está dividida en cuatro rangos:

1. Sectores que tienen una radiación global por metro cuadrado de 2,3 a 3,0, se les asignó 12,50 del porcentaje.
2. Sectores que tienen una radiación global por metro cuadrado de 3,1 a 4,0, se les asignó 25,00 del porcentaje.
3. Sectores que tienen una radiación global por metro cuadrado de 4,1 a 5,0, se les asignó 37,50 del porcentaje.
4. Sectores que tienen una radiación global por metro cuadrado de 5,1 a 6,5, se les asignó 50 % del porcentaje.

El uso generalizado de la tierra tiene una ponderación de 25 %, está asignado con base en los sectores funcionales del municipio Baruta y hace referencia a la cantidad de equipamientos presentes en cada uno de ellos. Está dividido en cuatro rangos:

1. Sectores que tienen menos de 15 equipamientos, se les asignó 6,25 del porcentaje.
2. Sectores que tienen entre de 16 y 27 equipamientos, se les asignó 12,50 del porcentaje.
3. Sectores que tienen entre de 28 y 41, se les asignó 18,75 del porcentaje.
4. Sectores que tienen más de 42 equipamientos, se les asignó 25 del porcentaje.

El Consumo Anual de Energía Eléctrica por habitantes tiene una ponderación de 20 %, hace referencia al consumo anual de energía eléctrica por sector del municipio, está expresado en megavatios por hora por habitantes (Mwh/hab). Está dividido en cuatro rangos que son: 1- Para aquellos sectores que consumen menos de 25,00 Mwh/hab se le asignó 5 del porcentaje. 2- Para aquellos sectores que consumen entre de 25,01 a 50,00 Mwh/hab se le asignó 5 del porcentaje. 3- Para aquellos sectores que consumen entre de 50,01 a 100,00 Mwh/hab se le asignó 15 del porcentaje. 4- Para aquellos sectores que consumen más de 100,00g Mwh/hab se le asignó 20 del porcentaje.

Los estratos socioeconómicos tienen una ponderación de 5 %, y van en función de la clasificación socioeconómica del municipio. Está dividido en cuatro rangos:

1. Sector E, Clase Baja-Pobre, se le asignó 1,25 del porcentaje.
2. Sector D, Clase Media Baja-incluye pobreza moderada, se le asignó 2,50 del porcentaje.
3. Sector C, Clase Media Alta-Media, se le asignó 3,75 % del porcentaje.
4. Sector AB, Clase Alta-Casi Alta, se le asignó 5% del porcentaje.

D. La propuesta se generó a partir de los resultados obtenidos de la matriz geográfica. Se establecieron los sitios para la implementación de uso de SST en el municipio Baruta, cuya finalidad son: El calentamiento de agua en residencias y hoteles, producción de calor para los procesos realizados en las industrias y la refrigeración de los espacios tanto de hospitales como de centros comerciales.

RESULTADOS

Referente al diagnóstico

En el municipio Baruta, el 8,54 % (811,43 Ha) corresponde a las áreas planas y semiplanas, extensas y estables; el 11,09 % (1.053,36 Ha) son áreas montañosas con buena cobertura vegetal; el 24,01 % (2.280,65 Ha) corresponde a las áreas montañosas muy intervenidas con crecimiento urbano desordenado, subsectores en equilibrio precario, red de drenaje alterada con cortes y rellenos mal preservados; el 27,08 % (2.591,74 Ha), al sector urbano, se encuentra en áreas montañosas muy intervenidas con proliferación de sectores informales, protección vegetal poco intervenida; y el 29,26 % (2.779,45 Ha) se encuentran las áreas montañosas con cobertura vegetal intervenida, presenta riesgos de desequilibrio por la actividad antrópica.

La sectorización ambiental respecto a la orientación de las filas y las laderas del municipio determinó que 18,63 % de laderas se encuentran orientadas al sur; 18,71 % orientadas al sureste; 18,16 hacia el suroeste; 12,02 % orientadas hacia el noreste; 10,73 % hacia el noroeste; y en menor proporción el 9,07 %, 7,38 % 7,29 % orientadas hacia el este, norte y oeste, respectivamente.

El consumo anual de energía eléctrica del municipio Baruta por habitantes fue de 694,91 Mwh/hab.⁴ En donde la parroquia con mayor consumo por hora es la parroquia Baruta, quien consume 549,3 Mwh/hab; seguido de la parroquia El Cafetal, con un consumo de 119,9 Mwh/hab y en último lugar, la parroquia Las Minas de Baruta, con 115,7 Mwh/hab.

En cuanto a los extractos socioeconómicos del municipio, el 54 % de la población del municipio es considerada clase media alta a clase media. Por su parte, el 21 % de la misma es considerada clase baja a pobre; seguido del 18 % de la población de clase alta a casi alta. Finalmente, el 7 % de la población es de clase media moderada e incluye en este porcentaje la pobreza moderada.

Los indicadores económicos del municipio permitieron concluir que tiene un conjunto de atributos de infraestructura física y de redes con potencial desarrollo en

⁴ El consumo anual de energía eléctrica del municipio se obtuvo multiplicando el valor de consumo anual per cápita de Venezuela que es de 2.886,37 kwh/hab. Luego este valor se dividió entre 1.000 para convertirlo en Megavatio hora por habitante (Mwh/hab.).



el área energética, combinado con la población predominantemente joven y económicamente activa, así como las condiciones físico-naturales favorables para la implementación de energías renovables y crecimiento sostenible del municipio; el estudio y combinación de todos estos aspectos (variables físico-naturales y socioeconómicas), pueden constituir un entorno propicio para la implementación de uso de SST, orientados para dar opciones al municipio de diversificar su matriz energética y así poder generar parte de la energía que se consume.

El marco normativo, jurídico e institucional que regula el tema energético es muy amplio, variado y disperso, producto de la visión sobre la ciudad en las distintas épocas y con participación de autoridades diversas. Por ello es necesario comenzar a generar e incluir en los diferentes escalones legales, el fundamento y/o contexto legal que enmarque y establezca los criterios para el uso de las energías renovables y específicamente para la energía solar.

Referente al potencial solar

El conocimiento de la distribución espacial y temporal de la radiación global en el municipio facilita la identificación de los lugares estratégicos para la utilización de energía solar y así proponer información de forma puntual y local. En este sentido, se obtuvo con el software SAGA, el promedio anual de RG del municipio por metro cuadrado, siendo este de 0,73 tep/m² (equivalentes a 8.030 Kw/m² de promedio anual)⁵.

⁵ El valor de 1 Tep (tonelada equivalente al petróleo) corresponde a 11.630 kw/h (kilovatio/hora).

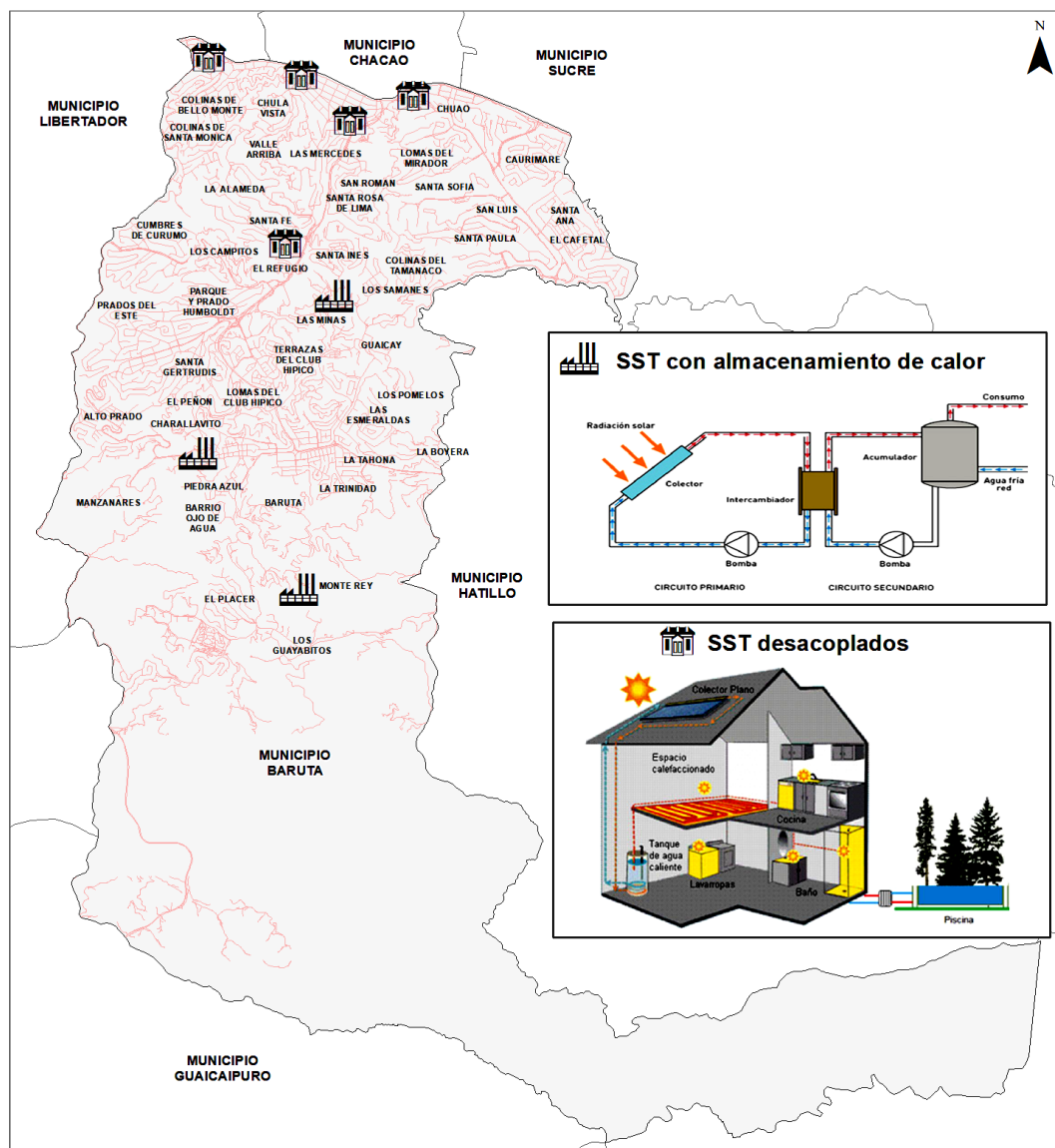


Figura 3. Propuesta para la ubicación de SST con almacenamiento de calor y SST desacoplados en el municipio Baruta, Estado Miranda (Elaboración propia).

Una vez calculado el promedio anual de la radiación global, se obtuvo el potencial solar del municipio, identificando excelentes condiciones para la implementación de sistemas solares térmicos con un 73,3 % del área total debido a su favorable ubicación geográfica.

Referente a la propuesta

Una vez obtenido los resultados y analizados, inicialmente se proponen los sistemas solares térmicos con almacenamiento de calor y colectores solares planos, cuya finalidad es producir calor solar en procesos industriales. En la [Figura 3](#) se observa la ubicación de tres (3) posibles industrias en el sector de Las Minas de Baruta, Piedra Azul y Los Guayabitos.

En segundo lugar, los SST desacoplados con la incorporación de colectores solares planos para el calentamiento de agua en hoteles, con los cinco (5) más importantes del municipio ubicados al norte, principalmente en Chuao, Colinas de Bello Monte y Las Mercedes ([Figura 4](#)).

Para la refrigeración de los espacios, se propone los SST integrado o compacto con la incorporación de colector de tubo evacuado (observe figura 3), cuya finalidad es refrigerar. Con esta propuesta se beneficiarían un total de 45 centros

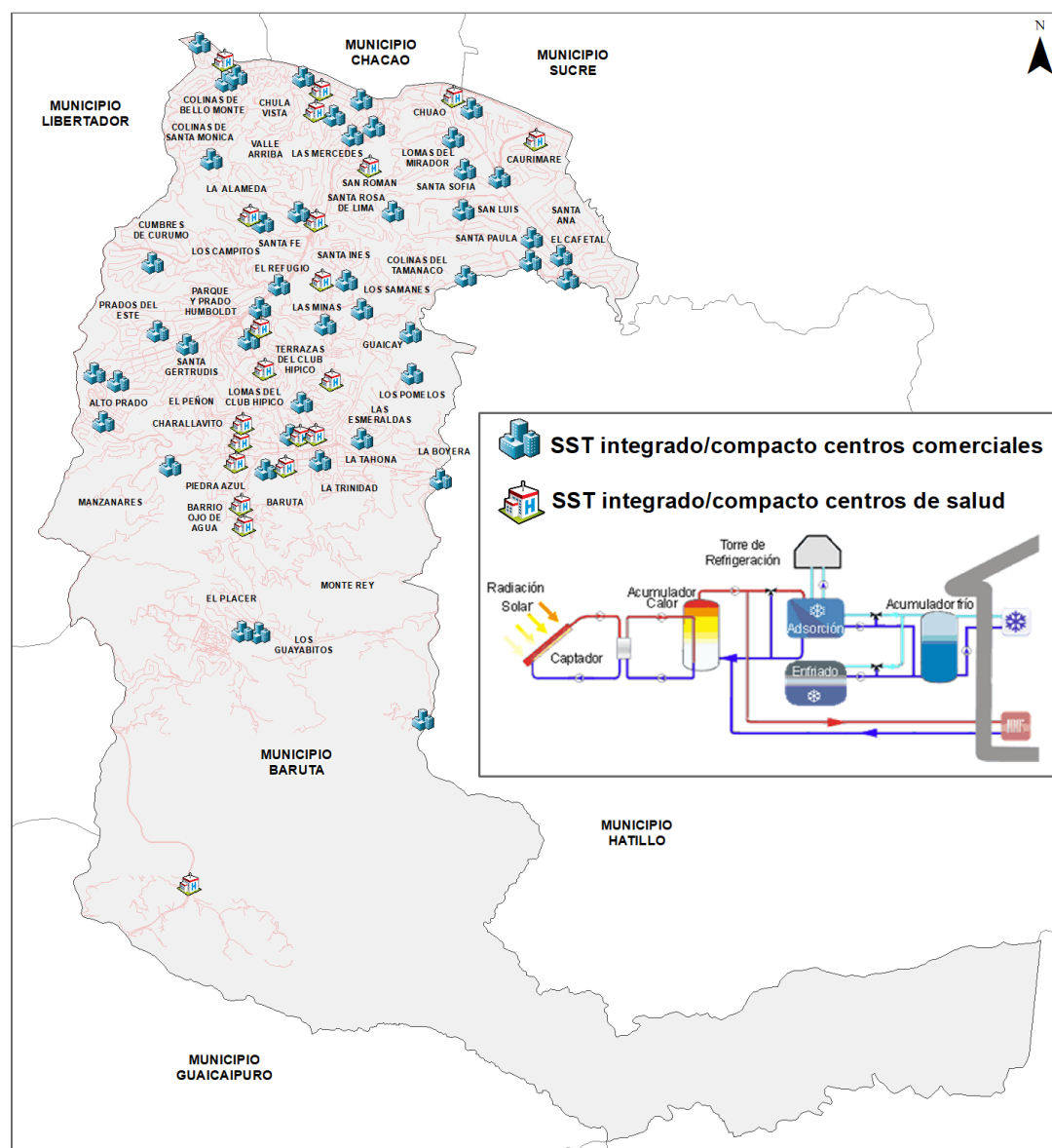


Figura 4. Propuesta para la ubicación de SST integrado o compacto en el municipio Baruta, Estado de Miranda (Elaboración propia).

comerciales y 22 centros de salud, ambos ubicados principalmente en el centro y norte del área de estudio.

Con la ejecución de las propuestas podría disminuir la emisión de dióxido de carbono (CO₂) del municipio, que emite anualmente un total de 1,3 MTCO₂ (REPSOL, 2019); esta relación va a depender de los metros cuadrado de SST que se implementen en las edificaciones e infraestructuras.

DISCUSIÓN

Los resultados del diagnóstico del municipio reflejan sus debilidades y fortalezas en el tema energético; se hace evidente que el área de estudio necesita de un cambio político, económico y administrativo, para lo cual es precisa la voluntad de todos los actores que hacen vida en él, desde las instituciones, empresarios, comerciantes, organizaciones no gubernamentales, academia, hasta el ciudadano común.

En cuanto al marco legal e institucional existente tanto a nivel nacional como municipal, no contemplan lo relacionado con la incorporación de las fuentes renovables en la matriz energética actual a escala local. Por lo que se requiere el desarrollo de este tema, solo por nombrar algunos ejemplos, están las ordenanzas vinculadas al tema energético, al uso de ER (como los SST); tasas de tarifas de servicio vinculados al consumo de energía producida localmente, entre otros temas.

Por ello, se debe pensar en una nueva forma de planificar para dar respuestas a las ciudades y contribuir en la transición hacia una matriz de producción de energía limpia e independiente, que permitan cumplir con los compromisos internacionales; este nuevo modelo energético debe estar fundamentado en el uso eficiente de la energía y la utilización de fuentes limpias y renovables. El alcance y el ámbito de las respuestas necesarias son enormes para desarrollar ampliamente a un municipio desde el punto de vista renovable.

La propuesta de uso de sistemas solares térmicos en el municipio Baruta, permitió considerar la interacción entre múltiples variables, estableciendo a la energía solar como componente esencial para la sostenibilidad de la ciudad, su implementación y gestión. A través de prácticas de planificación estas pueden desempeñar un papel estratégico en la mejora de la eficiencia energética.

Es importante destacar que la selección de la ubicación de los SST que se proponen es de tipo referencial, puesto que es necesario un estudio particular para cada edificación, en donde se determinen las condiciones de la infraestructura, las sombras e inclinación del lugar y la temperatura, ya que estas variables influyen directamente en el desempeño. Así como también, es necesario identificar en cada infraestructura cuál es el consumo energético específico, cantidad de agua caliente que usa, cantidad de personas, entre otras variables, para estimar la cantidad real del consumo energético presente. Es importante explicarles a los beneficiarios de un sistema SST lo relacionado con la capacidad del sistema, ya que el rendimiento estará dado también por el perfil del uso.

Además, no solo es necesario diversificar fuentes y hacer crecer la oferta, sino también mejorar la eficiencia con que se usa la energía eléctrica. Esto constituye toda una tarea encarada con diferentes grados, que requiere de la legalidad y aporte institucional necesario, además de criterios de selección y colocación de los sistemas, entre otros elementos. Finalmente, lo presentado en las páginas precedentes constituye una primera aproximación a los diferentes tópicos que quedan por desarrollarse en el tema energético de las ciudades venezolanas.



REFERENCIAS

1. De Francesco, M. y I. Hernández (2015). *El Futuro Petrolero de Venezuela y la COP21. IESA, Centro Integral de Energía y Ambiente. Energía en Cifras, Sector Petrolero y Gasífero 2014-2015*. p. 141-147. Recuperado de <https://cutt.ly/3npj5TH>
2. Heres, D. (2015). El Cambio Climático y la Energía en América Latina. *CEPAL. Estudios de Cambio Climático en América Latina*. S.15-01198. p. 1-57. Recuperado de <https://cutt.ly/Lnpkoqq>
3. Jiménez, H. (2015). El Derecho a la Energía en Venezuela. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, (s/n). RBDC n. 23 (2015) - ISSN: 1678-9547 (impresa), 1983-2303 (electrónica), 27-62. Recuperado de <https://cutt.ly/Qnpkxd0>
4. Loreto, B. (2017). *Planificación Solar Urbana: Propuesta de Uso de Sistema Solar Térmico para el Municipio Baruta, Estado Miranda*. (Trabajo de Grado de Maestría). Caracas, Venezuela: Centro de Estudios Integrales del Ambiente, Universidad Central de Venezuela. p. 59-110.
5. Páez, A. (2009). *Sostenibilidad Urbana y Transición Energética: Un Desafío Institucional*. (Tesis de doctorado). Ciudad De México, México: Universidad Nacional Autónoma de México. p. 85-111. Recuperado de <https://cutt.ly/Knpkmso>
6. PNUMA (2019). Informe sobre la disparidad en las emisiones de 2019. *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Nairobi*. (s/n). ISBN: 978-92-807-3766-0, p 1-16. Recuperado de <https://cutt.ly/DnpkYgC>
7. REPSOL (2019). Anuario Estadístico Energético 2019. *Dirección de Estudio*. Depósito legal: M-34493-2019. p. 41-164. Recuperado de <https://cutt.ly/VnpkD5j>
8. Robles, C. y O. Rodríguez (2018). Un panorama de las energías renovables en el mundo, Latinoamérica y Colombia. *Revista Espacios*, Vol. 39 (Nº 34), 10-26. RBDC n. 34 (2018) - ISSN: 0078-1015. Recuperado de <https://cutt.ly/FnpkKNB>
9. Sánchez, J. (2016). La Transición energética y su incidencia en Venezuela. *Revista Análisis*, (s/n). Fundación Friedrich Ebert Stiftung Venezuela, ISBN: 978-980-6077-63-8. p. 14-30. Recuperado de <https://cutt.ly/lnpkVIP>

Bárbara Loreto

Geógrafa con más de diez años de experiencia en los Sistemas de Información Geográfica (FHE-UCV 2015), con Maestría Planificación Integral del Ambiente (CENAMB- UCV 2018).

Cursa el Doctorado en Urbanismo en el Instituto de Urbanismo (FAU-UCV), cuya línea de investigación comprende las energías alternativas, en particular la Planificación Urbana Solar. Además, es especialista en la Gestión Integral de Riesgo en la Planificación Ambiental, así como también, especialista en Evaluación de Impacto Ambiental y Sociocultural.

Ocupa el cargo de Monitor Comunitario Guárico en la Oficina de Coordinación de Asuntos Humanitarios para las Naciones Unidas (OCHA-ONU).

Se sugiere citar:

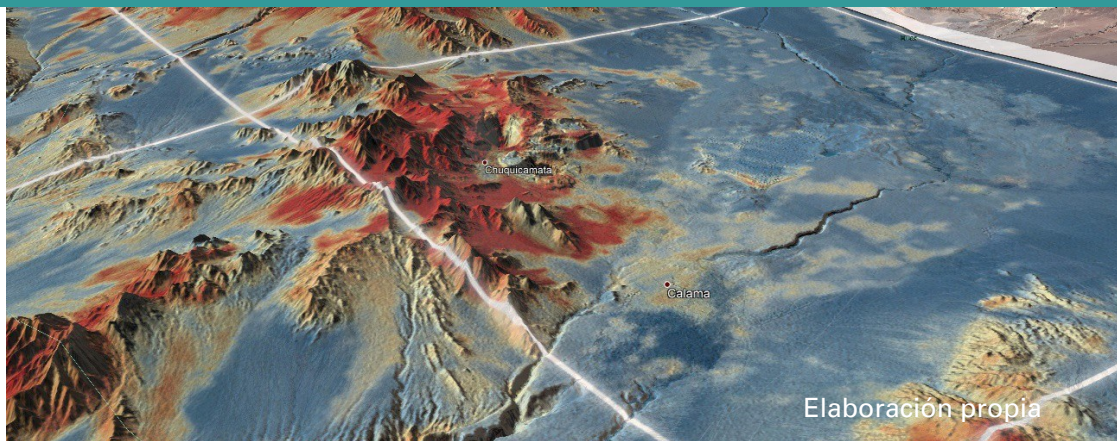
Loreto, B. (2021). Propuesta para el uso de sistemas solares térmicos en el municipio Baruta, Estado Miranda. Una opción para la diversificación de la matriz energética. *Revista Cartógrafo.CL* 1(1), pp. 65-76.



Bajo Licencia Creative Commons
Atribución 4.0 Internacional.



Cartógrafo.CL/01-2021



Hugo Neira Santander

Cartógrafo, Universidad
Tecnológica Metropolitana,
Postítulo en Geomática
Aplicada, Universidad de Chile

Chile



h.neira@smm.cl

Análisis multicriterio y predicción con Machine Learning para determinar blancos de exploración de pórfidos cupríferos en la franja Paleoceno-Oligoceno, región de Antofagasta, Chile

RESUMEN

En la actualidad, la exploración geológica está procesando una gran cantidad de datos geológicos y geoquímicos, capturados mediante productos geoespaciales y tecnología, que permiten definir un área de interés. Por otra parte, la inteligencia artificial intenta proponer soluciones al trabajo con datos geocientíficos, analizando millones de datos en diferentes dimensiones y épocas. Como ciencia de datos, permite explorar, analizar y predecir información a partir de los mismos datos.

Este estudio se ubica entre la latitud $21^{\circ}30'S$ y $23^{\circ}30'S$, región de Antofagasta, Chile; analiza una zona que para algunas empresas mineras y de inversión está considerada madura en términos de exploración, y cuyos depósitos más expuestos o evidentes ya han sido encontrados. Ante esta situación se busca aclarar, ¿qué tan conveniente es seguir explorando esta zona? Esto es parte esencial de lo que se abordará en este trabajo.

El área tiene características mineralógicas correspondientes a pórfidos cupríferos metálicos, depósitos Cu-(Mo), de los más importantes a nivel mundial. Se encuentra ubicada geológicamente en la franja Eoceno-Oligoceno paralela a la zona de subducción, entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. Dicha convergencia de placas ha generado una serie de yacimientos alineados en torno a la evolución geológica de la falla oeste.

Se busca definir potenciales blancos de exploración minera en la zona mencionada, utilizando Machine Learning y Análisis Multicriterio (AHP) con las siguientes variables: geología, fallas geológicas, alteración hidrotermal, franjas metalogénicas, geofísica y muestras de geoquímica. Cada una de ellas es analizada y, además, se le asignan puntajes de importancia para determinar las zonas de interés prospectivo minero.

INTRODUCCIÓN

El norte de Chile es un constante desafío para la minería. El tiempo de caminar por el desierto y encontrar yacimientos, se podría afirmar que es parte del pasado. Hoy, para definir un área de interés o blancos, se requiere de mayores insumos y tecnología. Cada vez son menos los potenciales lugares prospectivos superficiales o visibles al especialista, por lo tanto, se necesita el uso de nuevas metodologías para encontrar un blanco de exploración.

La zona que se analizará es considerada madura para algunas empresas, en términos de exploración, pues sus depósitos más expuestos o evidentes ya han sido encontrados. Ante esta situación se busca aclarar cuan conveniente es seguir explorando esta zona. Esto es parte esencial de lo que se abordará en este trabajo.

El área tiene características mineralógicas correspondientes a pórfidos cupríferos (Maksaev *et al.*, 2007) de los más importantes a nivel mundial. Se encuentra ubicada geológicamente en la franja Eoceno-Oligoceno paralela a la zona de subducción entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. Dicha convergencia de placas ha generado una serie de yacimientos alineados en torno a la evolución geológica de la falla oeste (Ossandón *et al.*, 2001).

Este trabajo intentará definir potenciales blancos de exploración minera en la zona mencionada, utilizando las siguientes variables: geología, fallas, alteración hidrotermal, franjas metalogénicas, geofísica y muestras de geoquímica.

Objetivo

Determinar potenciales blancos de interés de exploración minera entre los 21°30' y los 23°30' de latitud sur, de la Región de Antofagasta, Chile.

Para determinar los blancos de interés se aplicarán metodologías, adquiridas en el Diplomado en Geomática Aplicada, tales como; Geoprocesamiento, Geoestadística, Machine Learning, Radar, Multiespectral, entre otros.

Área de estudio

El área de estudio corresponde a un sector de 23.000 km², correspondiente a ocho cuadrángulos del Sernageomin (Servicio Nacional de Geología y Minería). Hojas: Pampa Unión, Cerro Quimal, Sierra Gorda, Moctezuma-Llano De Quimal, Río Salvador, Calama, Sierra De Moreno y Cerro Jaspe-Chitigua.

La principal ciudad del área es Calama y entorno a esta, se encuentran algunos de los principales yacimientos de Chile (Figura 1).

METODOLOGÍA

Para determinar los blancos de interés, se utilizaron seis coberturas para realizar los análisis. Los cuales se hicieron en las siguientes plataformas: Google Earth Engine (GEE) y European Space Agency (ESA). Mediante los siguientes softwares: Qgis 3.14, Sentinel Application Platform (SNAP) y R Studio.

Se genera un esquema del proceso y se construye un diagrama de flujo (Figura 2), en el que se detallan los procesos que se realizan con cada uno de los insumos, para determinar las variables que se utilizan en el análisis.

- Imagen Landsat 8
- Imagen Radar SAR
- Alteración Hidrotermal Aster
- Franjas Metalogénicas
- Fallas geológicas
- Geofísica (Magnetometría)
- Geoquímica muestras de roca, análisis de cobre (Cu)

Variables del estudio.



Geología

Debido a la extensión del área del proyecto, la geología representa un desafío importante, ya que el objetivo es lograr predecirla con Machine Learning (con el software R), a través de una clasificación supervisada con muestras en el área.

La cobertura que permite realizar la predicción es un ráster agrupado (stack) de una colección de imágenes Landsat 8, procesadas en Google Earth Engine (Gorelick *et al.*, 2007), más imagen de Radar SAR (modificado de Copernicus Sentinel, dato 2019), procesada en SNAP e índices de alteración hidrotermal (Sultan *et al.*, 1986; Sabins, 1999; Gad & Kusky, 2006).

En total, el stack de ráster contiene 18 bandas que fueron utilizadas para la clasificación de la geología en el área de estudio.

Además, como predictores se dispone de 2800 geopuntos (puntos de control geológico) con 29 clases (Figura 3), correspondientes a muestras que identifican el tipo de roca o suelo y su edad geológica.

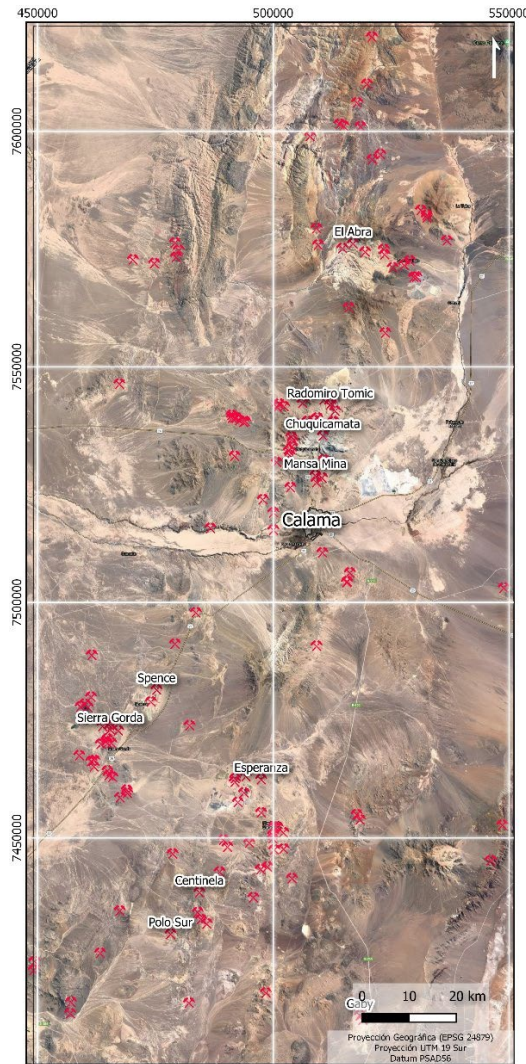


Figura 1. Área de estudio para la búsqueda de blancos de exploración de interés minero.

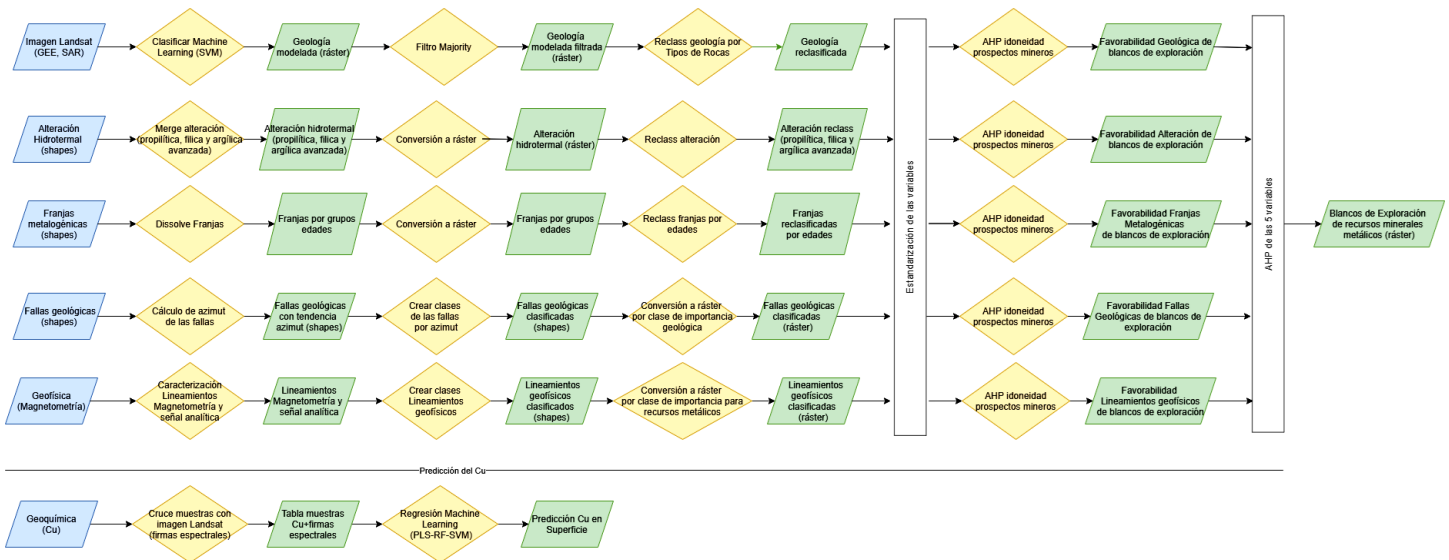


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de análisis para la identificación de nuevos blancos de exploración.

Debido a la dispersión de la información, existen zonas con muy pocos datos, lo que representa un desafío en la predicción, sumado a que la geología es clave como insumo base, para el análisis de exploración, por ejemplo, las unidades intrusivas (las que se forman a partir de un enfriamiento lento, a gran profundidad y en grandes masas del magma (Aguilar, 2008)) son las que alojan los principales yacimientos de la zona.

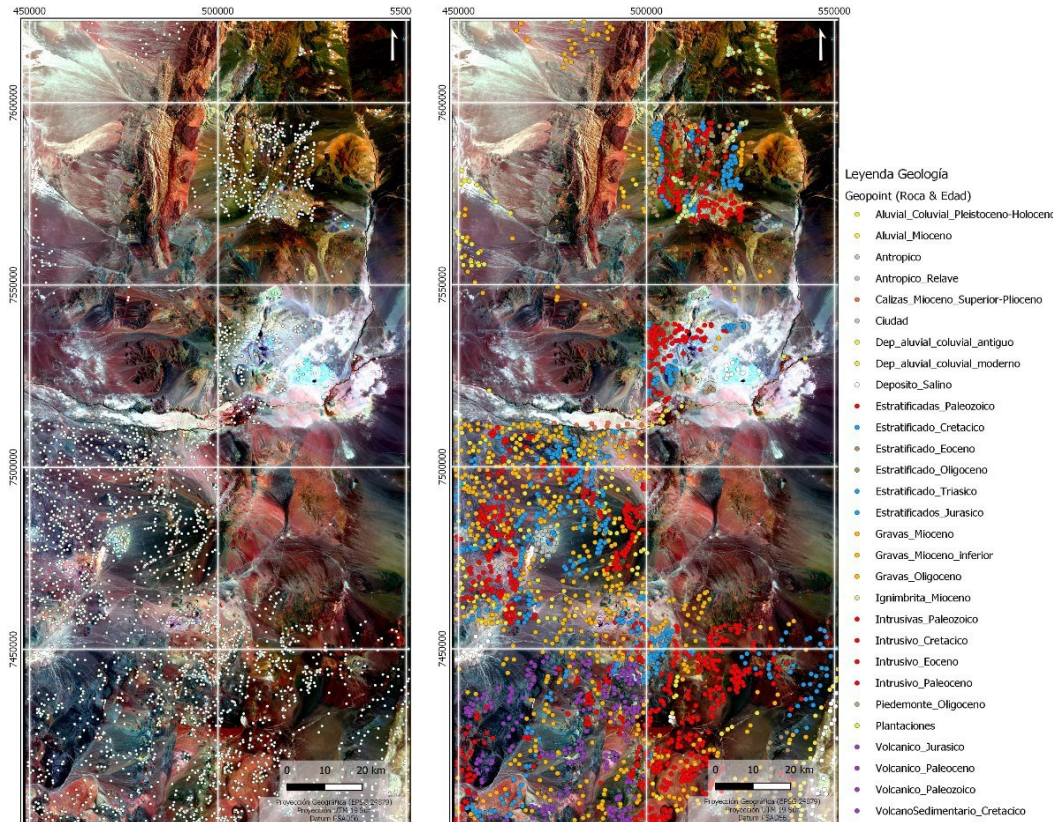


Figura 3. Distribución de los 2800 geopuntos en el área de estudio (izquierda). Clases predictoras para obtener la geología del sector (derecha)

Se realiza una programación en R Studio, para evaluar dos tipos de clasificación supervisada: Support vector machine (SVM) y Principal Component Analysis (PCA).

De los dos resultados obtenidos, el SVM (Tabla 1) logró una exactitud de un 84 %, por sobre PCA que obtuvo un 73 %.

Confusion Matrix and Statistics

	21	11	16	17	15	1	3	27	20	10	9	5	8	12	4	23	29	22	26	28	14	7	13	25	6	24	19	2	18
21	211	12	10	3	7	1	0	0	2	7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
11	9	139	2	0	3	2	0	0	1	1	1	0	0	3	0	3	14	6	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
16	11	6	486	27	14	15	1	4	11	2	0	2	4	2	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	9	2
17	2	0	19	202	2	2	0	6	4	2	0	1	2	2	0	0	1	1	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0
15	5	2	3	2	198	1	0	2	3	8	0	1	0	1	0	13	0	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	2	0	0	35	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	0	62	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	5	0	1	3	3	0	80	0	4	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	4	3	2	1	1	1	0	0	180	6	0	0	0	3	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	4	4	3	3	1	0	0	1	4	266	0	0	0	5	0	0	9	0	1	3	0	0	0	0	0	1	0	0	2
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
12	0	1	1	0	0	0	2	0	2	1	0	0	0	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	3	1	2	2	1	0	0	4	4	2	0	0	1	1	0	0	0	145	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0	0
26	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	76	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Overall Statistics

Accuracy : 0.8417
95% CI : (0.8277, 0.8551)
No Information Rate : 0.1894
P-Value [Acc > NIR] : < 2.2e-16

Kappa : 0.8254

Mcnemar's Test P-Value : NA

Tabla 1. Matriz de confusión SVM clasificación Geología.

Luego se aplica un filtro de mayoría (Sovann y Aing, 2015), para eliminar la dispersión de píxeles individuales (efecto sal y pimienta), con lo que se obtiene la geología del área de estudio (Figura 4).

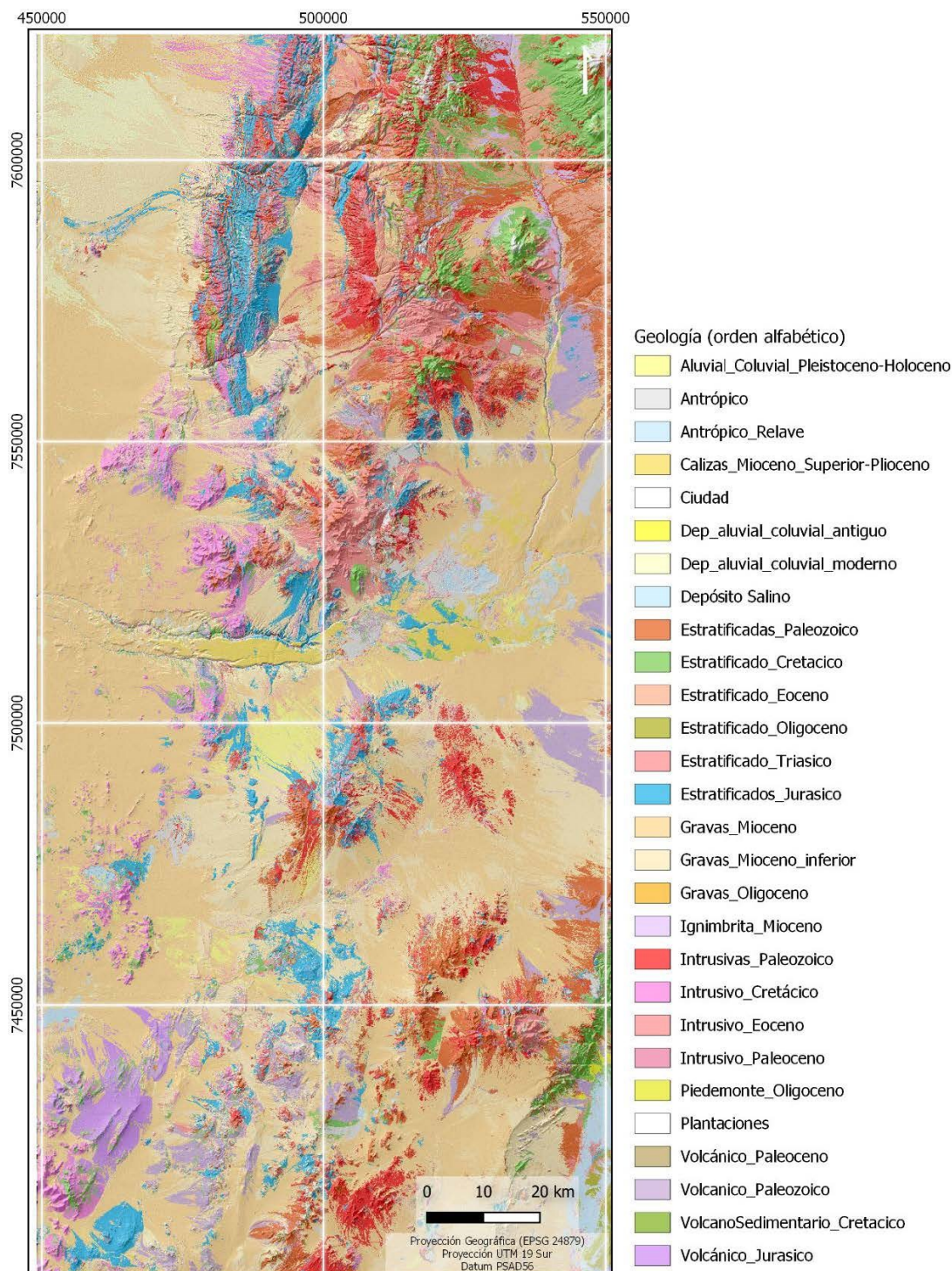


Figura 4. Resultado de la clasificación supervisada aplicando SVM, para predecir las unidades geológicas presentes en el área de estudio.

El siguiente proceso es la reclasificación por grupos de roca y edades, según importancia para la exploración minera (Villela y Cantallop, 2016). Se distinguen tres principales grupos: Rocas Intrusivas (Intrusivas Paleozoico, Intrusivo Cretácico, Intrusivo Eoceno e Intrusivo Paleoceno), Rocas Volcánicas (Volcánico Paleoceno y Volcano Sedimentario Cretácico) y Rocas Estratificadas (Estratificadas Paleozoico, Estratificado Cretácico, Estratificados Jurásico y Estratificado Eoceno).

Cabe señalar que en esta etapa se descartan todos los tipos de depósitos (Aluvial Coluvial Pleistoceno-Holoceno, Antrópico, Antrópico Relave, Calizas Mioceno Superior Plioceno, Ciudad, Depósito aluvial coluvial y Plantaciones), por no presentar interés prospectivo, por lo cual se con valor cero.

De este proceso, se obtienen tres ráster que se les aplica un análisis multicriterio, Analytic Hierarchy Process (AHP), para lo cual son estandarizados según idoneidad como roca huésped para albergar yacimientos (Aguilar, 2008), luego se construye una matriz (Tabla 2), donde se le asignan pesos de importancia a cada variable para finalmente obtener un ráster de favorabilidad geológica para prospectos mineros (Figura 11).

	Intrusivo	estratificado	Volcánicas
Intrusivo	1	5	7
estratificado	0.2	1	3
Volcánicas	0.1428	0.3	1
Suma	1.3428	6.3	11

	Intrusivo	estratificado	Volcánicas	PESO
Intrusivo	0.74471254	0.793650794	0.63636364	0.72490899
estratificado	0.14894251	0.158730159	0.27272727	0.19346665
Volcánicas	0.10634495	0.047619048	0.09090909	0.08162436

λ	3.09011566
CI	0.04505783
CI/2	0.02252891
CR	0.03884296 → Como CR < 0.1, se puede concluir que los resultados son consistentes.

Tabla 2. Matriz de pesos de factores en los tres ráster reclasificados y estandarizados de la cobertura de geología.

Alteración hidrotermal

Esta cobertura es un insumo que fue proporcionado por la Compañía Minera Sumitomo Metal Mining Chile, para el desarrollo de este estudio, la cual encargó a Sumie Consultant Co. Ltd, en el 2006, realizar un análisis de imágenes ASTER en Chile, con el propósito de extraer regiones de interés de depósitos de cobre y oro.

Se trabajó con siete tipos de alteración existentes en el área; calcita, epidota, clorita, illita, jarosita, caolinita, alunita pirofilita. Estas fueron agrupadas según importancia para la detección de pórfidos cupríferos, según Lowell y Gilbert, 1970. Fueron reclasificados en tres grupos característicos de este tipo de depósitos cupríferos. El primer grupo es alteración propilítica (calcita, epidota, clorita); el segundo es filica (illita, clorita) y el tercer grupo es argílica avanzada (caolinita, jarosita, alunita pirofilita) (Figura 5).

Posterior a la reclasificación se procede a la aplicación del AHP, para lo cual se estandarizan los valores (Astudillo, 2008) de las tres variables (alteración propilítica, alteración filica y alteración argílica avanzada). Luego se construye una matriz (Tabla 3), donde se le asignan pesos de importancia a cada variable de alteración, para finalmente obtener un ráster de favorabilidad de alteraciones hidrotermales para pórfidos cupríferos (Figura 12).

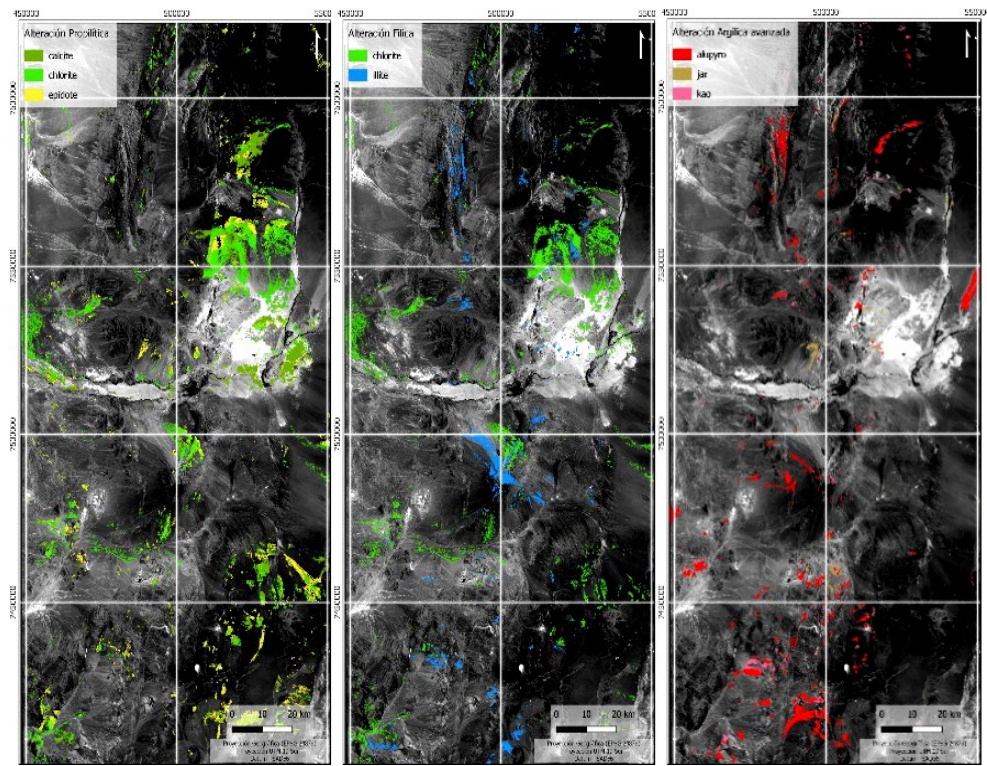


Figura 5. Alteraciones hidrotermales obtenidas con índices del sensor ASTER, 2006. Alteración propilitica (izquierda), alteración filica (centro) y alteración argilica avanzada (derecha).

	propilitico	filico	argilico avan.
propilitico	1	7	0.3333
filico	0.1428	1	0.1428
argilico avan.	3	7	1
Suma	4.1428	15	1.4761

	propilitico	filico	argilico avan.	PESO
propilitico	0.24138264	0.466666667	0.22579771	0.31128234
filico	0.03446944	0.066666667	0.09674141	0.06595917
argilico avan.	0.72414792	0.466666667	0.67746088	0.62275849

λ	3.19822188
CI	0.09911094
CI/2	0.04955547
CR	0.08544047

Como CR< 0.1, se puede concluir que los resultados son consistentes.

Tabla 3. Matriz de pesos de factores en los tres ráster reclasificados y estandarizados de la cobertura de alteración hidrotermal.

Franjas metalogénicas

Corresponden a las macro unidades emplazadas paralelas a la zona de subducción entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. Dicha convergencia permite las condiciones para la generación de un conjunto de yacimientos alineados con una determinada edad geológica y agrupados en estas franjas (Camus, 2003).

Las franjas metalogénicas de mayor importancia económica en Chile son de edades: Jurásico, Cretácico temprano, Paleoceno-Eoceno temprano, Eoceno tardío-Oligoceno temprano, Mioceno temprano a medio y Mioceno medio a Plioceno temprano.

Para la construcción de las franjas, se modificó el Mapa Geológico de Chile, 2003 (Sernageomin), categorizando 11 clases (Figura 6); Basamento metamórfico Paleozoico, Volcanismo (Cenozoico), Sedimentario (Moderno), Sedimentario Marino (Mesozoico), Sedimentario (Terciario), Sedimentario (Mesozoico), Volcanismo (Mesozoico), Intrusivo (Mioceno-Plioceno), Intrusivo (Eoceno-Oligoceno),



Intrusivo (Paleoceno) e Intrusivo (Mesozoico). Estas fueron rasterizadas y posteriormente se estandarizaron según su importancia (Tabla 4); principalmente, por proceso de mineralización (Sillitoe y Perelló, 2005; Maksiyev *et al.*, 2007). Esto con el fin de aplicar AHP y así obtener un ráster de favorabilidad metalogénica para definir blancos de exploración (Figura 13).

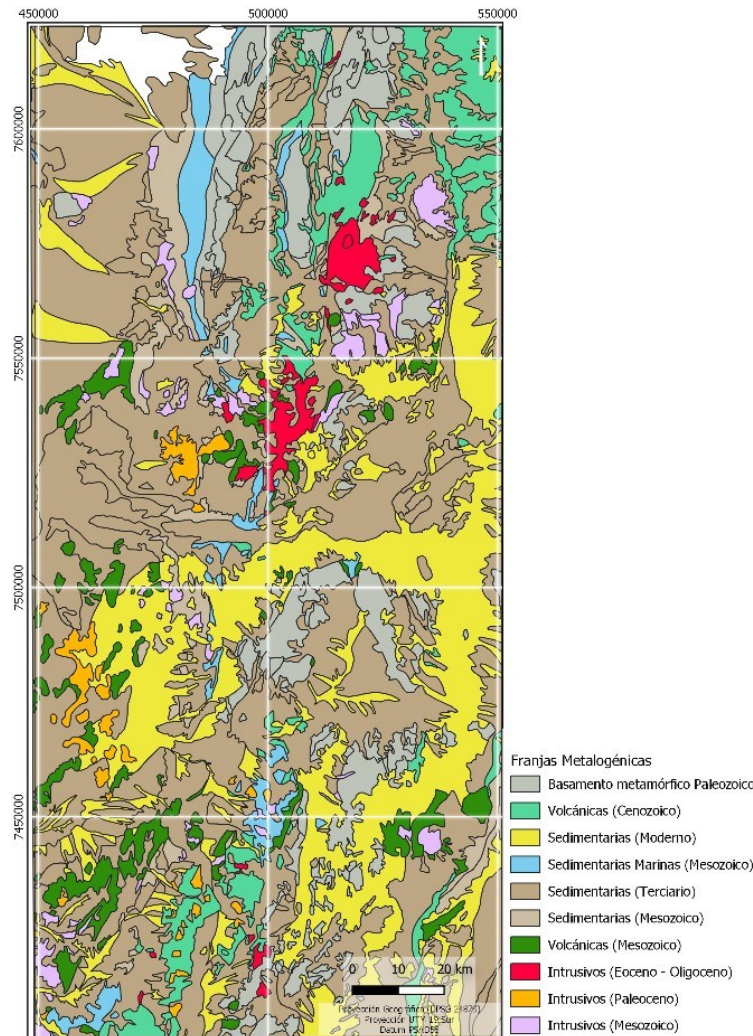


Figura 6. Franjas metalogénicas, del área de estudio agrupadas para definir blancos de exploración.

	Basamento metamórfico Paleozoico	Volcanismo (Cenozoico)	Sedimentario (Moderno)	Sedimentario Marino (Mesozoico)	Sedimentario (Terciario)	Sedimentario (Mesozoico)	Volcanismo (Mesozoico)	Intrusivo (Eoceno-Oligoceno)	Intrusivo (Paleoceno)	Intrusivo (Mesozoico)
Basamento metamórfico Paleozoico	1	5	9	9	9	9	5	1	1	1
Volcanismo (Cenozoico)	0.2	1	3	3	3	3	0.2	0.1428	0.1428	0.1428
Sedimentario (Moderno)	0.1111	0.3333	1	1	1	1	0.2	0.1111	0.1111	0.1111
Sedimentario Marino (Mesozoico)	0.1111	0.3333	1	1	1	1	0.2	0.1111	0.1111	0.1111
Sedimentario (Terciario)	0.1111	0.3333	1	1	1	1	0.2	0.1111	0.1111	0.1111
Sedimentario (Mesozoico)	0.1111	0.3333	1	1	1	1	0.2	0.1111	0.1111	0.1111
Volcanismo (Mesozoico)	0.2	5	5	5	5	5	1	0.1428	0.1428	0.1428
Intrusivo (Eoceno-Oligoceno)	1	7	9	9	9	9	7	1	5	5
Intrusivo (Paleoceno)	1	7	9	9	9	9	7	0.2	1	1
Intrusivo (Mesozoico)	1	7	9	9	9	9	7	0.2	1	1
Suma	4.8444	33.3332	48	48	48	48	28	3.13	8.73	8.73

	Basamento metamórfico Paleozoico	Volcanismo (Cenozoico)	Sedimentario (Moderno)	Sedimentario Marino (Mesozoico)	Sedimentario (Terciario)	Sedimentario (Mesozoico)	Volcanismo (Mesozoico)	Intrusivo (Eoceno-Oligoceno)	Intrusivo (Paleoceno)	Intrusivo (Mesozoico)	PESO
Basamento metamórfico Paleozoico	0.206423912	0.1500006	0.1875	0.1875	0.1875	0.1875	0.178571429	0.319488818	0.114547537	0.114547537	0.183358
Volcanismo (Cenozoico)	0.041284782	0.0300012	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.007142857	0.045623003	0.016357388	0.016357388	0.0406766
Sedimentario (Moderno)	0.022933697	0.00999904	0.020833333	0.020833333	0.020833333	0.020833333	0.007142857	0.035495208	0.012726231	0.012726231	0.0184357
Sedimentario Marino (Mesozoico)	0.022933697	0.00999904	0.020833333	0.020833333	0.020833333	0.020833333	0.007142857	0.035495208	0.012726231	0.012726231	0.0184357
Sedimentario (Terciario)	0.022933697	0.00999904	0.020833333	0.020833333	0.020833333	0.020833333	0.007142857	0.035495208	0.012726231	0.012726231	0.0184357
Sedimentario (Mesozoico)	0.022933697	0.00999904	0.020833333	0.020833333	0.020833333	0.020833333	0.007142857	0.035495208	0.012726231	0.012726231	0.0184357
Volcanismo (Mesozoico)	0.041284782	0.1500006	0.104166667	0.104166667	0.104166667	0.104166667	0.035714286	0.045623003	0.016357388	0.016357388	0.0722004
Intrusivo (Eoceno-Oligoceno)	0.206423912	0.21000084	0.1875	0.1875	0.1875	0.1875	0.25	0.319488818	0.572737686	0.572737686	0.2881389
Intrusivo (Paleoceno)	0.206423912	0.21000084	0.1875	0.1875	0.1875	0.1875	0.25	0.063897764	0.114547537	0.114547537	0.1709418
Intrusivo (Mesozoico)	0.206423912	0.21000084	0.1875	0.1875	0.1875	0.1875	0.25	0.063897764	0.114547537	0.114547537	0.1709418

λ 11.69191517
 CI 0.069191517
 CI/2 0.034595758
 CR 0.02321863

Como $CR < 0.1$, se puede concluir que los resultados son consistentes.

Tabla 4. Matriz de cálculo de pesos de factores en los 11 ráster reclasificados y estandarizados de la cobertura de franjas metalogénicas



Fallas geológicas

El sistema de fallas estudiado de rumbo principalmente norte-sur y sureste -noroeste, es paralelo a la zona de subducción chileno-peruana, en el norte de Chile. Se considera relacionado con un importante fenómeno estructural de transpresión (Riedel, 1929), ocurrido durante el Eoceno tardío-Oligoceno a lo largo de sus principales fallas (Mpodozis *et al.*, 1993; Maksaev y Zentilli, 1999).

Esta cobertura corresponde a una compilación de las estructuras del Mapa Geológico de Chile, 2003 (Sernageomin) y estructuras Niemeyer, 2008 (Figura 7). Las fallas fueron categorizadas según su rumbo y estandarizadas (Niemeyer y Urrutia, 2009), para posteriormente realizar un análisis AHP, con el fin de obtener un ráster de favorabilidad de fallas geológicas para identificar prospectos mineros (Figura 14).

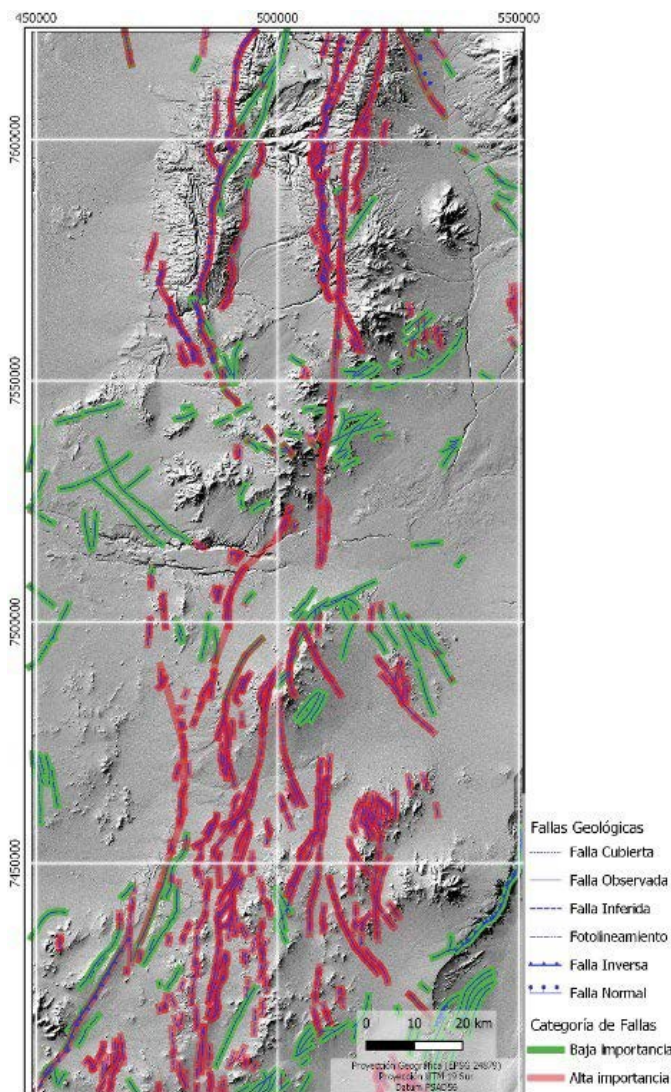


Figura 7. Fallas geológicas, categorizadas y estandarizadas para blancos de exploración (Niemeyer y Urrutia, 2009), del área de estudio.

Geofísica

El principal uso de la geofísica en la exploración minera y, específicamente, en la identificación de pórfidos cupríferos es su aplicación en la detección de anomalías y en la presencia de magnetita hidrotermal o destrucción de minerales magnéticos (Piñana y Vivallos, 2015) por alteración fílica.



Para este trabajo, se cuenta con un dato aeromagnético de la zona de estudio (Figura 8) y con lineamientos geofísicos (magnéticos y señal analítica) que fueron categorizados y estandarizados según el rumbo utilizado en las clases de las fallas geológicas de este estudio (Mpodozis *et al.*, 1993; Makshev y Zentilli, 1999), para posteriormente generar mediante AHP un modelo de Favorabilidad geofísica para blancos de exploración (Figura 15).

AHP a variables blancos de exploración (targets)

Una vez que se tienen los resultados de las cinco variables de blancos de exploración (targets), se procede a la realización mediante análisis multicriterio (AHP), para obtener el ráster de Blancos de Exploración de recursos minerales metálicos. En resumen, es la suma de todas las variables por un peso según importancia prospectiva. Cabe señalar que las variables vienen estandarizadas y normalizadas en escala de 0 a 1, por lo que se procede a construir la matriz de asignación de pesos a cada variable (Tabla 5).

Los ráster que serán utilizados en la matriz son los siguientes:

- Favorabilidad Geológica para blancos de exploración;
- Favorabilidad Alteración para blancos de exploración;
- Favorabilidad Franjas Metalógicas para blancos de exploración;
- Favorabilidad Fallas Geológicas para blancos de exploración;
- Favorabilidad de Lineamientos geofísicos para blancos de exploración.

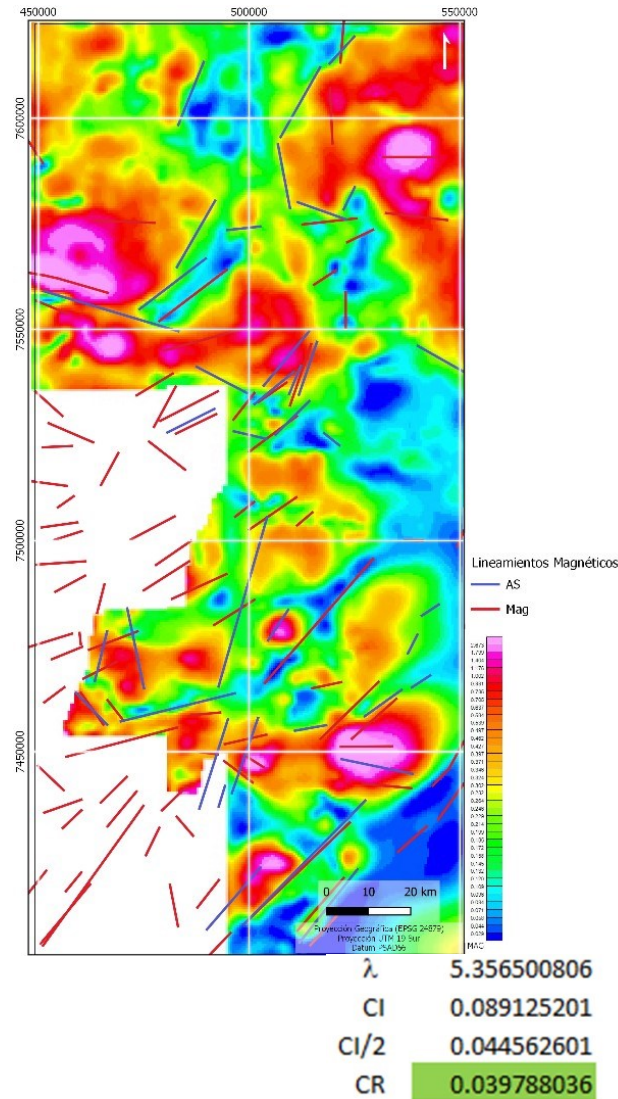


Figura 8. Fallas geológicas, categorizadas y estandarizadas para blancos de exploración (Niemeyer y Urrutia, 2009), del área de estudio.

	Geología	Alteración	Franjas Metal	Geofísica	Estructuras
Geología	1	3	5	3	5
Alteración	0.333333333	1	3	3	3
Franjas Metal	0.2	0.2	1	0.333333333	0.333333333
Geofísica	0.333333333	0.333333333	3	1	3
Estructuras	0.2	0.333333333	3	0.333333333	1
Suma	2.066666667	4.866666667	15	7.666666667	12.33333333

	Geología	Alteración	Franjas Metal	Geofísica	Estructuras	Peso
Geología	0.483870968	0.61643836	0.333333333	0.39130435	0.40540541	0.446
Alteración	0.161290323	0.20547945	0.2	0.39130435	0.24324324	0.240
Franjas Metal	0.096774194	0.04109589	0.066666667	0.04347826	0.02702703	0.055
Geofísica	0.161290323	0.06849315	0.2	0.13043478	0.24324324	0.161
Estructuras	0.096774194	0.06849315	0.2	0.04347826	0.08108108	0.098
						1

Tabla 5. Matriz de cálculo de pesos de las variables resultantes, realizado a los 5 ráster de favorabilidad para blancos de exploración.

De estos pesos se obtiene un mapa que muestra las zonas más idóneas para realizar exploración geológica y minera. Producto que se le denomina, Blancos de Exploración de Recursos Minerales Metálicos (Figura 16).

Geoquímica

La geoquímica como insumo para determinar blancos de exploración geológica resulta un método indirecto, ya que generalmente el blanco de interés se encuentra definido con anterioridad y, por lo tanto, la geoquímica de superficie es un validador de un blanco. Cabe señalar que su principal ventaja, es la rapidez de los resultados y es de los menos costosos económicamente en la exploración.

Es importante señalar que la geoquímica se ocupa de determinar la abundancia relativa y absoluta de los elementos de la tierra y del estudio de su distribución y dispersión (Rose *et al.*, 1979).

Para este estudio, se cuenta con 1567 muestras de roca de superficie (Figura 9) con los datos de concentración de Cu. Corresponden a diversas campañas realizadas durante más de 15 años, representando un dato duro en toda el área de estudio. Debido a que no tienen una continuidad espacial, por ser de distintos proyectos, su distribución es muy aleatoria y genera zonas con agrupamientos de datos (clúster), lo que imposibilitó realizar una interpolación con los datos (Figura 10).

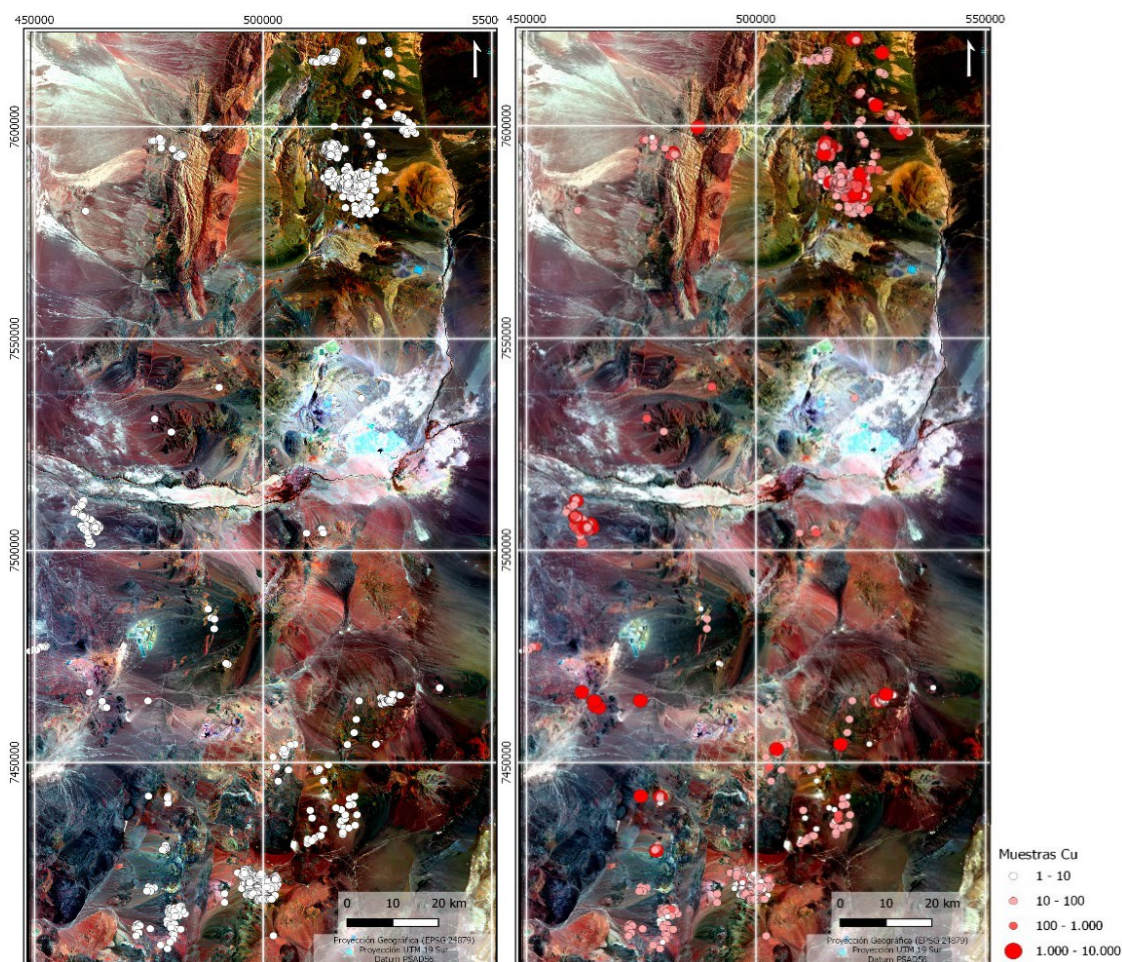


Figura 9. Distribución de las muestras de roca, se puede apreciar los clústeres con datos (izquierda) y las concentraciones de Cu en el área de estudio (derecha).

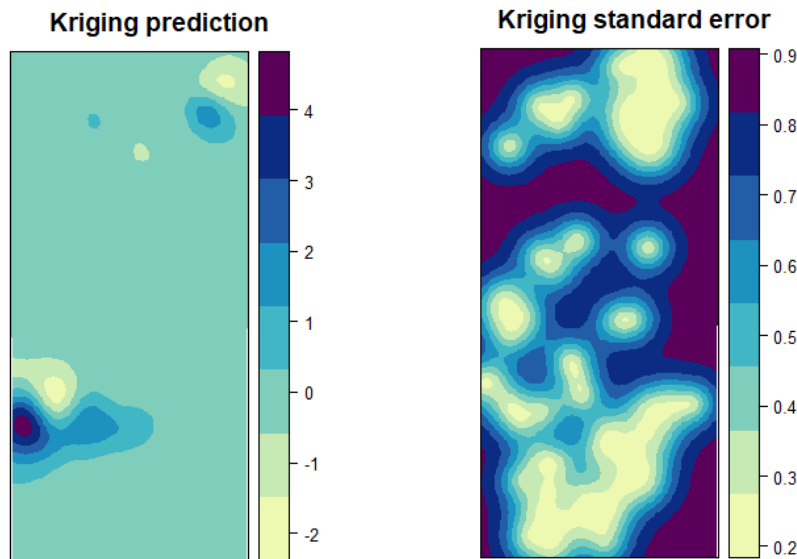


Figura 10. Interpolación Kriging del Cu en el área de estudio.

Sin embargo, se cambia la estrategia y no es utilizada como otra de las variables para determinar los blancos de exploración, por el contrario, se aplica para predecir el Cu en el área de estudio, a través de Machine Learning (usando el software R Studio), por medio de una regresión lineal.

El objetivo es obtener un ráster complementario al de los blancos de interés, para generar un nuevo producto que considere el resultado del análisis multicriterio (AHP) de las variables vistas anteriormente (Geología, Alteración, Fallas, Franjas y Geofísica), más el resultado de la predicción del Cu.

De esta forma, lo primero que se realiza es un cruce de la ubicación de las muestras de Cu con las firmas espectrales de la imagen utilizada en este trabajo, es decir, cada punto se cruza con las 18 bandas de la imagen Landsat 8+SAR+índices y se obtiene el valor píxel de esa intersección para cada muestra (Tabla 6).

Tabla. 6: Resultado del cruce de las muestras de roca (Cu) y las firmas espectrales de la imagen Landsat 8+SAR+índices

x	y	Cu_PPM	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.1	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.2	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.3	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.4	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.5	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.6	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.7	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.8	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.9	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.10	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.11	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.12	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.13	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.14	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.15	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.16	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.17	L8_SAR_GEE_PSA056_AOI.18
497596	7422560	21	1.211654425	1.711892605	2.21314168	2.461059332	3.342936039	2.819793463	1.826545238	0.662035286	1.711892605	1.952772021	1.510493517	1.358332157	1.185525179	1.000000000	0.822222222	0.644444444	0.466666667	0.288888889
497577	7422460	248	1.111427426	1.600775838	2.099108696	2.303612947	3.213487148	2.607340813	1.888660192	0.653218329	1.600775838	2.007456064	1.530881763	1.394976974	1.23247683	1.069966667	0.900000000	0.733333333	0.566666667	0.400000000
497693	7422364	149	1.148403168	1.649721265	2.046838522	2.22416544	2.996339798	2.64203763	1.782334447	0.683112979	1.649721265	1.816278351	1.463886738	1.347174883	1.134101868	0.966666667	0.800000000	0.633333333	0.466666667	0.300000000
497903	7422224	23	1.387910843	1.935602427	2.425688028	2.787035704	3.85541296	3.342505455	1.747726083	0.629164279	1.935602427	1.991841316	1.589410067	1.383338213	1.153450012	0.983333333	0.816666667	0.650000000	0.483333333	0.316666667
497996	7422435	59	1.054274201	1.503744125	1.921027064	2.150271654	2.929950476	2.755476475	1.822132349	0.655651748	1.503744125	1.948436856	1.525200009	1.362595439	1.063318968	0.896666667	0.733333333	0.566666667	0.400000000	0.233333333
498039	7422437	44	1.148946643	1.633722901	2.109442949	2.413724422	3.297680616	3.037622452	1.835979939	0.639674723	1.633722901	2.018506765	1.56329453	1.366220832	1.085612416	0.916666667	0.750000000	0.583333333	0.416666667	0.250000000
497776	7422521	34	1.00602448	1.384869456	1.685352044	1.675778831	2.067619085	1.97359252	1.59573853	0.776425421	1.384869456	1.493806468	1.287953734	1.233826399	1.04764235	0.880000000	0.716666667	0.550000000	0.383333333	0.216666667
497625	7422607	276	1.251791239	1.759145141	2.265845299	2.516148329	3.158973932	2.705511093	1.810082436	0.71727258	1.759145141	1.795743823	1.394170165	1.255480051	1.167607069	0.996666667	0.833333333	0.666666667	0.500000000	0.333333333
497531	7422558	28	1.350437641	1.938879848	2.744907141	2.883957624	4.067627907	2.647017002	2.032605648	0.674817681	1.938879848	2.097926855	1.481881738	1.410432577	1.536683679	1.366666667	1.200000000	1.033333333	0.866666667	0.700000000
497304	7422629	29	1.174731016	1.645480394	2.10003376	2.447278261	3.449846268	2.67243433	1.787672043	0.608732581	1.645480394	2.096558009	1.642757535	1.409666538	1.29090035	1.120000000	0.953333333	0.786666667	0.620000000	0.453333333
497267	7422742	271	1.352369666	1.850377798	2.393153906	2.812944889	4.044064999	3.020493269	1.769600391	0.591769397	1.850377798	2.185534716	1.689847469	1.437662363	1.338875651	1.166666667	1.000000000	0.833333333	0.666666667	0.500000000
497613	7422916	14	1.716517568	2.429037809	3.332403421	3.797752142	4.522161484	3.432186365	1.94137454	0.736904979	2.429037809	1.861708999	1.357027054	1.190746903	1.31757462	1.146666667	0.983333333	0.816666667	0.650000000	0.483333333
497942	7422666	13	1.027114034	1.451622367	1.769101977	1.968177795	2.350529671	2.156645298	1.722400784	0.752639711	1.451622367	1.619243264	1.328656912	1.194266915	1.089900851	0.920000000	0.753333333	0.586666667	0.420000000	0.253333333
497863	7420643	18	1.867644072	2.538650513	3.538702965	4.120485783	4.976629257	3.611738443	1.894741654	0.711064219	2.538650513	1.960344434	1.406342745	1.207777262	1.377904058	1.206666667	1.040000000	0.873333333	0.706666667	0.540000000
498116	7420376	7	1.85263896	2.461926937	3.197824478	3.586183548	4.110561848	2.788671494	1.726091504	0.777953148	2.461926937	1.669652224	1.285424471	1.146221876	1.474021554	1.306666667	1.140000000	0.973333333	0.806666667	0.640000000

Luego, se entrena el modelo de regresión con PLS, RF y SVM. Se compara la *performance* de los tres modelos usando el error cuadrático medio (RMSE), dando como mejor resultado el PLS, por tener el menor RMSE (Gráfico 1).

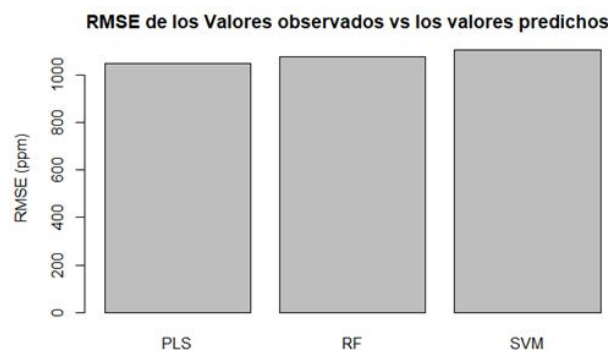


Gráfico 1. RMSE de los valores observados versus los valores predichos.



Finalmente, se procede con PLS a realizar la predicción del Cu sobre la imagen Landsat 8+SAR+índices (Figura 17).

Luego, el resultado de la predicción del Cu se suma al resultado del análisis multicriterio de todas las variables (Blancos de Exploración de Recursos Minerales Metálicos), y se obtiene la intersección de los productos para finalmente tener una cobertura vectorial (shape) correspondiente a los mejores blancos prospectivos para la exploración minera, entre los 21°30' y los 23°30' de latitud sur, de la Región de Antofagasta (Figura 18).

RESULTADOS

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos para cada variable de este trabajo.

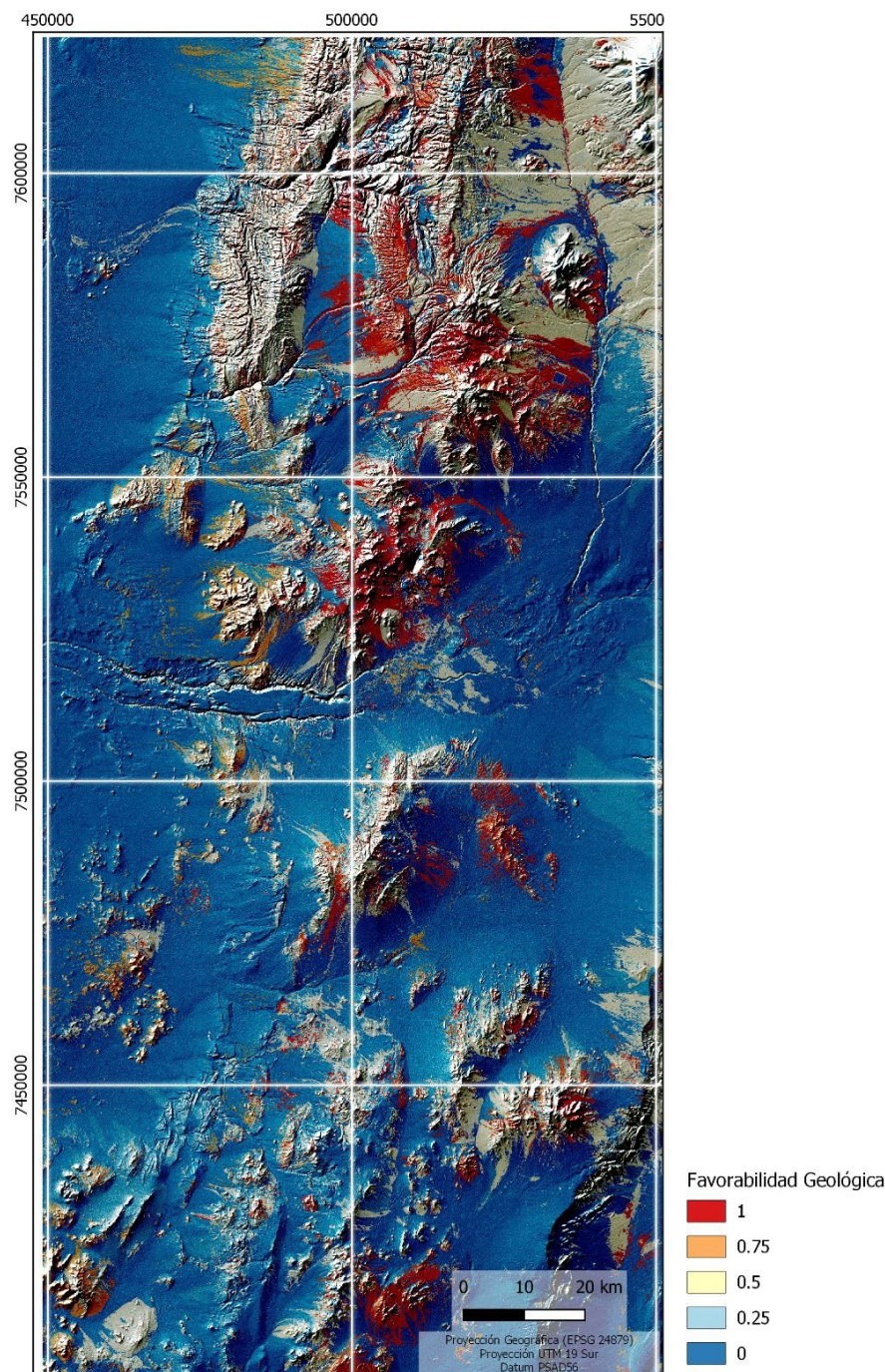


Figura 11. Mapa de Favorabilidad geológica, se aprecian en naranjos y rojo las zonas con potencial prospectivo.

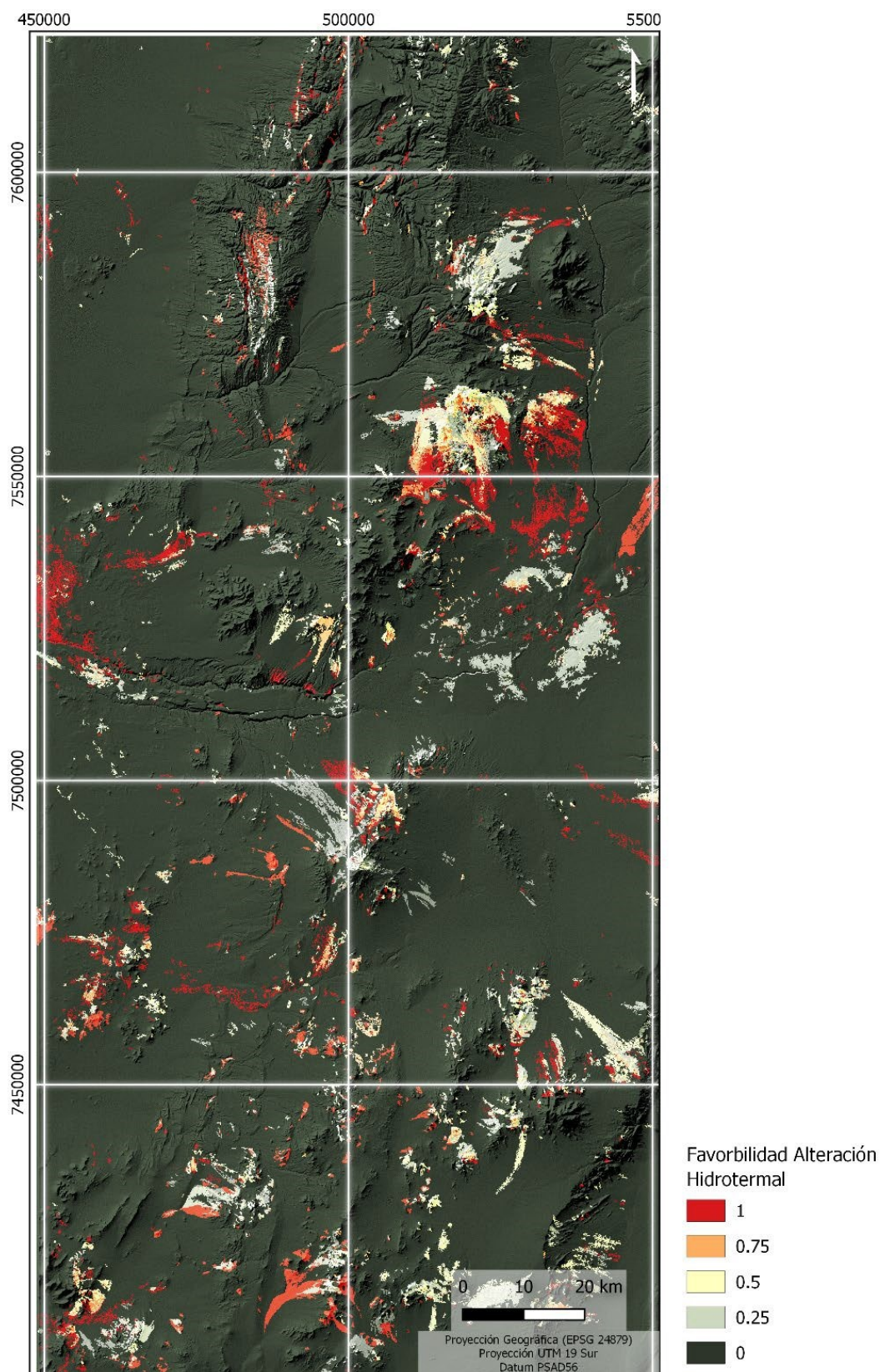


Figura 12. Mapa de Favorabilidad de Alteración Hidrotermal, se aprecian en amarillos, naranjos y rojo las mejores zonas con potencial prospectivo.

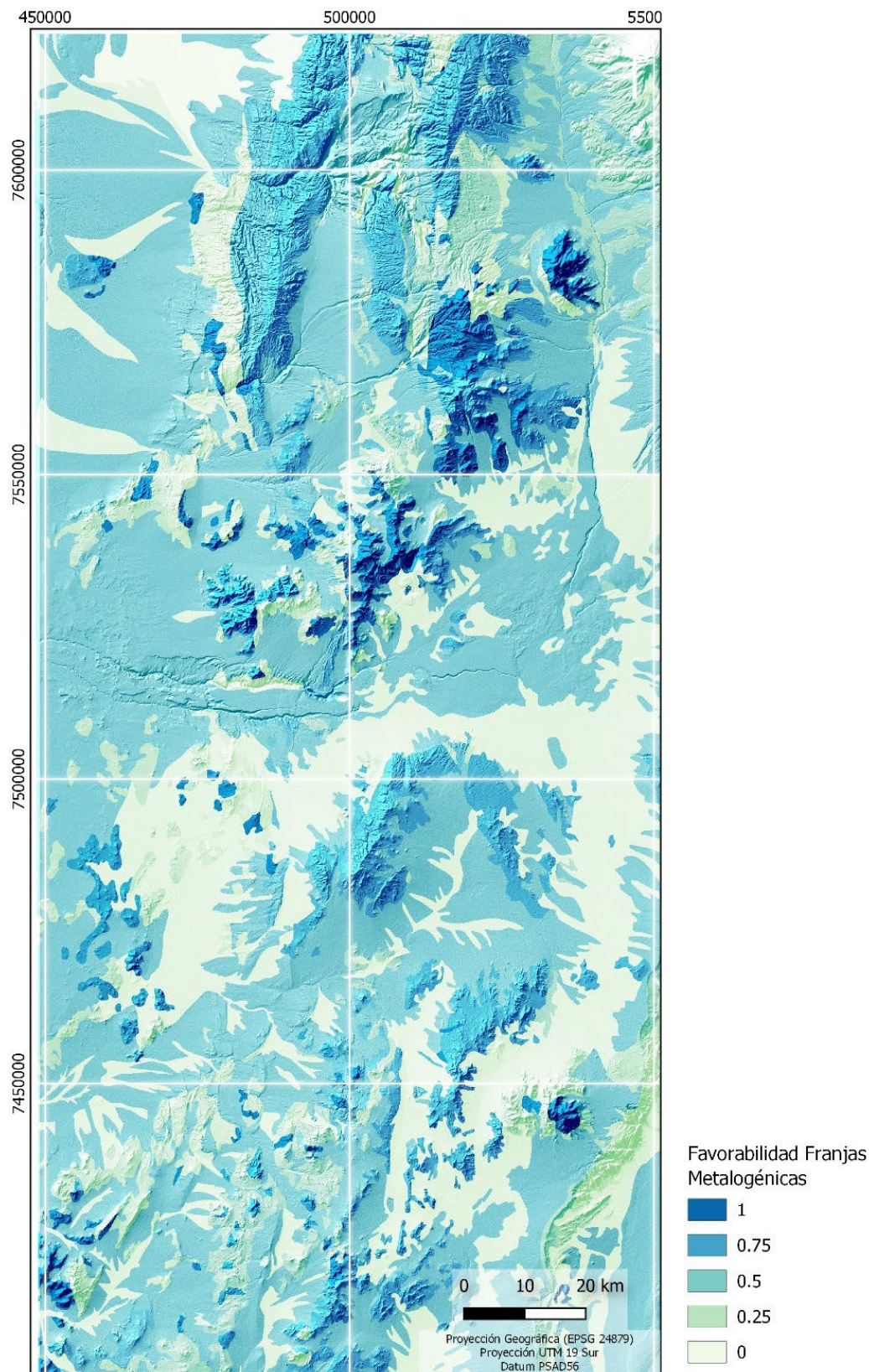


Figura 13. Mapa de Favorabilidad de Franjas Metalogénicas, se destacan en colores azules y celestes oscuros las mejores zonas con potencial prospectivo.

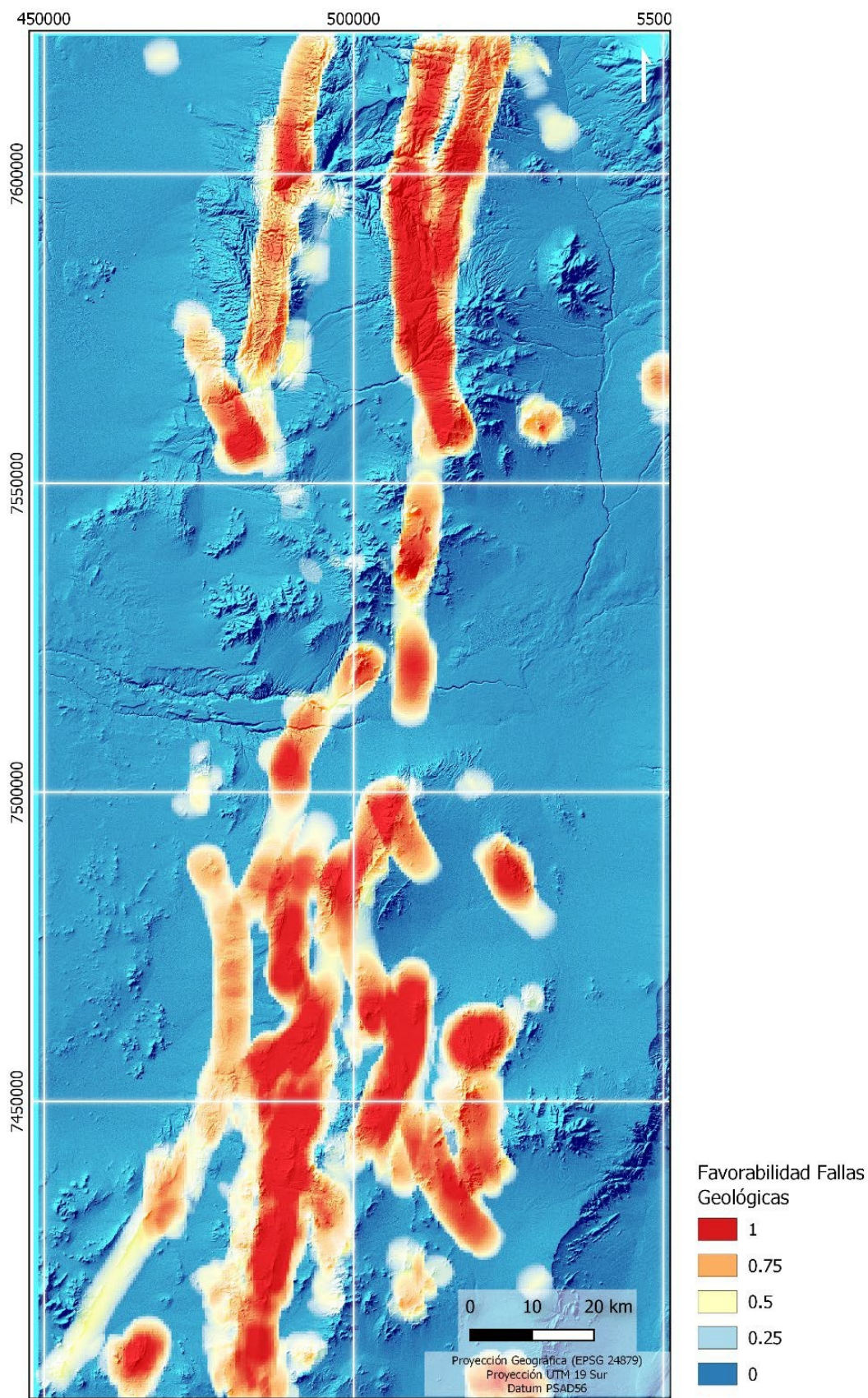


Figura 14. Mapa de Favorabilidad de Fallas Geológicas, se destacan en colores amarillos, naranjos y rojo las principales estructuras (Traza Falla Oeste) que contienen mineralización.

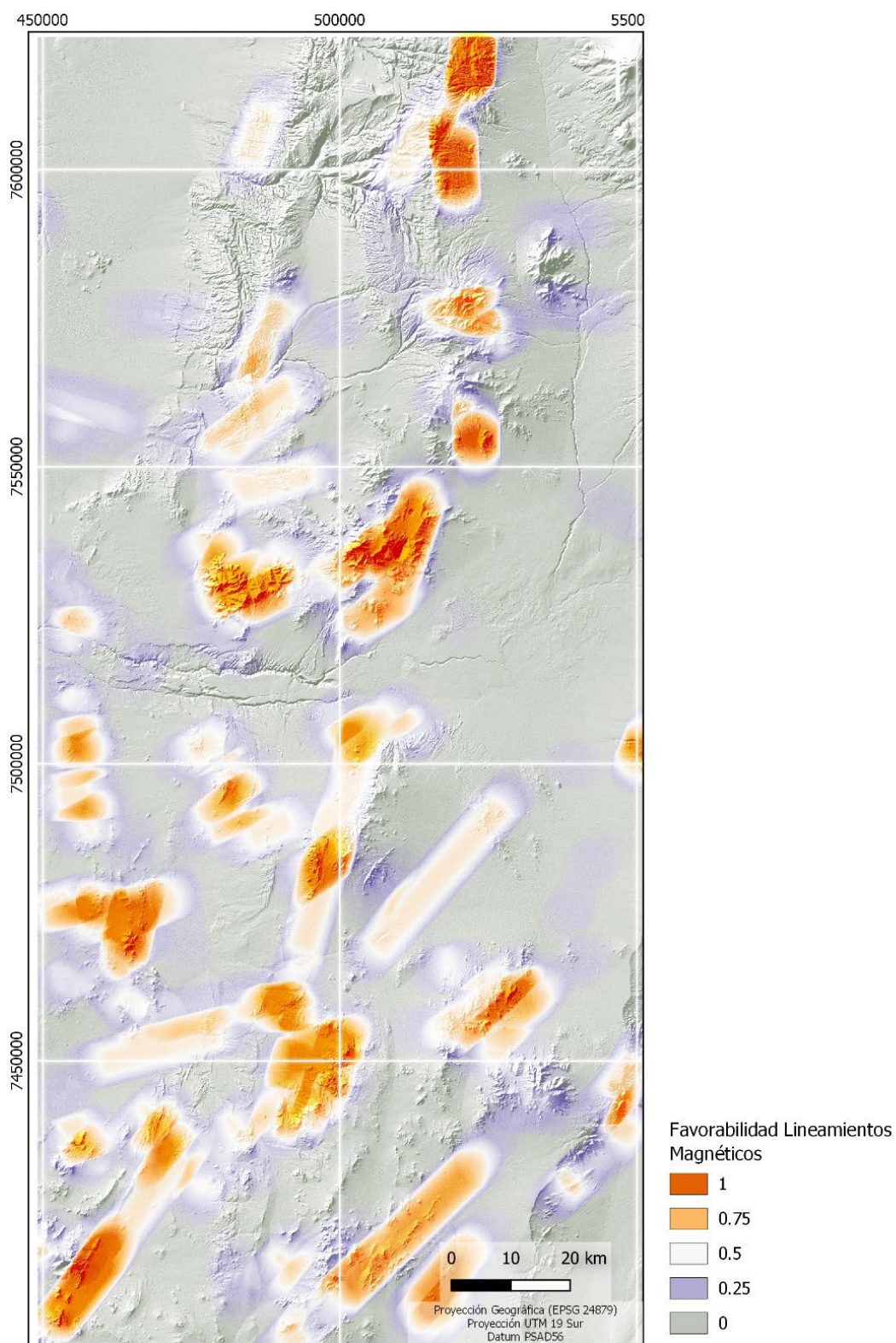


Figura 15. Mapa de Favorabilidad de Lineamientos magnéticos, se destacan en colores naranjos y rojo el límite entre un bajo y un alto magnético, característicos de los yacimientos de esta zona.

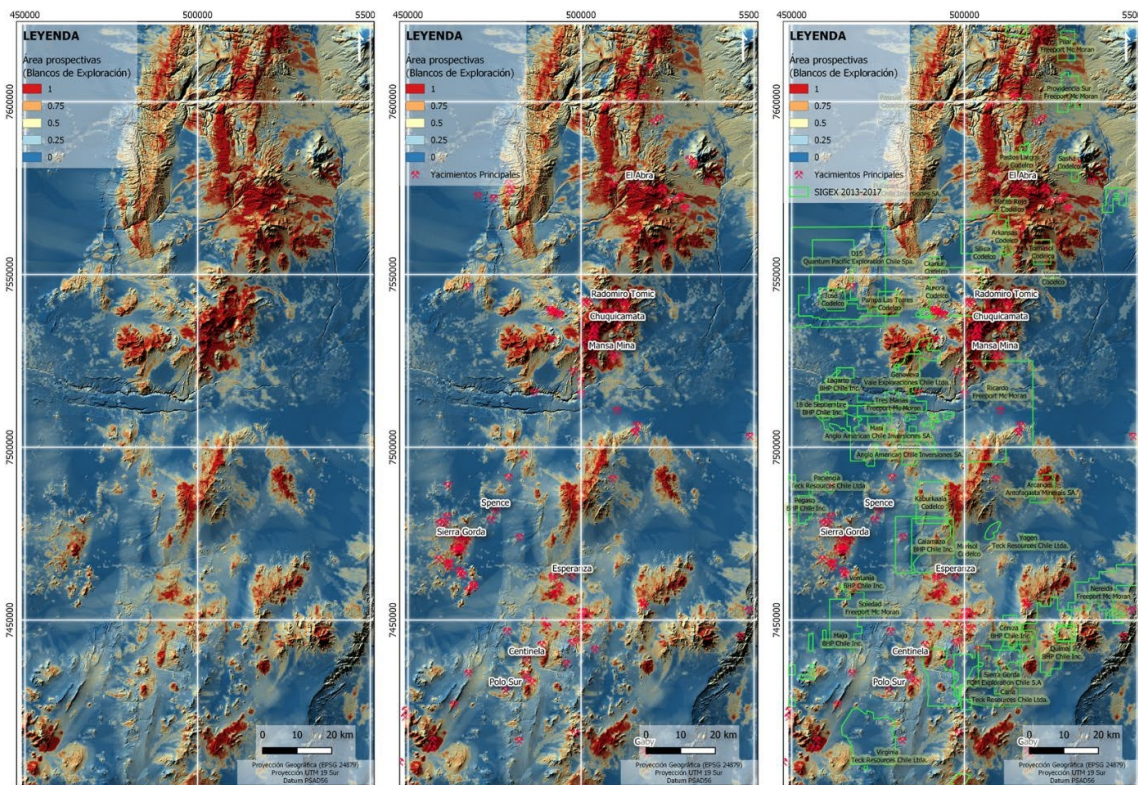


Figura 16. Mapa de áreas prospectivas de recursos minerales metálicos, se destaca en color naranjos y rojos las zonas de mejor ponderación (derecha), se valida el resultado con la incorporación de los principales yacimientos del área como; Chuquicamata, Spence, Sierra Gorda, entre otros (centro), se cargan las áreas del Sistema de Información Geológica de Exploración (SIGEX) reportados entre el 2013 y el 2017 del Sernageomin, para ver que se ha explorado de los blancos obtenidos.

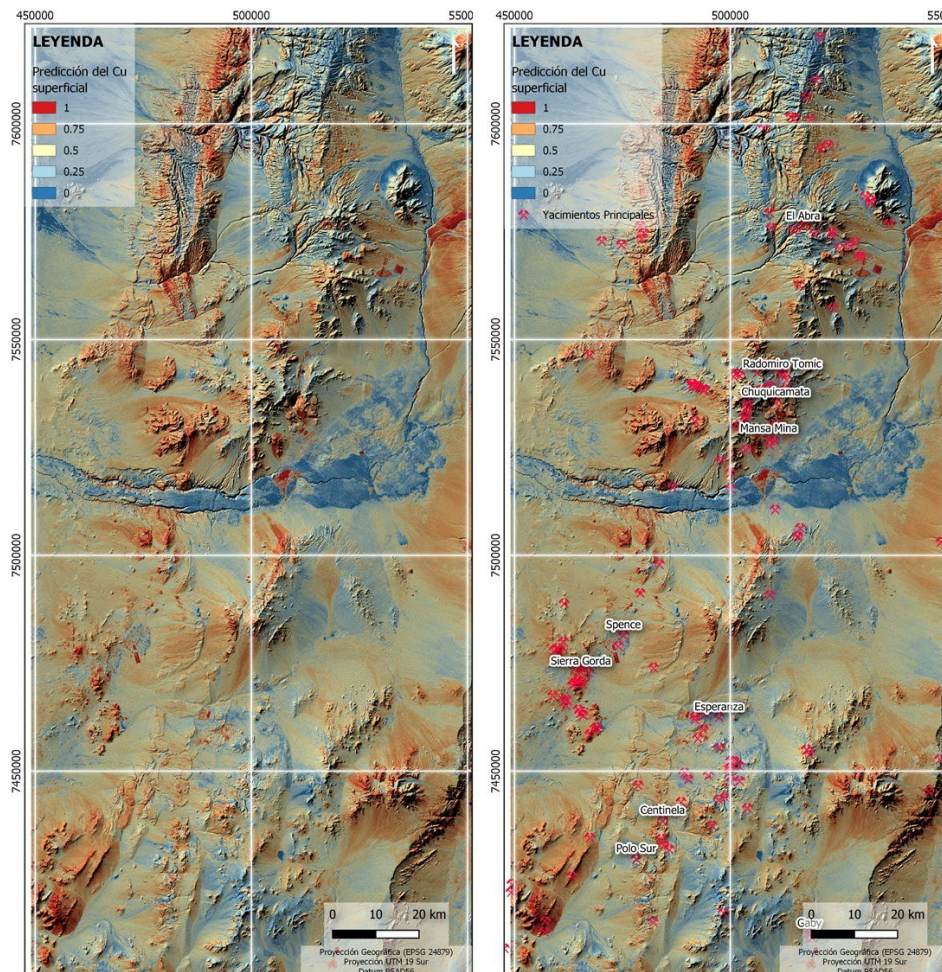


Figura 17. Mapa de predicción del Cu en superficie, en color rojo destaca las zonas de mayor interés (derecha) y se valida el resultado con la incorporación de los principales yacimientos del área (izquierda).

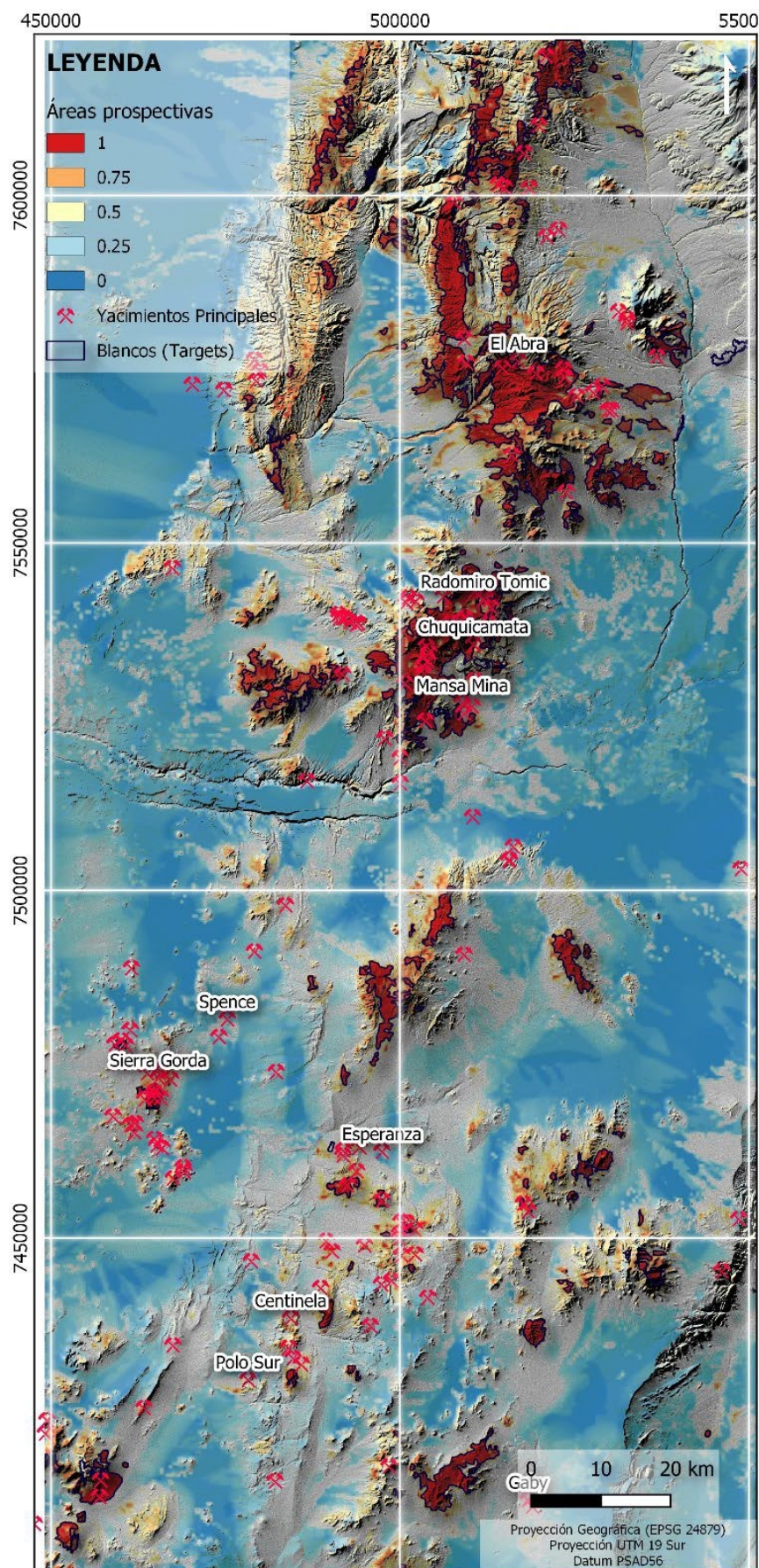


Figura 18. Definición de blancos de interés para exploración minera, se obtiene con la suma del mapa de áreas prospectivas más el de predicción del Cu, definiendo varios lugares de interés para posibles futuros yacimientos.

CONCLUSIONES

El presente estudio(*) utilizó como estructura de análisis una rama de la inteligencia artificial (Machine Learning) y el análisis multicriterio, para determinar blancos de exploración minera.

Cabe señalar que la exploración geológica en Chile tiene una metodología de trabajo muy madura y que ha sido probada durante décadas con excelentes resultados, Chuquicamata, El Teniente, Collahuasi, Spence, Gaby, solo por nombrar algunos. Así también, como ha habido éxitos, también hay muchos proyectos que no estuvieron a la altura de lo que se requería y en la evaluación fueron descartados, por tener un bajo interés prospectivo. Las razones son múltiples, por ejemplo, malos resultados de las campañas de sondaje, por las bajas leyes del mineral, por encontrarse cubierto el yacimiento (potencial profundo), entre otras. Cada una de estas operaciones involucran millones de pesos a los inversionistas, los que cada vez están más conservadores a la hora de explorar, por los factores mencionados anteriormente.

En este contexto, el estudio se enfocó en dar una mirada a la utilización de los datos y analizarlos en múltiples dimensiones y niveles. Gran parte de las empresas cuentan con grandes repositorios de datos que generalmente son analizados de forma aislada, sin extrapolarlos a otras variables y quedando la mayoría de las veces almacenados en los datos históricos de una empresa. Sin embargo, la utilización del Machine Learning ofrece una nueva perspectiva, ya que permite analizar datos a partir de datos, correlacionándolos, extrayendo información, clasificándolos, clusterizando o realizando regresiones. Es decir, este tipo de modelos permite obtener nuevos resultados y una nueva mirada de los datos, a través de la programación de algoritmos que interrelacionen la información de las variables. El Machine Learning construye un algoritmo a medida de cada necesidad, con las variables y dimensiones que sean requeridas.

Este trabajo no consideró otros niveles de datos, que hubiesen nutrido aún más el modelo predictivo como, por ejemplo, información de sondaje, imágenes hiperespectrales, medición estructural, espectrómetro de minerales (Terraspec), por nombrar algunas. Por lo tanto, el método tiene la capacidad de hacer análisis y cruce de las variables con la información que esté disponible. El algoritmo permite la parametrización de todas las variables, así como el ajuste de la *performance* del modelo.

Con respecto a los resultados obtenidos, lo primero que resalta es que tanto en el análisis multicriterio como en la predicción con Machine Learning del Cu, se destacan los grandes yacimientos del área: Chuquicamata, Sierra Gorda, Spence, Esperanza, Gaby, El Abra, Distrito Centinela, Radomiro Tomic, Mansa Mina y Polo Sur. Esto sirve como primer validador del modelo. Un segundo elemento validador es la incorporación de los proyectos reportados por las empresas entre el 2013 y el 2017 a Sernageomin a través de SIGEX, donde algunos de estos proyectos fueron trabajos de exploración en los blancos obtenidos en los resultados de este trabajo.

Para finalizar, es importante señalar que el uso de inteligencia artificial, específicamente en trabajos de exploración geológica, requiere de toda la información que esté disponible para el proyecto, y que se encuentre espacialmente bien ubicada, para que el modelo sea coherente. Toda esta información sustenta al algoritmo predictivo, ya que, si hay inconsistencias en la información ingresada al modelo, este va a predecir erróneamente y los resultados serán incorrectos. Resulta también fundamental contar con especialistas, cuyo conocimiento geológico permita ir parametrizando, ajustando y evaluando el modelo resultante.

<https://www.sernageomin.cl/sigex/>

(*) El autor agradece a la Geóloga Paula Muñoz (Universidad de Chile), Sumitomo Metal Mining Chile, por su apoyo en el desarrollo de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

1. Aguilar, J. (2008). Caracterización Geotécnica y Estructural de La Rampa de Exploración y del Túnel de Drenaje, Mina Chuquicamata (Tesis de pregrado, Universidad de Chile).
2. ASF DAAC 2015, contains modified Copernicus Sentinel data 2019, processed by ESA.
3. Astudillo, N. (2008). Mineralogía Magnética y Paleomagnetismo en los Mega yacimientos tipo Pórfido-Cuprífero Chuquicamata y El Teniente, Chile (Tesis de doctorado, Universidad de Chile).
4. Camus I., F. 2003. Geología de los sistemas porfíricos en los Andes de Chile. SERNAGEOMIN: 267 p., il; fot.col., Santiago.
5. Gad, S. & T. Kusky (2006). Lithological mapping in the Eastern Desert of Egypt, the Barramiya area, using Landsat thematic mapper (TM). *Journal of African Earth Sciences*, 44(2): 196-202.
6. Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, & R. Moore (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*.
7. Lowell, J.D. & J.M. Guilbert (1970) Lateral and Vertical Alteration-Mineralization Zoning in Porphyry Ore-Deposits. *Economic Geology*, 65, 373-408.
8. Maksaev, V., B. Townley, C. Palacios, & F. Camus (2007). Metallic ore deposits. In *The Geology of Chile* (Moreno, T.; Gibbons, W.; editors). The Geological Society, London: 179-199. London.
9. Maksaev, V. & M. Zentilli (1999). Fission track thermochronology of the Domeyko Cordillera, Northern Chile: implications for Andean tectonics and porphyry copper metallogenesis. *Exploration and Mining Geology* 8 (1-2): 65-89.
10. Mpodozis, C.; N. Marinovic, & I. Smoje (1993). Eocene left lateral Strike-Slip faulting clockwise block rotations in the Cordillera de Domeyko, West of Salar de Atacama, Northern Chile. In *Symposium Andean Geodynamics*, No. 2: 225-228. Oxford, U.K.
11. Niemeyer, H. & Urrutia, C. (2009). Transcurrencia a lo largo de la Falla Sierra de Varas (Sistema de fallas de la Cordillera de Domeyko), norte de Chile. *Andean Geology*. 36. 37-49.
12. Ossandón G, R. Fréaut, LB. Gustafson, DD. Lindsay, & M. Zentilli (2001) Geology of the Chuquicamata Mine: A progress report: *Economic Geology* 96: 351-366.
13. Piñana, X. y J. Vivallos (2015). Relación entre mineralización y anomalías magnéticas entre los 25° y 26°S de Chile: Cordillera de la Costa y sector occidental de la Cordillera de Domeyko. *Congreso Geológico Chileno*, 14, La Serena, Chile, 4 - 8 octubre 2015, 2015, pp.180-183 (v.2)
14. Rose, A. W., H. E. Hawkes, & J. S. Webb (1979). *Geochemistry in Mineral Exploration*. Second edition. xvii + 657 pp.
15. Riedel, W. (1929): *Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen*. - *Zentralblatt fuer Mineralogie, Geologie und Palaeontologie* p.354-368 Stuttgart.
16. RStudio Team (2020). *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, PBC, Boston, MA URL. <http://www.rstudio.com/>
17. Sabins, F.F. (1999). Remote Sensing for mineral exploration. *Ore Geology Review*, 14(3-4): 157-183.
18. Sillitoe, R. & J. Perelló (2005). Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. 845-890.
19. Sovann, P. & Ch. Aing (2015). InVEST Implementation in the Eastern Plain Landscape: An InVEST Land Use/ Land Cover Map Preparation for Mondulkiri Province. 10.13140/RG.2.2.11658.31687.

20. Sultan, M., R.E. Arvidson, N.C. Sturchio (1986). Mapping of serpentinites in the Eastern Desert of Egypt using Landsat Thematic Mapper data. *Geology* 14, 995–999.
21. Villela, D. y J. Cantallopis (2016). Franjas metalogénicas de los Andes Centrales: blancos clave para la exploración minera. URL <https://www.cochilco.cl/Paginas/Inicio.aspx>

Hugo Neira Santander

Cartógrafo (UTEM), Postítulo en Geomática Aplicada (U. de Chile), Diplomado en Medioambiente y Ordenamiento Territorial, *"en curso"* (U. de Chile).

Especialista en modelos predictivos con Machine Learning, aplicado a la geología y minería. Durante seis años se desempeña como Encargado de la Unidad de Cartografía en el Departamento de Geología Aplicada del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Actualmente, se desempeña en la labor de GIS Manager de la Compañía Minera Sumitomo Metal Mining Chile.

Se sugiere citar:

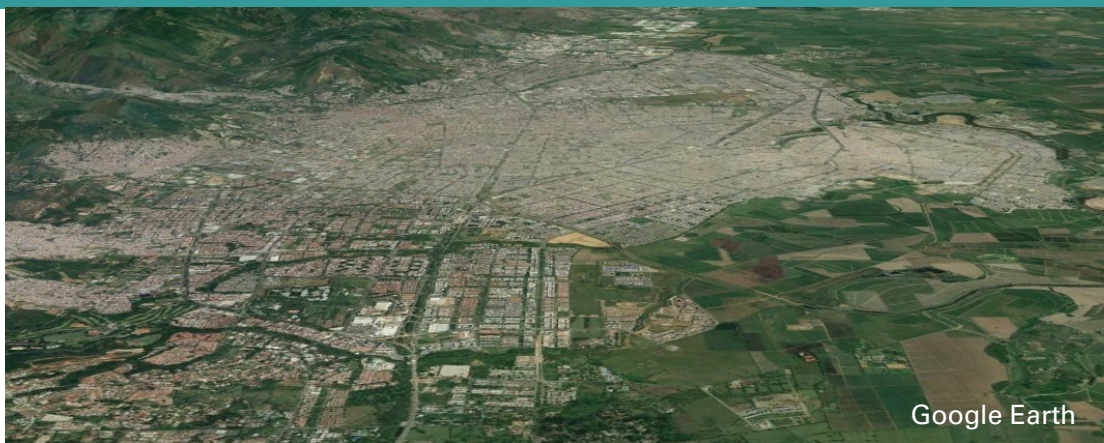
Neira Santander, H. (2021). Análisis Multicriterio y Predicción con Machine Learning para determinar blancos de exploración de recursos minerales metálicos tipo pórfidos cupríferos, depósitos Cu-(Mo), en la franja Paleoceno – Oligoceno entre 21°30'S y 23°30'S de la Región de Antofagasta, Chile. *Revista Cartógrafo.CL* 1(1), pp. 77-98.



Bajo Licencia Creative Commons
Atribución 4.0 Internacional.



Cartógrafo.CL/01-2021



Google Earth

Ana María Vélez
Bohórquez

Ingeniera Topográfica

Colombia



anamariavelez94@hotmail.com

Evaluación de la distribución de hurtos a personas para la ciudad de Santiago de Cali, 2015 – 2019

RESUMEN

La presente monografía de grado contiene la metodología utilizada para evaluar la distribución de hurtos^(*) a personas en la ciudad de Santiago de Cali. En primera instancia, a partir de información suministrada por la Policía Metropolitana y la Infraestructura de Datos Espaciales de Santiago de Cali, se generaron para la ciudad representaciones gráficas de los datos históricos de hurtos a personas en los últimos cinco años. Posterior a esto se determinó el tamaño de la muestra, de acuerdo con la población de Santiago de Cali, para conocer mediante encuestas, dónde los ciudadanos han sido víctimas de hurto y cuál es su percepción respecto a la zona que consideran con mayor frecuencia de hurtos a personas.

Los resultados indicaron que, para una temporalidad anual, el valor máximo de hurtos a personas reportados a la policía fue en el año 2019 con 20577 casos; de los cuales, 797 hurtos a personas sucedieron en el barrio San Pedro zona noroccidente, perteneciente a la comuna 3. Finalmente, se identifica que la percepción de la comunidad encuestada considera que la mayor frecuencia de hurtos se lleva a cabo en la zona sur. Es decir, no existe correspondencia entre lo que percibe la ciudadanía y lo que reporta la Policía Metropolitana para la ciudad de Cali.

(*) Se entiende por hurto el delito de apoderamiento ilegítimo de un elemento ajeno, sin usar fuerza tipificada.

INTRODUCCIÓN

El análisis espacial convierte la información en una cartografía, con el objetivo de identificar patrones, características y tendencias de lo que se visualiza para la toma de decisiones (Arriagada, 2009). En la actualidad, gracias al avance tecnológico, existen diversas técnicas y herramientas que permiten analizar, recopilar y almacenar datos geográficos de hechos delictivos, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica, que complementado con otras ciencias conllevan a la denominada geografía del crimen (Ruiz García, 2012).

Rogerson & Yamada (2008) destacan la importancia de los SIG y la detección estadística para representar y vigilar conglomerados delictivos. En su estudio proponen emplear el análisis de densidad de Kernel, [ecuación \(1\)](#), que a partir de puntos en un sector determinado visualizan su intensidad, generando una superficie que indica el número de delitos por unidad de área, y permite interpretar fácilmente la distribución espacial de los datos, gracias a su gama de colores.

Donde:

$f(x,y)$ es el valor de la densidad en la ubicación (x,y)

n es el número de incidentes/puntos

h es el valor de ancho de la banda

d_l es la distancia geográfica entre el incidente l y la ubicación (x,y)

k es la función de densidad conocida como Kernel (Chainey & Ratcliffe, 2013)

$$f(x, y) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n k \frac{d_l}{h} \quad (1)$$

Levin (2013) describe el uso de un programa de estadística espacial para el análisis de ubicación de índices delictivos, mediante el índice del vecino más cercano, para determinar la distancia media entre sucesos y compararlos posteriormente con los que se esperaría si estos sucesos se distribuyen de forma aleatoria. El rango de valores del índice varía de -1 a 1, donde los valores ≤ 0 y $\cong -1$ indican que estos están más concentrados de lo que se espera en una distribución aleatoria. Valores ≥ 0 y < 1 indican que los sucesos se distribuyen de manera aleatoria; mientras que, los valores $=1$ indican que los hechos se encuentran más dispersos de lo que se espera en una distribución aleatoria.

Gómez Garzón (2019) en su artículo de determinación de zonas vulnerables en cuanto a la inseguridad, resalta la importancia de la distribución espacial, empleando un método determinístico como la interpolación de distancia inversa ponderada (IDW). Este método representa el área de estudio como una matriz, donde los valores de cada celda se establecen a partir de la ponderación lineal de un conjunto de puntos próximos a la celda evaluada, elevando a una potencia de manera inversa la distancia a cada punto, expresado en la [ecuación \(2\)](#).

Donde

$Z(X_0)$ es el valor interpolado;

n es el total de puntos a incluirse en el conjunto de ponderación;

x_i es el valor de cada punto;

h_{ij} es la distancia entre la celda evaluada y los puntos del conjunto de datos

β es la potencia.

$$Z(X_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (2)$$

Leigh *et al.* (2019) emplean el denominado mapeo del crimen (*crime mapping*) o también llamados puntos calientes (*hot spots*) para identificar aquellas zonas con mayor presencia de delitos. En este caso como posibles lugares de patrullaje con el fin de ayudar a reducir el crimen. Los autores destacan que este tipo de métodos dan como resultado un patrullaje diario más efectivo, reduciendo tiempos de respuesta con mayor precisión, y permiten realizar simulaciones basadas en agentes. También resaltan la importancia de utilizar diferentes puntos calientes en diferentes momentos del día, con el fin de ver cuál es el comportamiento del crimen en un área específica, en cuanto a factores de iluminación, cantidad de personas y espacios abiertos.

En Colombia, la modalidad de hurto a personas es el acto más frecuente ya que reporta 1136 denuncias al día (El Espectador, 2019). Santiago de Cali es considerada como la tercera ciudad capital con mayor presencia de hurtos en todas las modalidades (Fiscalía General de la Nación, 2018); dichos delitos se relacionan directamente con diferentes variables de índole espacial: factores de oportunidad, características demográficas y económicas (Fraile, 2007).

El presente proyecto se justifica desde el aspecto económico, ya que el comercio se ve afectado por el incremento de hurtos, haciéndose necesario determinar la vulnerabilidad de estas zonas para poder tomar medidas al respecto (cámaras de seguridad, rejas, vigilancia, entre otros). También puede ser una herramienta útil para las aplicaciones (*apps*) de movilidad ya que estas nos indican la ruta más rápida pero no siempre esta es la ruta más segura.

Desde el aspecto social, y de acuerdo con lo señalado por el expresidente Juan Manuel Santos, “La mejor forma de combatir el delito es la prevención” (Presidencia de la República, 2014), este proyecto contribuye a fortalecer e implementar la geoprevención de hurtos a personas y la recuperación de espacios en malas condiciones en cuanto a maleza e iluminación. Adicionalmente, este tipo de estudios son de interés para entidades como la Policía Metropolitana de Cali, Observatorio de Seguridad, Instituto de Estudios Urbanos y Juntas de Acción Comunal.

Con base en lo anterior, se propone dar respuesta a la siguiente formulación: ¿Cuál es la distribución actualizada de hurtos a personas para la ciudad de Santiago de Cali?, mediante el objetivo principal: “Evaluar la distribución espacial de los hurtos a personas en la ciudad de Santiago de Cali”, destacando la importancia de identificar la localización de los actos delictivos en un centro poblado, ya que estos no ocurren de manera aleatoria de acuerdo con su posición geográfica (Akpınay y Usul, 2004). Asimismo, esta monografía queda disponible para que las instancias correspondientes y los ciudadanos en general la utilicen como herramienta para la toma de medidas de geoprevención (Sanz, 2008).

Para alcanzar el objetivo principal primero se identificará y actualizará la distribución espacial de los hurtos a personas en la ciudad de Santiago de Cali en los últimos 5 años. Luego, se hará la comparación de los datos de hurtos obtenidos en los últimos 5 años con la percepción ciudadana y, finalmente, se integrarán los datos obtenidos de forma espacial, generando una representación gráfica, para facilitar la interpretación de la información.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Área de estudio

Este estudio se realizó en la ciudad de Santiago de Cali (3° 26' 24" N y 76° 31' 11" W), capital del Departamento del Valle del Cauca, la tercera ciudad más poblada de Colombia. Está situada en la región sur del departamento entre la cordillera occidental y la cordillera central de los Andes. La ciudad se compone por 22 comunas y 345 barrios. A la fecha cuenta con una población de 2.497.562 habitantes (DANE, 2018). [Figura 1.](#)

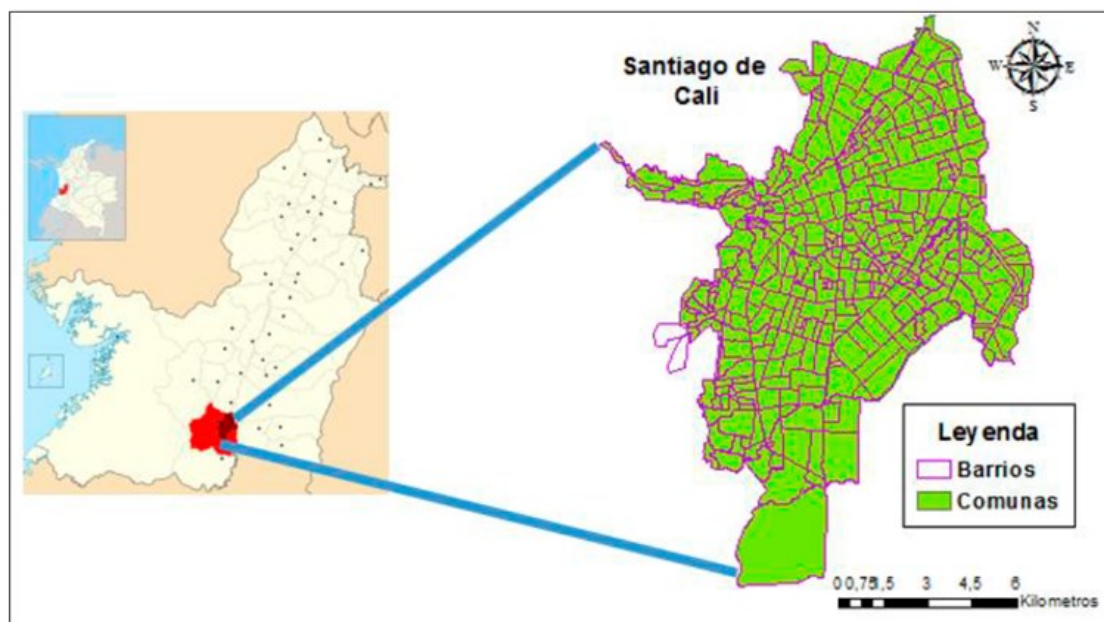


Figura 1. Identificación de la zona de estudio. Elaboración propia.

Para facilitar la interpretación de la información se divide la ciudad en 5 zonas (IDESC, 2016), como se grafica en la Figura 2.

- La zona sur está compuesta por 111 barrios, pertenecientes a las comunas 10, 17, 18, 19, 20 y 22.
- La zona del Distrito de Aguablanca está compuesta por 54 barrios, pertenecientes a las comunas 13, 14, 15 y 21.
- La zona nor-orienté está compuesta por 81 barrios, pertenecientes a las comunas 4, 5, 6, 7 y 8.
- La zona nor-occidente está compuesta por 57 barrios, pertenecientes a las comunas 1, 2, 3 y 9.
- La zona orienté está compuesta por 42 barrios, pertenecientes a las comunas 11, 12 y 16.

Actualmente, la ciudad cuenta con 2997 equipamientos, de los cuales 1209 son de propiedad privada, 1543 de propiedad pública y 245 sin definición de propiedad. Estos equipamientos se clasifican según su servicio en: salud, teatro, cultura, desarrollo comunitario, desarrollo comunitario y social; desarrollo social, organización social, primera infancia, recreación, salas de teatro, salas de exposición. En la Figura 3, podemos observar que más del 40% de los equipamientos en Santiago de Cali corresponden a organización social y desarrollo comunitario.

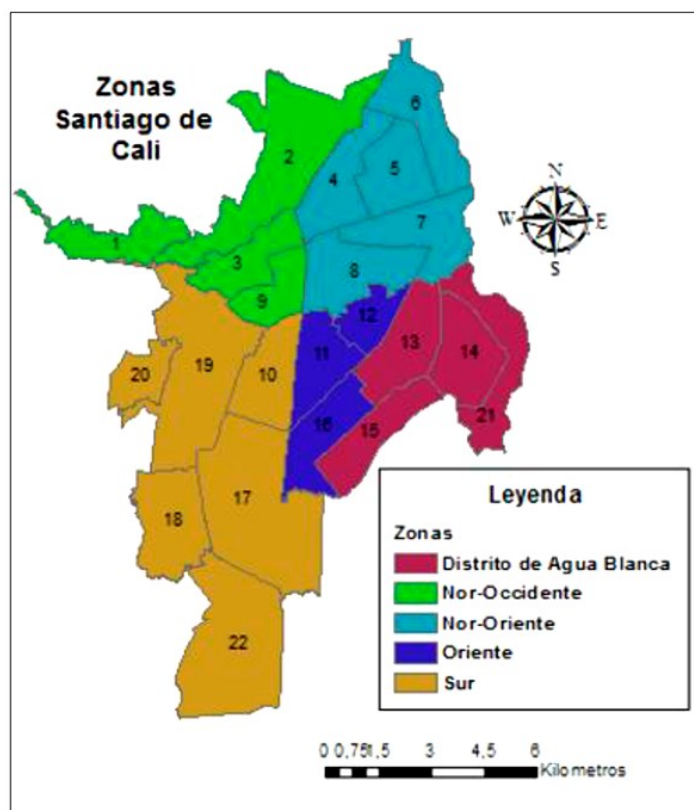
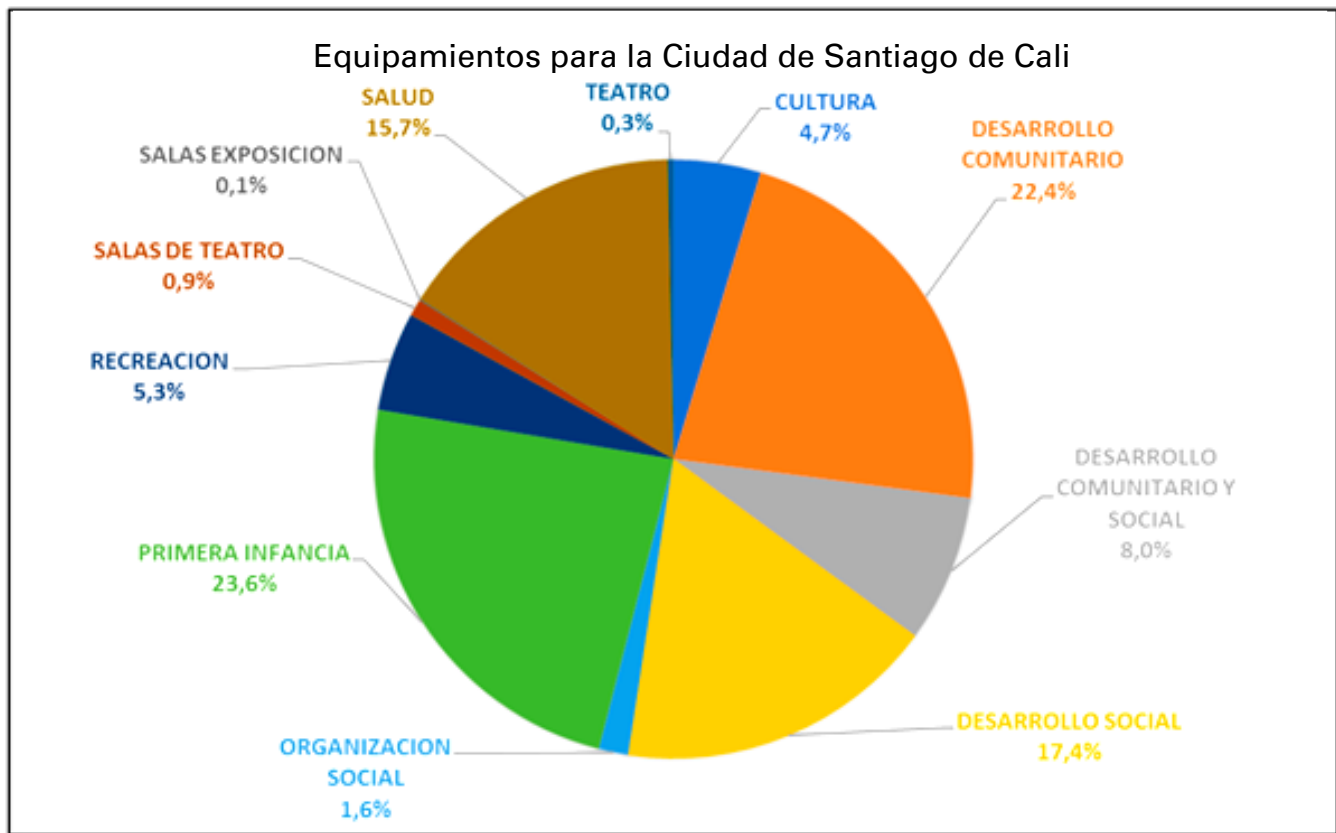


Figura 2. División Zonas Santiago de Cali
Fuente: IDESC (30 de junio de 2016). Mapas de Divisiones Administrativas.



La ciudad, en la actualidad, cuenta con 9 cuadrantes con diferentes tipos de atención y prioridades por parte de la Policía de acuerdo con las características sociales, demográficas y geográficas de la zona en que se encuentren. Estos cuadrantes se definen de acuerdo con las características mostradas en la [Figura 4](#).

Figura 3. Tipos de equipamientos para la ciudad de Santiago de Cali. Elaboración propia.



Figura 4. Variables para la definición de un cuadrante. Fuente: Policía Nacional de Colombia (nov. 2010). Variables a considerar en la definición de un cuadrante.

En la [Figura 5](#) podemos ver la distribución de las estaciones de Policía para la ciudad de Santiago de Cali.

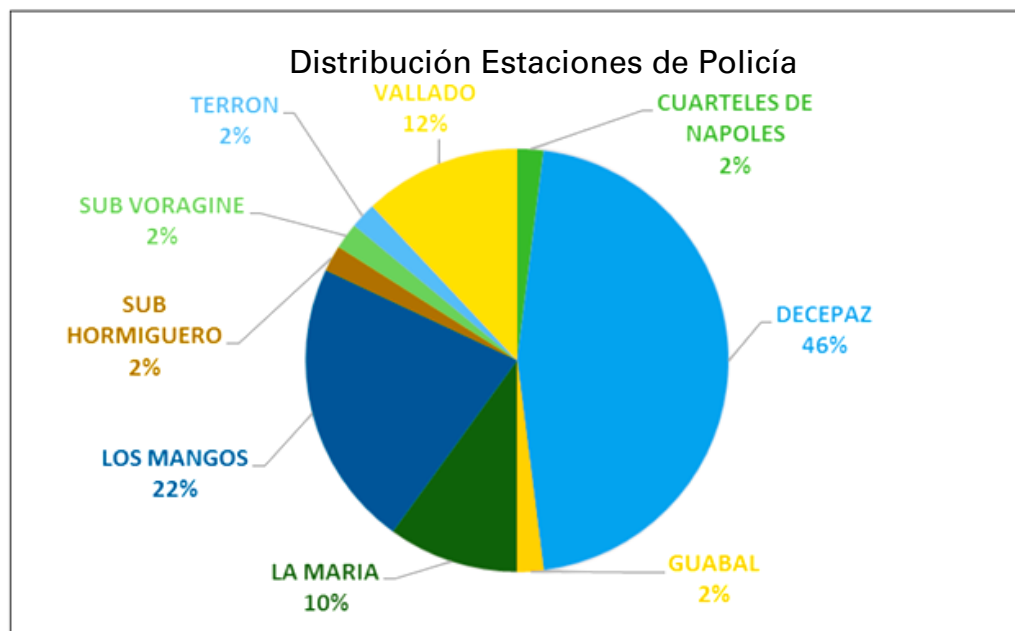


Figura 5. Distribución de cuadrantes de Policía para la ciudad de Santiago de Cali. Elaboración propia.

Identificación de la distribución de hurtos a personas

Para obtener la distribución de hurto a personas, se gestionó el acceso a la base de datos con la entidad competente, en este caso la Policía Metropolitana de Santiago de Cali, vía correo electrónico. Siguiendo la metodología planteada por Leigh *et al.* (2019), con el fin de analizar puntos específicos en diferentes tiempos del día, mes y año, se solicitó la información diaria entre el 2015 al 2019.

Comparación de los resultados con la percepción ciudadana

Para la percepción ciudadana, primero se determinó el tamaño de la muestra de población, que se requería para la encuesta y se seleccionaron 4 preguntas del manual para encuestas de victimización de las Naciones Unidas (Europa, 2009).

Para determinar el tamaño de la muestra se hizo uso de la siguiente fórmula, ecuación (3), propuesta por Murray y Larry (2005):

Donde:

- n es el tamaño de la muestra poblacional a obtener.
- N es el tamaño de la población total.
- σ representa la desviación estándar de la población. En caso de desconocer este dato es común utilizar un valor constante que equivale a 0.5.
- Z es el valor obtenido mediante niveles de confianza. Su valor es una constante, por lo general se tienen dos valores dependiendo el grado de confianza que se desee, siendo 99% el valor más alto (este valor equivale a 2.58) y 95% (1.96) el valor mínimo aceptado para considerar la investigación como confiable.
- e representa el límite aceptable de error muestral, generalmente va del 1% (0.01) al 9% (0.09), siendo 5% (0.05) el valor estándar usado en las investigaciones.

$$n = \frac{Z^2 \sigma^2 N}{e^2(n+1) + Z^2 \sigma^2} \quad (3)$$

Integración de los datos obtenidos de forma espacial

En esta fase, el objetivo es espacializar los datos de concentraciones obtenidos anteriormente para poder visualizar e identificar cuáles son las principales zonas de impacto relacionadas con hurtos a personas.

El sistema de referencia empleado para la generación de las salidas gráficas se presenta en la [Tabla 1](#).

MAGNA_Colombia_Oeste			
WKID	3115	Authority	EPSG
Projection	Transverse_Mercator		
False_Easting	1000000		
False_Northing	1000000		
Central_Meridian	-77.07750792		
Scale_Factor	1		
Latitude_Of_Origin	4.596200417		
Linear Unit	Meter (1.0)		
Geographic Coordinate System	GCS_MAGNA		
Angular Unit	Degree (0.0174532925199433)		
Prime Meridian	Greenwich (0.0)		
Datum	D_MAGNA		
Spheroid	GRS_1980		
Semimajor Axis	6378137		
Semiminor Axis	6356752.314		
Inverse Flattening	298.2572221		

Tabla 1. Sistema de referencia utilizado para el procesamiento de datos. Elaboración propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificación de la distribución de hurtos a personas

En la [Figura 6](#) se evidencia una parte de la base de datos de denuncias suministrada por la Policía Metropolitana de Santiago de Cali; corresponde al archivo 04.031. HISTÓRICO HURTO CALI, el cual tiene 11 campos correspondientes a: descripción_conducta, año, fecha, mes, hora, día de la semana, municipio, comuna, barrio, modalidad, armas_medios.

Figura 6. Esquema base de datos suministrada. Fuente: Ministerio de Defensa Nacional. Policía Nacional. Seccional de Investigación criminal e Interpol. Hurto común Municipio de Cali (01 de enero de 2015 al 31 de diciembre de 2019).

DESCRIPCION CONDUCTA	AÑO	FECHA	MES	HORA	DIA	MUNICIPIO	COMUNA	BARRIO	MODALIDAD	ARMAS MEDIOS
ARTÍCULO 239. HURTO PERSONAS	2015	1/01/2015	Enero	14:00	Jueves	CALI (CT)	COMUNA 14	MANUELA BELTRAN E14	ATRACO	ARMA CORTOPUNZANTE
ARTÍCULO 239. HURTO PERSONAS	2015	1/01/2015	Enero	0:00	Jueves	CALI (CT)	COMUNA 17	BOSQUES DEL LIMONAR E17	FACTOR DE OPORTUNIDAD	SIN EMPLEO DE ARMAS
ARTÍCULO 239. HURTO PERSONAS	2015	1/01/2015	Enero	6:00	Jueves	CALI (CT)	COMUNA 12	VILLANUEVA E12	FACTOR DE OPORTUNIDAD	SIN EMPLEO DE ARMAS
ARTÍCULO 239. HURTO PERSONAS	2015	1/01/2015	Enero	8:00	Jueves	CALI (CT)	COMUNA 08	VILLACOLOMBIA E8	FACTOR DE OPORTUNIDAD	SIN EMPLEO DE ARMAS

En la **Figura 7**, se grafica la cantidad de denuncias de casos de hurto a la Policía Metropolitana de Cali, entre el 2015 y el 2019. Se puede observar que el mayor número de casos reportados se presentó en el año 2019, con un incremento de 11923 casos en comparación al 2015.

Año	Casos
2015	8654
2016	10373
2017	13837
2018	16005
2019	20577

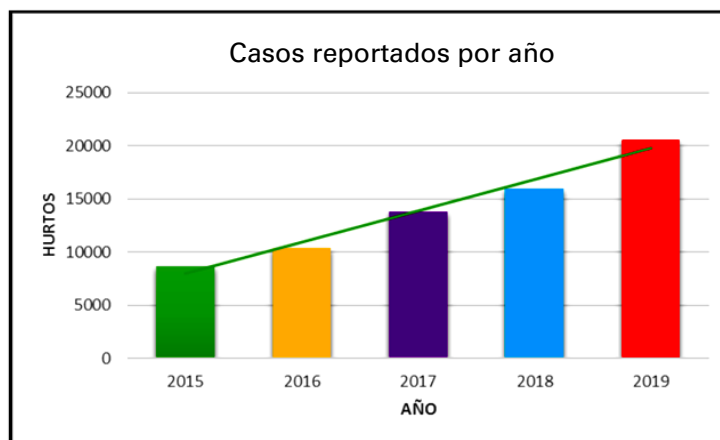


Figura 7. Casos de hurtos reportados del 2015 al 2019. Elaboración propia.

En la **Figura 8** se observan los casos de hurtos a personas por mes para el 2019, siendo este el año con mayor número de casos reportados de la muestra solicitada. El mes con mayor presencia de hurtos corresponde a diciembre, con un total de 2326 hurtos a personas.

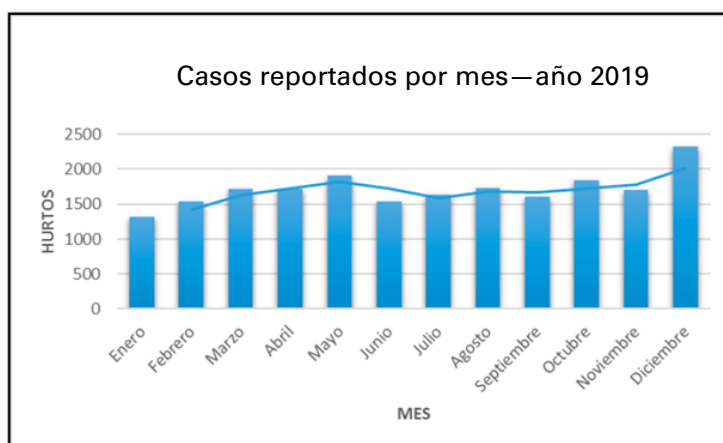


Figura 8. Casos de hurtos reportados por mes para el año 2019. Elaboración propia.

En la **Figura 9** se representan los hurtos a personas por día de la semana correspondientes al mes de diciembre, siendo este el mes con mayor presencia de hurtos para el año 2019. Los datos indican que los lunes del mes de diciembre del año 2019 fueron los que mayores casos de hurtos a personas reportaron, con un total de 425 casos reportados.

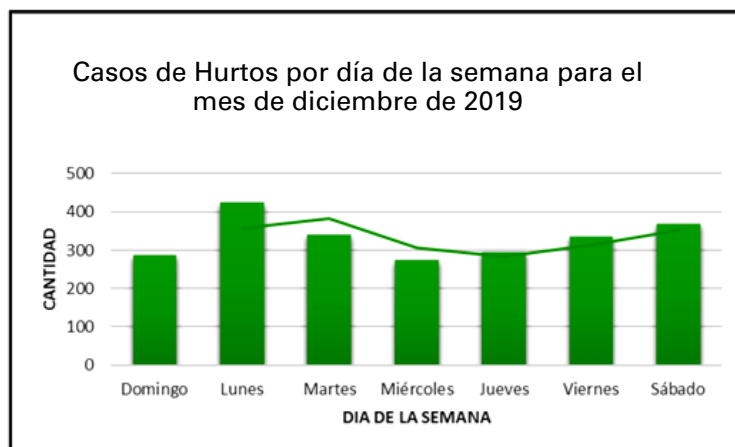


Figura 9. Casos de hurtos reportados por día de la semana para el mes de diciembre del año 2019. Elaboración propia.

En la **Figura 10** se evidencia los hurtos a personas en temporalidad horaria, correspondiente a los lunes del mes de diciembre del año 2019, siendo el rango horario de 7:00 a 7:59 de la noche el que mayor número de casos de hurtos representa, con un total de 34 denuncias.

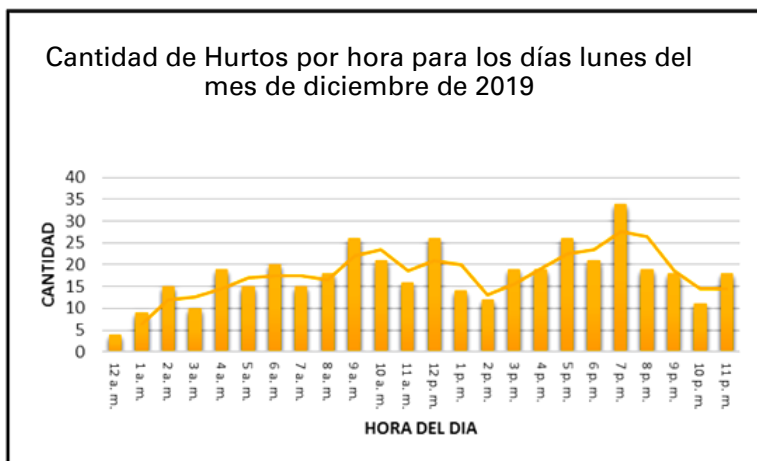


Figura 10. Casos de hurtos por hora para los lunes del mes de diciembre del año 2019. Elaboración propia.

Comparación de los resultados con la percepción ciudadana

En la **Figura 11** podemos observar el rango de edades en el que se encuentran las personas encuestadas aleatoriamente, el 87,3% corresponden a personas que se encuentran entre los 21 y los 40 años.

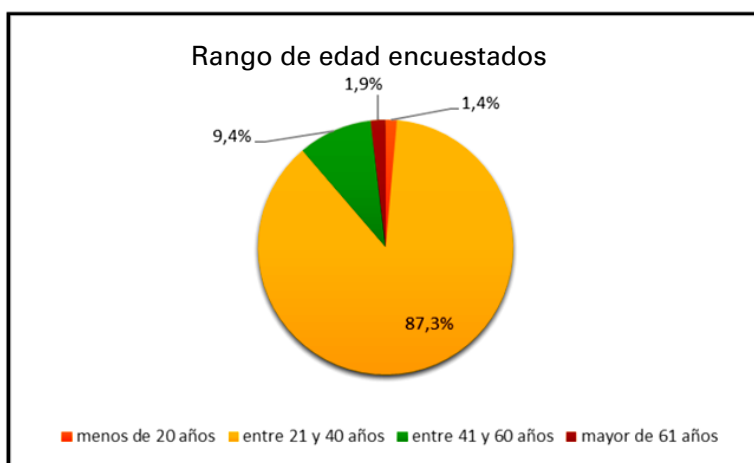


Figura 11. Rango de edad personas encuestadas. Elaboración propia.

En la **Figura 12** podemos observar que, del total de encuestados, el 74% ha sido víctima de hurto y de ese porcentaje que ha sido víctima de hurto, solo el 37% realizó la respectiva denuncia (**Figura 13**).



Figura 12. Casos de hurtos a encuestados. Elaboración propia.

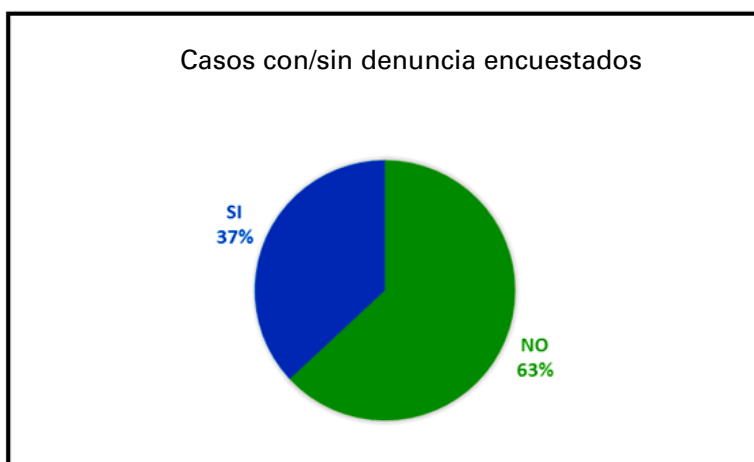


Figura 13. Casos de hurtos con/sin denuncia encuestados. Elaboración propia.

En la Figura 14 podemos observar los barrios donde se presenta mayores casos de hurtos, según la encuesta realizada a los ciudadanos de Santiago de Cali, siendo los barrios con mayor número de casos Alfonso López I y Calima.

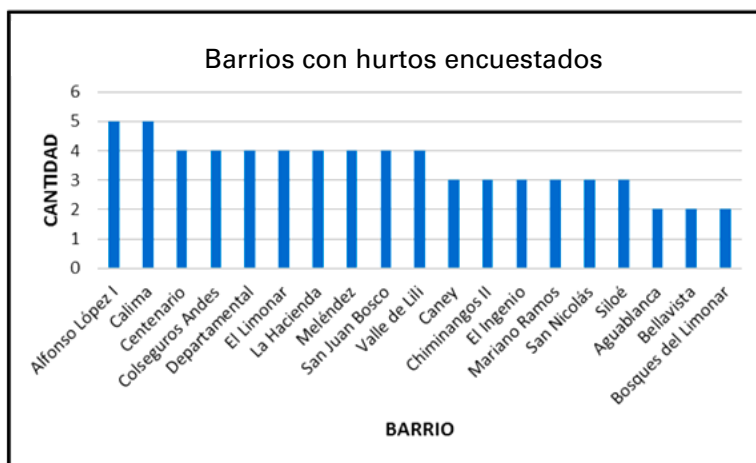


Figura 14. Barrio donde los encuestados han sido víctimas de hurto. Elaboración propia.

En la Figura 15 se representan gráficamente los barrios más representativos en cuanto a hurtos a personas según la encuesta, dicho barrios son: Alfonso López I, Calima, Centenario, Colseguros Andes, Departamental, El Limonar, La Hacienda, San Juan Bosco, Meléndez, Valle del Lili.

Finalmente, a los encuestados se les solicitó identificar cuál es la zona, según la clasificación de la Figura 2, que ellos perciben con mayor presencia de hurtos a personas. En la Figura 16 se representa la percepción ciudadana, que identifica a las zonas Sur y Distrito de Aguablanca, que comprenden 10 comunas, con las de mayor frecuencia de hurtos.

Integración de los datos obtenidos de forma espacial

En los Anexos 1 y 2 se evidencian los mapas de hurtos a personas por barrios y comunas, obtenidos para los años 2015 al 2019 (Síntesis en Tabla 2), cuyo comportamiento es constante en el paso del tiempo, es decir, los delitos se concentran en un mismo punto y a sus alrededores, pero incrementan cada año como se muestra en la Figura 7.

Los mapas correspondientes a hurtos por barrios permiten identificar las zonas más vulnerables, cuya concentración corresponde a los barrios: San Pedro, La Merced, San Nicolás, Centenario, Granada, Santa Rosa, El Calvario, San Juan Bosco, Sucre, San Vicente, Prados del Norte, Chipichape, Versalles, San Antonio, La Flora, Vipasa, San Fernando, Eucarístico, El Lido, Tequendama, El Ingenio, San Joaquín, Lili y Parcelaciones Pance. Estos barrios pertenecen a la zona nor-occidente y la zona sur de Santiago de Cali.



Los mapas correspondientes a hurtos por comunas entregan una idea más clara de las zonas con mayor número de siniestros en cuanto a hurtos de personas, identificando 4 puntos de concentración en las comunas 2, 3, 17 y 19. Estas comunas son parte de la zona nor-occidente y sur de la ciudad. Por lo tanto, hay relación en el comportamiento de los hurtos a personas tanto a nivel de barrio como a nivel de comuna, es decir, las comunas con mayor concentración de hurtos contienen los barrios con más denuncias de estos hechos delictivos.

Con base en las Figuras 7 a la 10, se identifica que el año con mayor presencia de hurtos corresponde al 2019 con un total de 20577 casos. De este año, diciembre es el mes con más casos de denuncias reportados, con un total de 2326 casos. Los lunes del mes de diciembre del año 2019 reportan 425 siniestros, los cuales ocurrieron con mayor frecuencia entre las 7:00 p.m a las 7:59 p.m. Lo que nos permite identificar estas condiciones como alerta en cuanto a factores de oportunidad para hurto a personas en la ciudad.

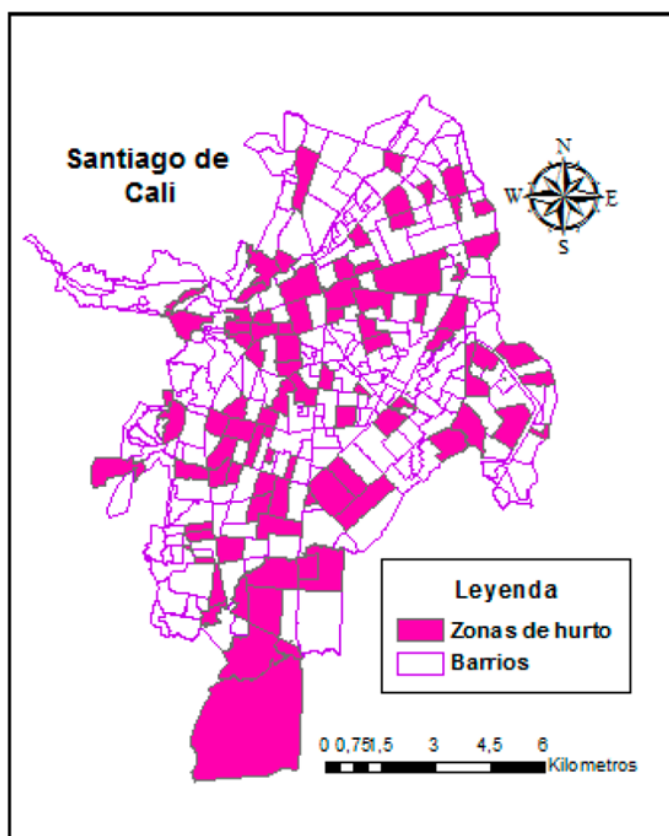


Figura 15. Mapa de los barrios donde los encuestados han sido víctimas de hurto. Elaboración propia.

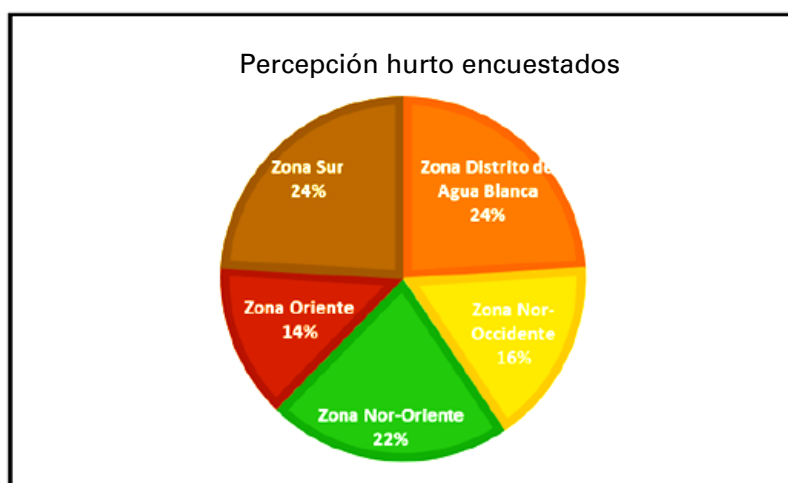


Figura 16. Percepción de las zonas con mayor presencia de hurtos según los encuestados. Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en este trabajo académico se concluye lo siguiente:

Se observa que la percepción ciudadana no concuerda con los casos reportados por parte de la policía, ya que la zona donde se presenta mayor número de siniestros corresponde a la zona nor-occidente; zona que los encuestados identifican como la tercera en cuanto a la frecuencia de hurtos, colocando, en primer lugar, a la zona sur como la más susceptible a este delito. Esta diferencia entre la percepción y los casos reportados podrían asociarse a que el 63% de los hurtos no son denunciados.

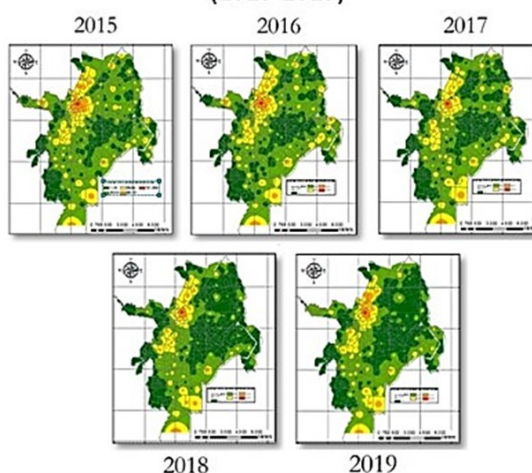
La representación gráfica de los hurtos a personas se realizó a nivel de barrios y comunas, con el fin de identificar si estos hechos son directa o inversamente proporcionales. En este caso, se logra evidenciar que es directamente proporcional; es decir, los barrios con mayor frecuencia de hurtos forman parte de las 4 comunas identificadas con más presencia de estos delitos. Gráficamente, no se observa gran diferencia en cada uno de los años en cuanto al incremento y desplazamiento de estos hechos delictivos, ya que ocurren los siniestros en el mismo punto o en sus alrededores; lo cual nos indica que se deben intervenir dichas zonas que presentan concentraciones comunes en los años evaluados, con el fin de disminuir la presencia de dichos delitos.

Se identifica que, para los años evaluados, el mes con mayor presencia de hurtos es diciembre, esto se puede asociar a factores de oportunidad como lo son las compras decembrinas, pagos de prima, alumbrado, la feria de la ciudad y demás eventos que conllevan a grandes aglomeraciones de personas, en especial, en el barrio San Pedro y sus alrededores.

Esta monografía sirve como base para posteriores estudios relacionados con este tipo de delitos, que se pueden complementar con otras ciencias, con el fin de determinar qué factores o índices de ocurrencia llevan a que sean más focalizados estos hechos en unas comunas respecto a otras. Surgen cuestionamientos sobre temas relacionados a la ubicación del sector, educación, situación económica entre otros, que reafirman que para combatir este tipo de flagelo es conveniente conocer el fenómeno, su alcance y el impacto que genera.

Finalmente, el uso de herramientas SIG para el análisis de hurtos a personas es de gran utilidad, ya que nos permite destacar la importancia que tiene el espacio y cómo este nos puede acercar al estado actual de estos patrones criminales; facilitar su interpretación para la comunidad y ofrecer información útil para la toma de decisiones y geoprevención.

Hurtos por barrios a personas para la ciudad de Cali (2015-2019)



Hurtos por comunas a personas para la ciudad de Cali (2015-2019)

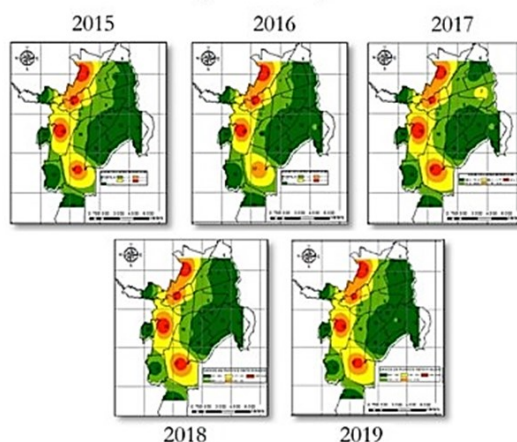
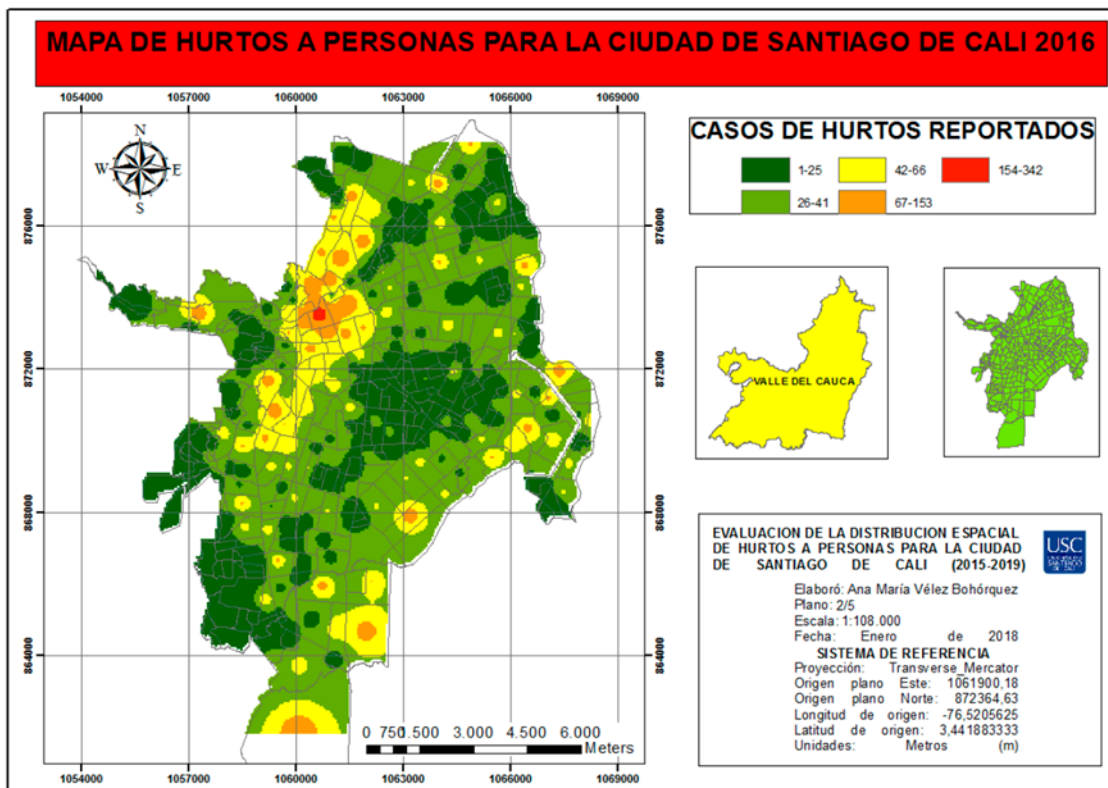
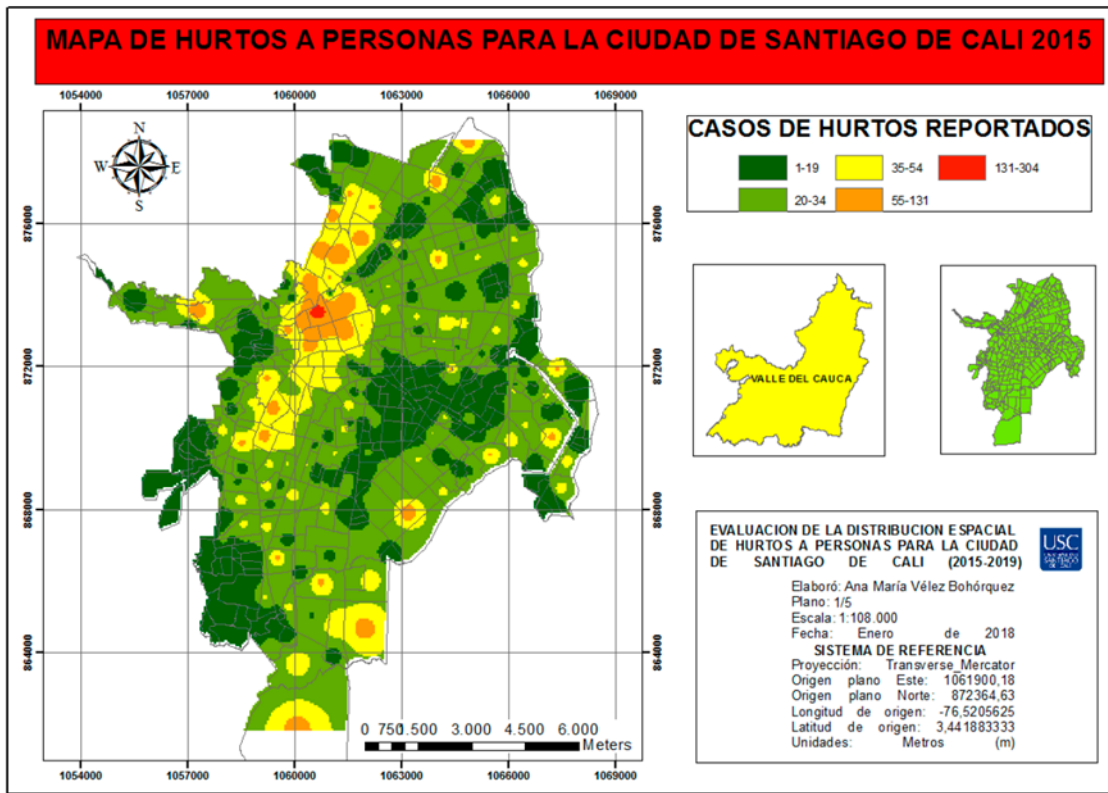


Tabla 2: Mapas de hurtos por comunas y barrios para la ciudad de Santiago de Cali (2015-2019). En los anexos se visualiza cada uno de ellos. Elaboración propia.

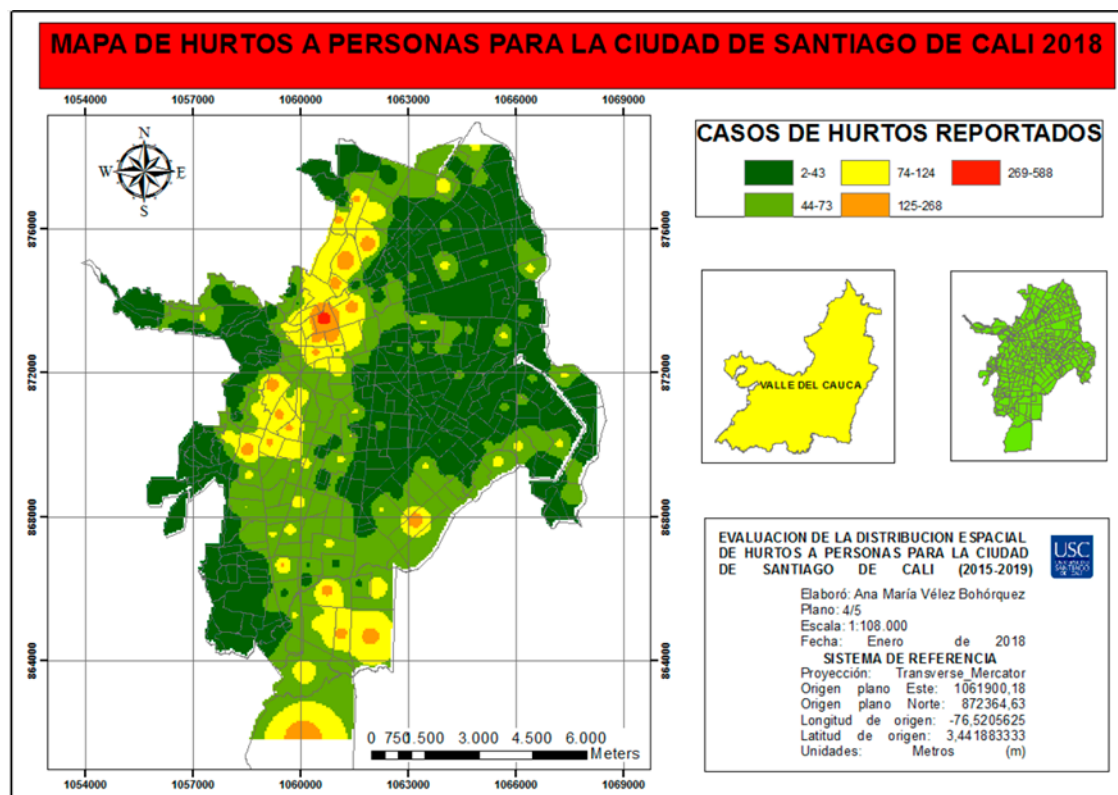
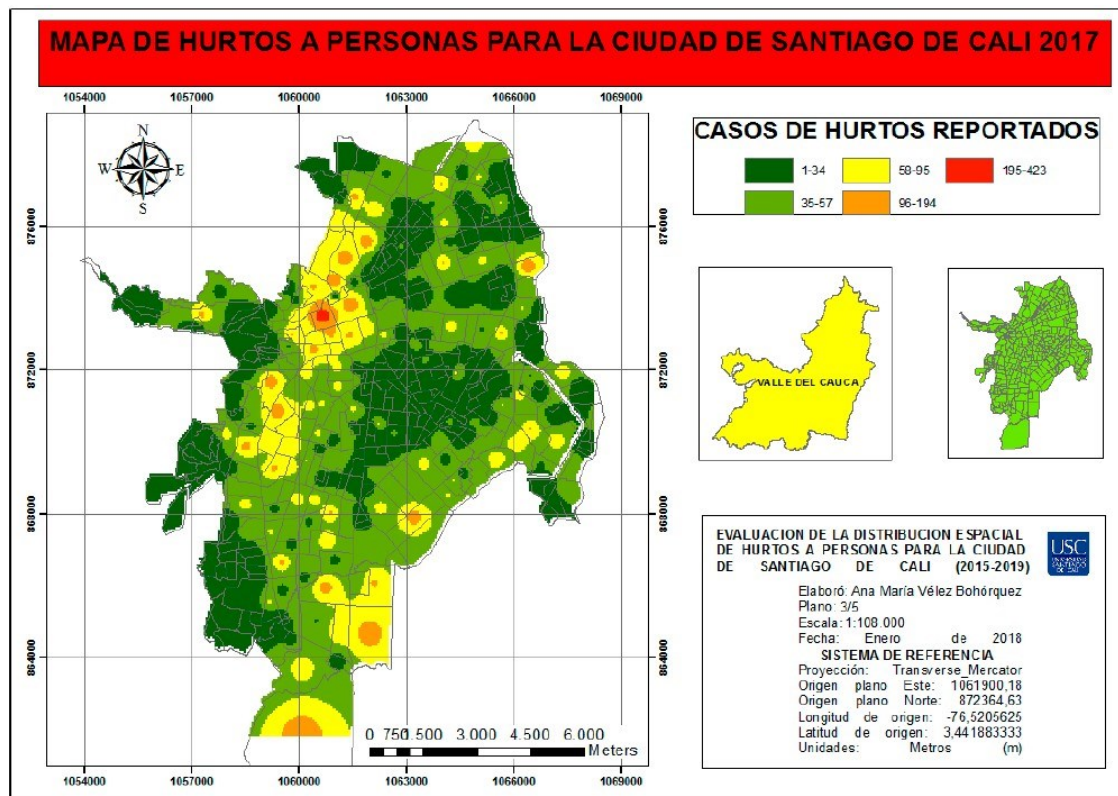


ANEXO 1

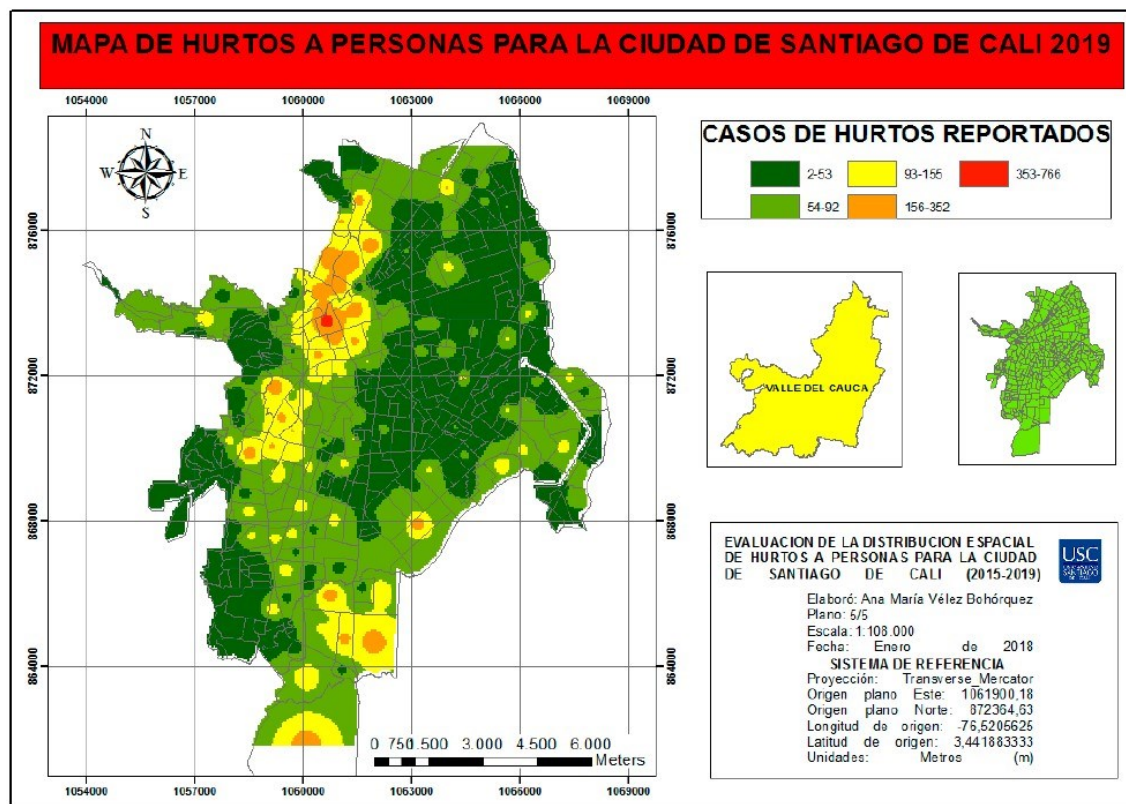




CONTINUACIÓN ANEXO 1



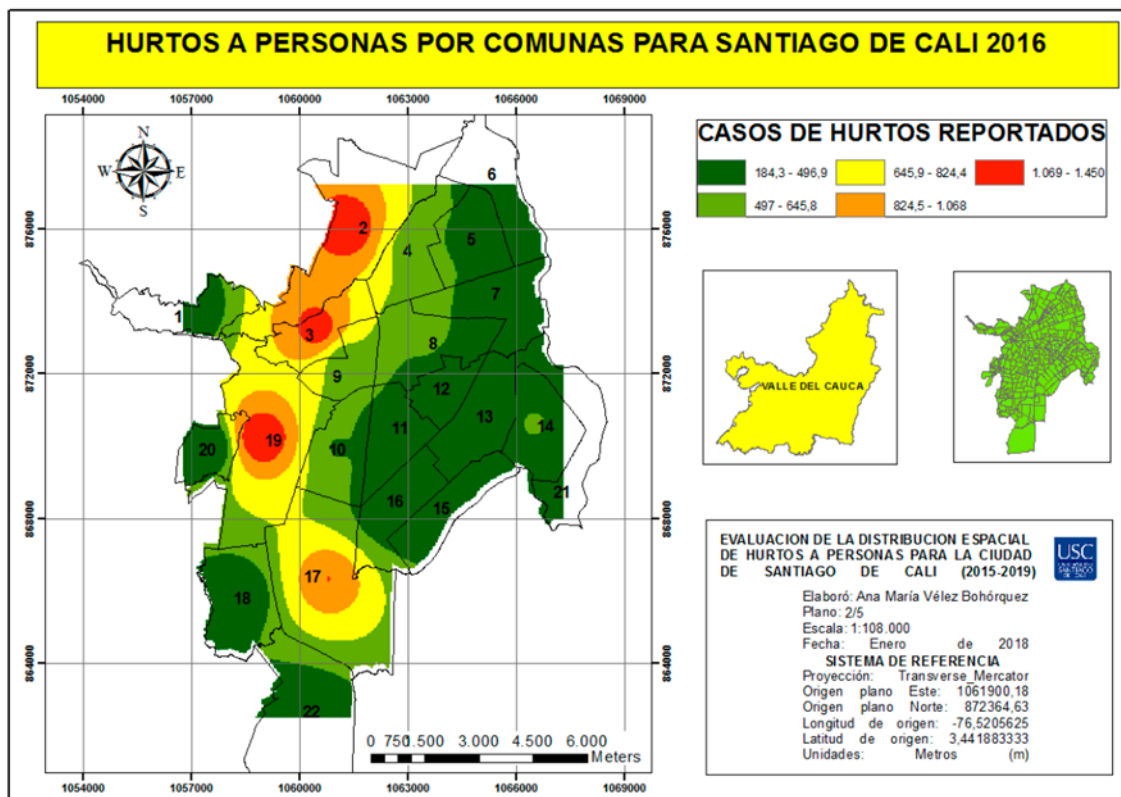
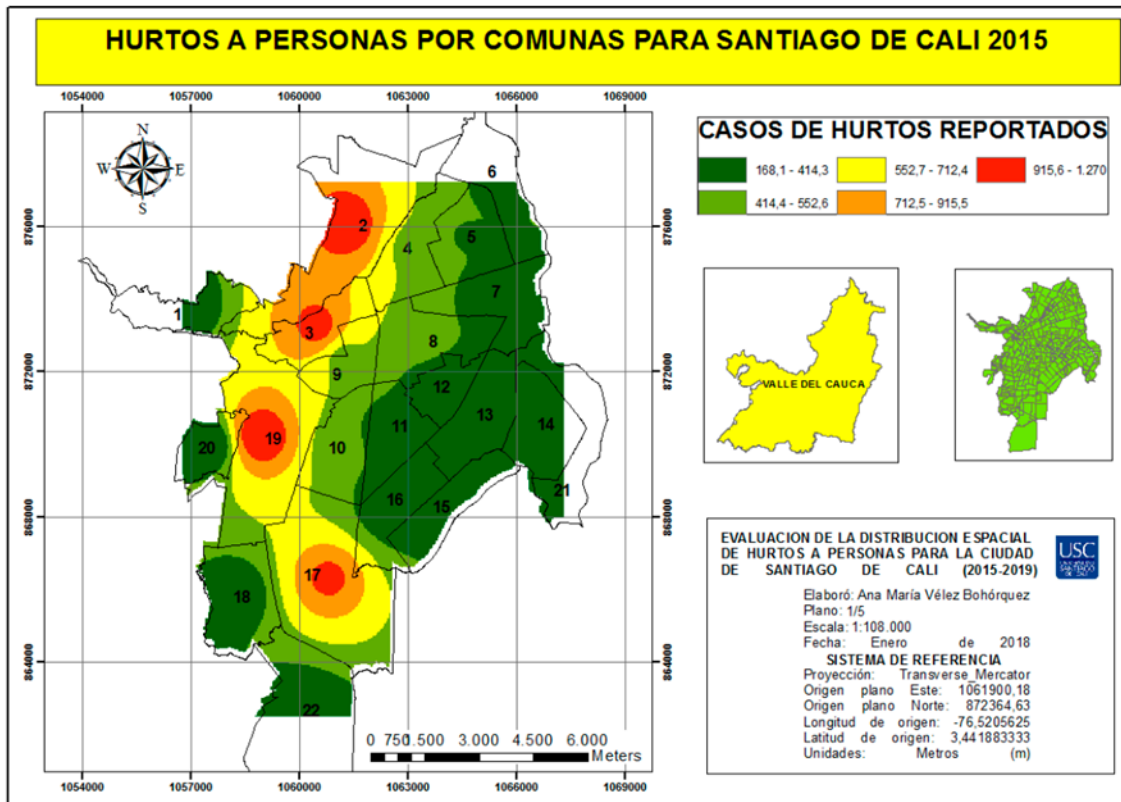
CONTINUACIÓN ANEXO 1



Área de cobertura de la zona de estudio. Vista satelital de Google Earth.

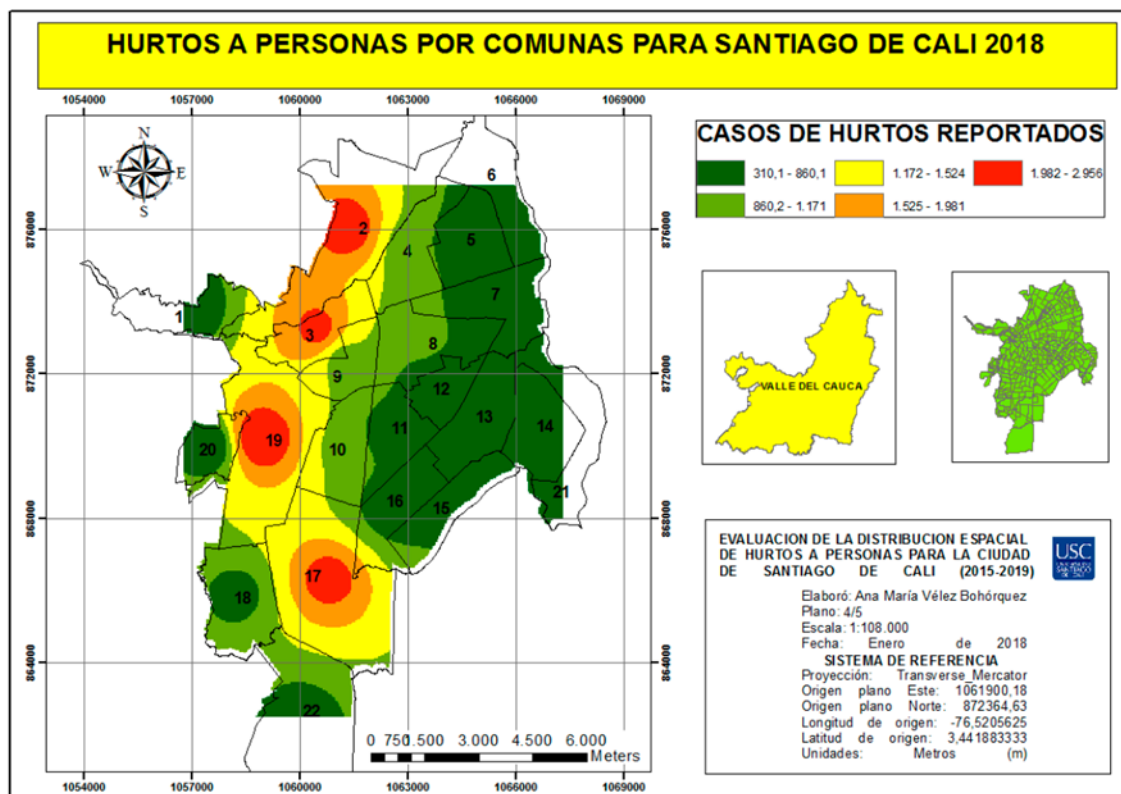
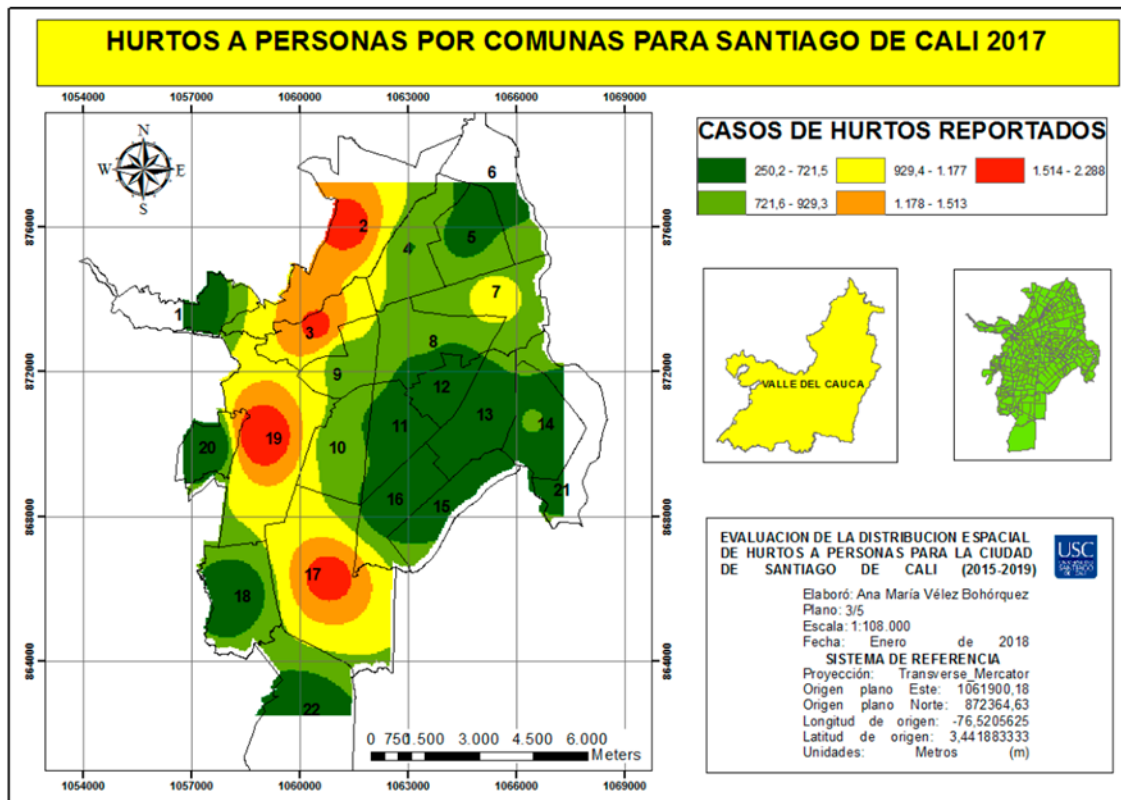


ANEXO 2

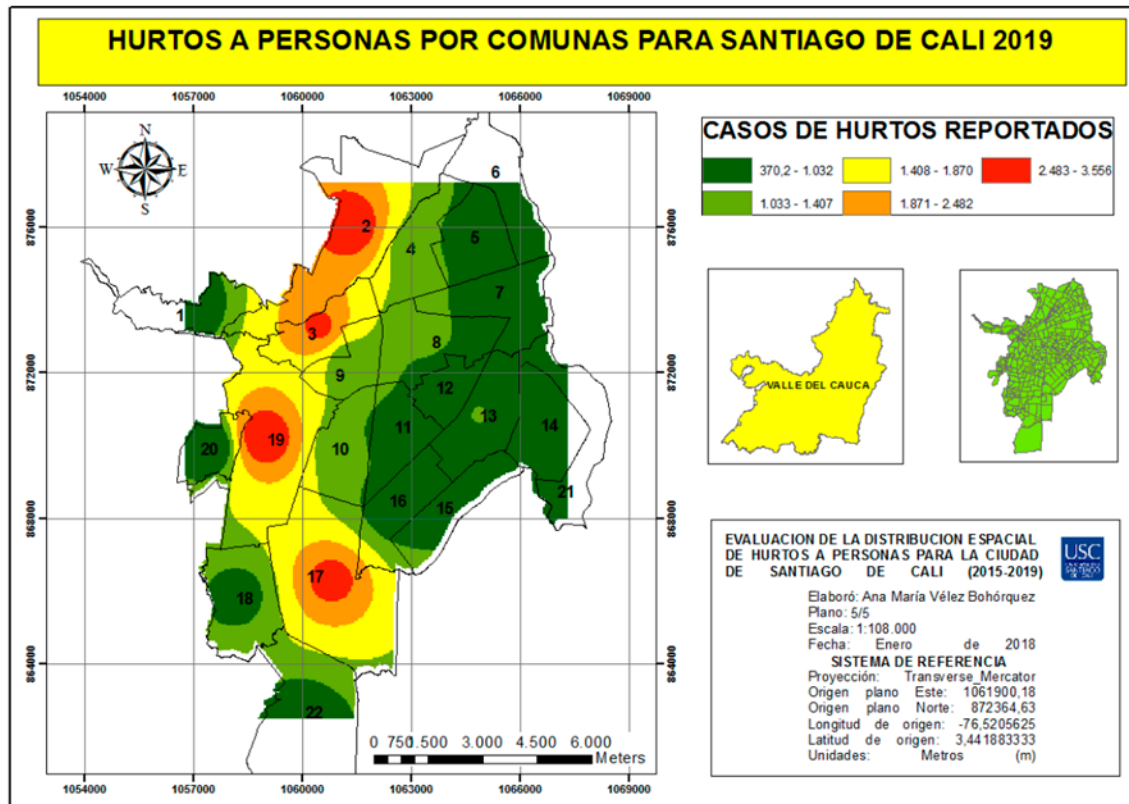




CONTINUACIÓN ANEXO 2



CONTINUACIÓN ANEXO 2



REFERENCIAS

1. Akpınar, E., & N. Usul (2004). Geographic information systems technologies in crime analysis and crime mapping. *Proceedings ESRI*, 1-12.
2. Arriagada, R. A. (2009). *Una revisión crítica de los habituales conceptos sobre el iter criminis en los delitos de robo y hurto*. Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
3. Chainey, S., & J. Ratcliffe (2013) GIS and Crime Mapping Mastering GIS: Technology, Applications & Management. *John Wiley & Sons*.
4. DANE (2018). Departamento Administrativo Nacional de Estadística. <https://1bestlinks.net/glooE>
5. El Espectador, 2019. El robo a personas es la modalidad más frecuente , seguida del robo de celulares. Recuperado el 29 de mayo de 2020, de <https://1bestlinks.net/FfDFJ>
6. Europa, O. D. (2009). *Manual para encuestas de victimización*. En: Europa, O. D. (2009). Manual para encuestas de victimización. <https://1bestlinks.net/8qNuW>
7. Fiscalía General de la Nación (2018). Censo delictivo. <https://1bestlinks.net/7neAJ>
8. Fraile, P. (2007). La percepción de seguridad: entre el delito, el conflicto y la organización del espacio. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 2007, vol. XI, núm. 245 (62).
9. Gómez Garzón, L. J. (2019). Determinación de zonas vulnerables en cuanto a la inseguridad nocturna del espacio público en el área urbana de Bogotá mediante aplicación del método de interpolación IDW.

10. IDESC (30 de junio de 2016). Mapas de Divisiones Administrativas. <https://1bestlinks.net/li8SM>
11. Leigh, J., S. Dunnett, & L. Jackson (2019). Predictive police patrolling to target hotspots and cover response demand. *Annals of Operations Research*, 283(1), 395-410.
12. Levine, N. (2013). Chapter 5: Distance Analysis I and II. *CrimeStat IV: A Spatial Statistics Program for the Analysis of Crime Incident Locations Manual, Version 4.0*. The National Institute of Justice, Washington, DC.
13. Meneses-Escobar, C. A., C. M. Castillo-Rodríguez, & A. Rodas-Vásquez (2019). Análisis espacial y temporal del hurto de celulares, Pereira, Risaralda, año 2018. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 11(2), 167-175.
14. Murray, R. S., & J. S. Larry (2005). *Estadística*. 4ta edición. Mc Graw-Hill. México, D.F.
15. Policía Nacional de Colombia (2010, Nov). Variables a tener en cuenta en la definición de un cuadrante. <https://1bestlinks.net/sAyQ2>
16. Presidencia de la República de Colombia (2014, Dic. 15). La mejor forma de combatir el delito es la prevención: Presidente Santos [En línea]. http://wp.presidencia.gov.co/Noticias/2014/Diciembre/Paginas/20141215_02-La-mejorforma-de-combatir-el-delito-es-la-prevencion-Presidente-Santos.aspx
17. Rogerson, P., & I. Yamada (2008). *Statistical detection and surveillance of geographic clusters*. CRC Press.
18. Ruiz García, A. (2012). SIG, crimen y seguridad. Análisis, predicción y prevención del fenómeno criminal. (Tesis de maestría publicada). Universidad Complutense de Madrid, España.
19. Sanz, F. H. (2008). La seguridad en las ciudades: el nuevo enfoque de la geoprevención. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 12.
20. Seccional de Investigación Criminal e Interpol. Hurto común municipio de Cali (del 1 de enero de 2015 al 31 de diciembre de 2019). Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.

Ana María Vélez Bohórquez

Ingeniera topográfica con especialización en Sistemas de Información Geográfica, tres años de experiencia en manejo de equipos para geoprocesamiento, sistemas de Información geográfica, procesamiento de imágenes y nociones catastrales. Actualmente, ocupa el cargo de Auxiliar SIG para Gases de Occidente S.A. E.S.P.

Se sugiere citar:

Vélez Bohórquez, A. M. (2021). Evaluación de la distribución de hurtos a personas para la ciudad de Santiago de Cali . 2015 – 2019. *Revista Cartógrafo.CL* 1(1), pp. 99-117.



Bajo Licencia Creative Commons
Atribución 4.0 Internacional.



Amigos de Cartógrafo.CL

[Infórmate aquí](#)

UNIVERSIDAD MAYOR
para espíritus emprendedores

REINVENTATE

PARA CRECER

7 años
Magíster en Teledetección
Carrera de Magíster en Teledetección
Carrera de Magíster en Teledetección
Carrera de Magíster en Teledetección
Carrera de Magíster en Teledetección
Carrera de Magíster en Teledetección
Carrera de Magíster en Teledetección

FACULTAD DE CIENCIAS
MAGÍSTER EN TELEDETECCIÓN
SANTIAGO

ADMISIÓN 2021

[Infórmate aquí](#)

Universidad de Concepción

MAGÍSTER EN ANÁLISIS GEOGRÁFICO

MAG
Magíster en Análisis Geográfico
ACREDITADO

ADMISIÓN 2021

MÁS INFORMACIÓN EN
faug.udec.cl

Síguenos en
f i t i n

[Infórmate aquí](#)

UNIVERSIDAD BERNARDO O'HIGGINS

UNIVERSIDAD ADSCRITA A GRATUIDAD

ADMISIÓN 2021

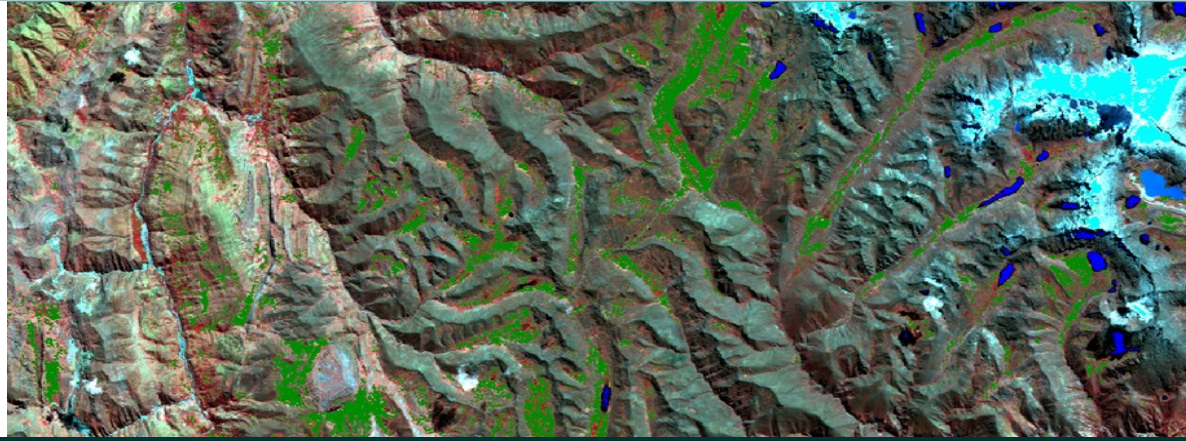
ESTUDIA INGENIERÍA EN GEOMENSURA Y CARTOGRAFÍA ADVANCE EN LA UBO

Matrículas abiertas

CONSULTA AQUÍ



Cartógrafo.CL/01-2021



¿Cómo clasificar imágenes satelitales con ENVI?

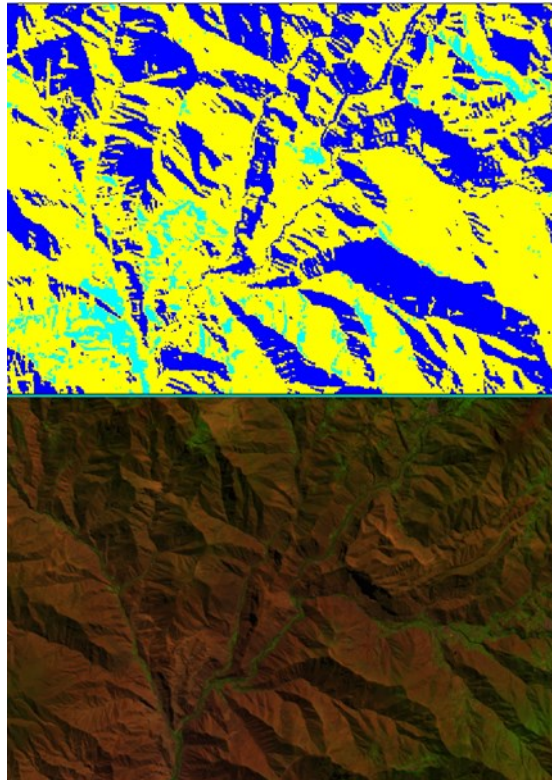
I. CONCEPTOS PREVIOS

Clasificación de imágenes

Es un proceso en el cual se analizan los valores de píxel de varias bandas que componen una imagen satelital. Se realiza una evaluación de los valores obtenidos y se generan grupos compuestos por píxeles con un comportamiento similar. Esto permite explorar diferentes tipos de atributos o clases mediante el análisis estadístico multivariado (Figura 1).

Firmas espectrales

Es el registro de longitudes de onda obtenido a partir del análisis de píxel de imágenes satelitales multibanda. Las firmas espectrales expresan el comportamiento en el espectro electromagnético de las distintas coberturas del terreno, captadas en las imágenes satelitales (Figura 2).



HelpGIS



Figura 1. Imagen Landsat 8 clasificada (arriba) y no clasificada (abajo). Elaboración propia a partir de imagen Landsat 8, 2021.

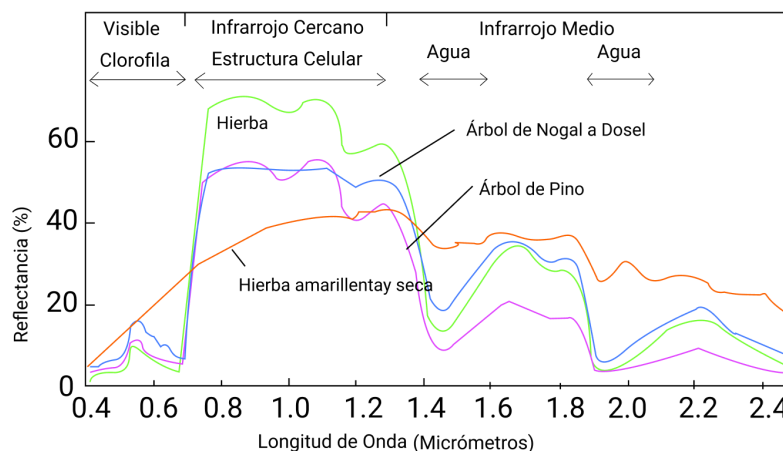


Figura 2. Representación de firmas espectrales de especies vegetales. Fuente: Mendoza, 2014.



Spectral Angle Mapper

Es un método de clasificación supervisado, en el cual se realiza una comparación entre las firmas espectrales de las clases obtenidas por el investigador, con clases establecidas en el software, fundamentadas en diversas investigaciones. La diferencia entre las clases comparadas se establece mediante un ángulo (ángulo espectral) (Figura 3).

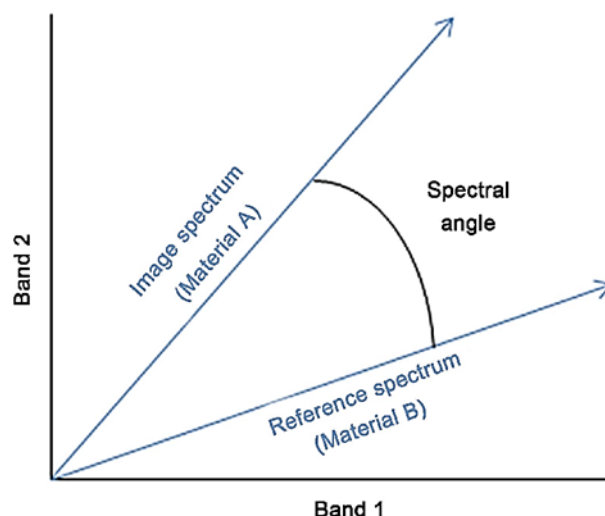


Figura 3. "Ángulo espectral" formado por la comparación entre las firmas espectrales de clases
Fuente: Ali, 2016

Minimum Distance

Este método considera las clases definidas, con anterioridad, por vectores (endmember).

Estos endmember se comparan con las clases obtenidas por el investigador, las cuales se determinan en base a la menor distancia euclidiana que posea con los endmember o, alternatively, a la desviación estándar o umbral de distancia definido (Figura 4).

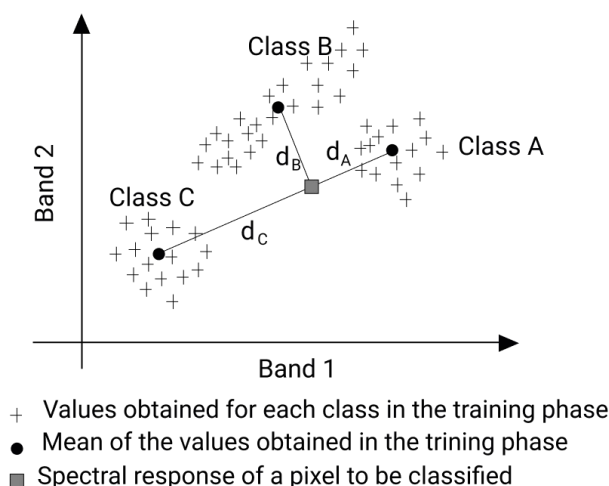


Figura 4: Representación de la respuesta espectral de un píxel clasificado, utilizando el método de clasificación Minimum Distance.
Fuente: Goncalves, 2009.

Maximum Likelihood

El método aquí presentado considera las varianzas y covarianzas de las firmas espectrales de las clases obtenidas. Una vez realizada esta labor, se inicia un proceso de asignación de celdas a las clases reconocidas. Si se asume que la distribución de una muestra de clases es normal, una clase puede estar caracterizada por el vector del valor medio y la matriz de covarianza. Dadas estas dos características (valor medio y matriz de covarianza) para cada valor de celda, se calcula la probabilidad estadística para cada clase con el fin de determinar la pertenencia de las celdas a la clase.

Después de realizar varias ponderaciones, cada celda se asigna a la clase a la que tiene mayor probabilidad de pertenecer (Figura 5).

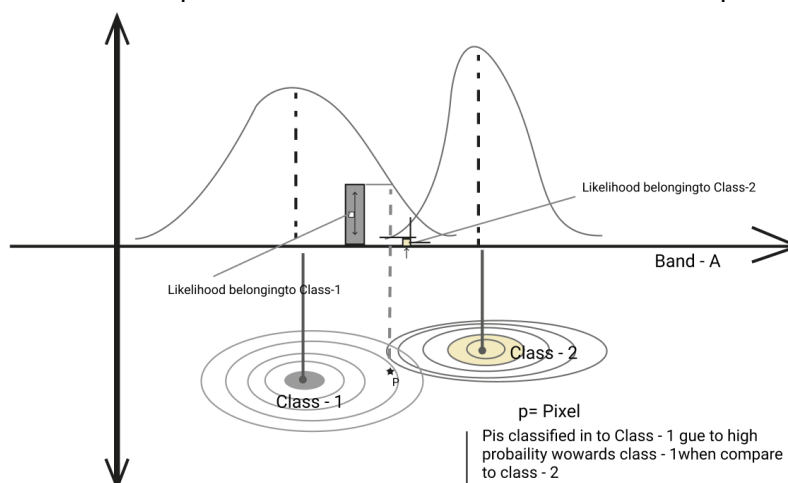


Figura 5. Concepto de clasificación de máxima probabilidad basada en densidades de probabilidad con respecto a cada clase.
Fuente: Rajyalakshmi, 2016



Isodata

Es un método de clasificación no supervisado en el que se calcula valores medios de las clases, se aplica iteraciones (entiéndase como revisiones repetidas sobre estos valores medios), con la finalidad de que, en cada iteración, se realice un nuevo cálculo y que esto permita obtener nuevos píxeles clasificados. Este proceso finaliza en el momento en que los valores de cada clase prácticamente dejan de variar con cada iteración.

Algunas especificaciones necesarias que el analista debe determinar para este método son:

- Una cantidad máxima de agrupamientos de píxeles (clusters).
- Un porcentaje máximo de píxeles que no deben ser reclasificados al aplicarse las iteraciones.
- Una cantidad máxima de iteraciones.
- Cantidad mínima de píxeles en los agrupamientos (clusters). En caso de ser superada esa cantidad, el agrupamiento es eliminado.
- Un valor máximo de desviación estándar. Si este valor es superado y los cluster poseen más del doble de elementos que pueden contener, se realizará una división entre las dos clases (Figura 6).

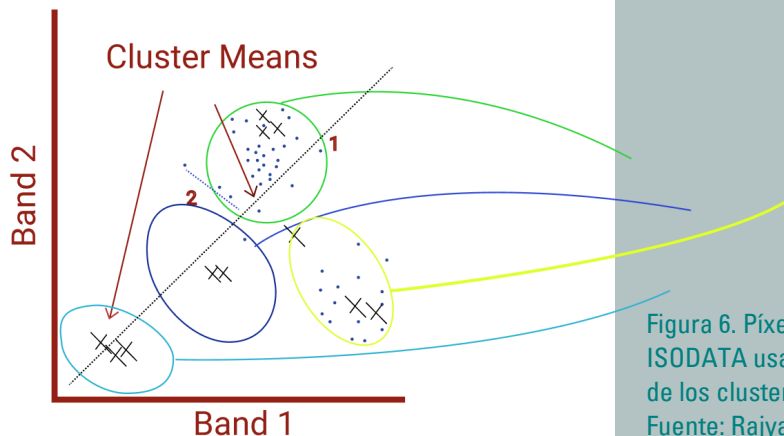


Figura 6. Píxeles de clasificación ISODATA usando el valor medio de los clusters.

Fuente: Rajyalakshmi, 2016.

II. PASOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES EN ENVI

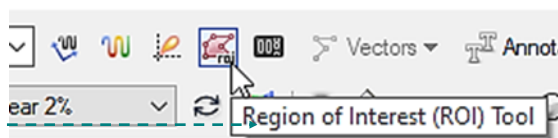
Para obtener una imagen clasificada se utilizará el método de clasificación Maximum Likelihood. En este caso, la imagen ASTER seleccionada pertenece a la provincia de Pasco, departamento de Pasco, en Perú. La misma se visualiza en una combinación de bandas de infrarrojo cercano.



Imagen satelital ASTER.
Elaboración propia.

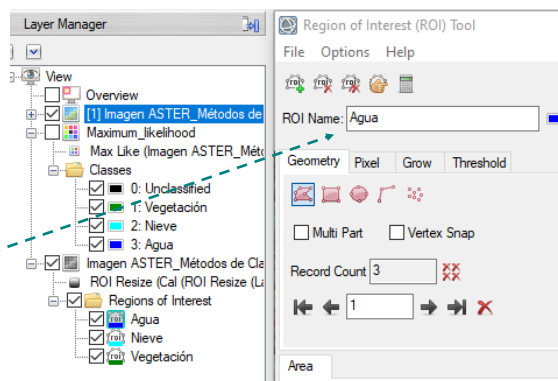


Para realizar cualquier proceso de clasificación supervisada de imágenes, en primer lugar se requiere seleccionar áreas de entrenamiento. La herramienta a seleccionar se llama Regions Of Interest (ROI):



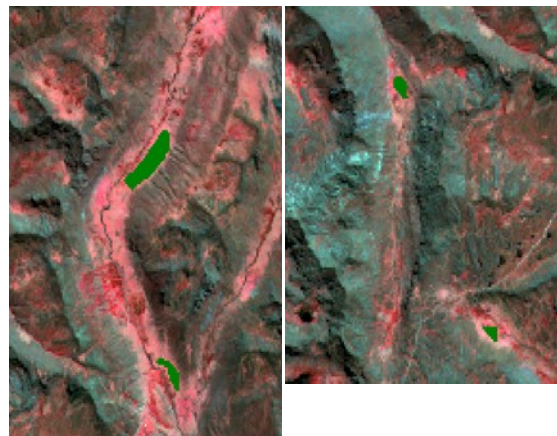
Herramienta ROI.

Las regiones de interés son áreas que cubren superficies representativas de la imagen satelital. Estas áreas son seleccionadas por el investigador a voluntad, teniendo en consideración que solo se involucre dichas superficies representativas dentro del ROI. Así, se seleccionan ROI para la vegetación, agua y nieve.



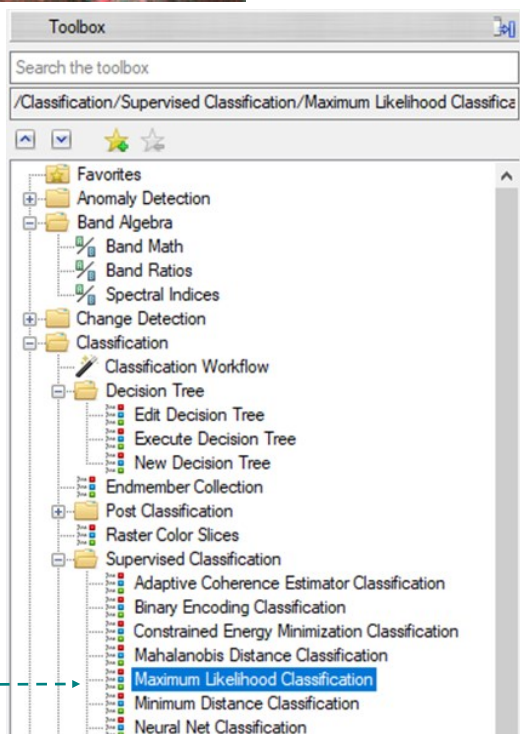
Selección de ROI para la imagen ASTER.

Es importante mencionar también que, para obtener resultados óptimos, se tiene que generar más de un área representativa por región de interés. Es decir, se deben seleccionar varias áreas de vegetación, agua y nieve. En las siguientes figuras se muestran las áreas seleccionadas para el ROI de vegetación.



Selección de ROI para las áreas de vegetación. Elaboración propia, 2021.

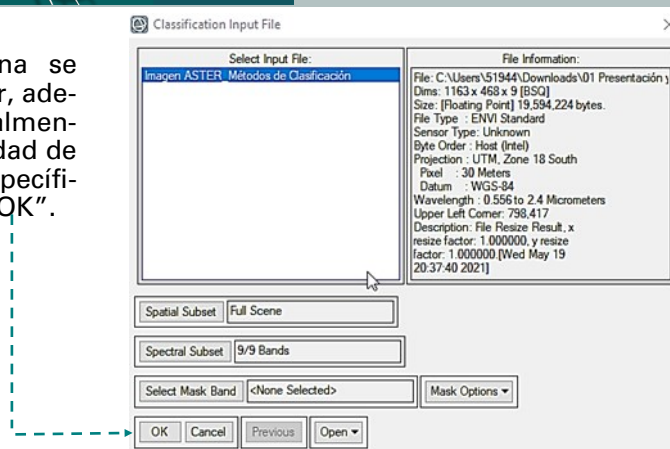
Ahora se selecciona la herramienta Maximum Likelihood Classification desde el Toolbox.



Herramienta Maximum Likelihood Classification.



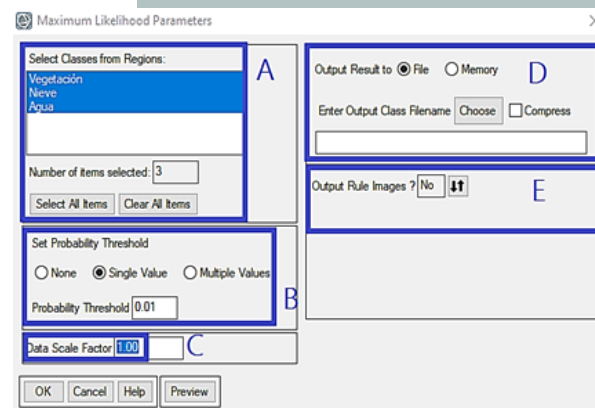
En la primera ventana se selecciona la imagen a utilizar, además de seleccionar, opcionalmente, parámetros como la cantidad de bandas a analizar, un área específica de análisis, etc. Clicar en "OK".



Cuadro de selección de imagen.

Ahora se presenta una nueva ventana. La misma está compuesta de las siguientes secciones:

- En esta sección se seleccionan los ROI a utilizar para generar la imagen clasificada.
- Aquí se debe asignar un umbral de probabilidad para la asignación de una clase a píxeles sin clasificar. Un valor más cercano a 0 permite que áreas con una firma espectral similar a la de un ROI sean identificadas como tal. Mientras que un valor próximo a 1 indica que el software es más restrictivo respecto a esta labor.
- La presente sección indica el factor multiplicativo de escala que se debe aplicar a los píxeles de la imagen. Por ejemplo, si la imagen resultante posee valores de píxel de 10000, un factor de escala que le conviene es el de 10000, en el caso de que se desee que los píxeles se presenten en valores unitarios. Se dejará por defecto el valor de esta sección.
- Selección de imagen de salida. Permite asignar la ruta de guardado de la imagen resultante.
- Esta sección permite crear una imagen donde se expresen las reglas utilizadas para generar la imagen de clasificación. En este caso, no se requiere de la misma. Clicar en "OK".



Cuadro de selección de imagen .

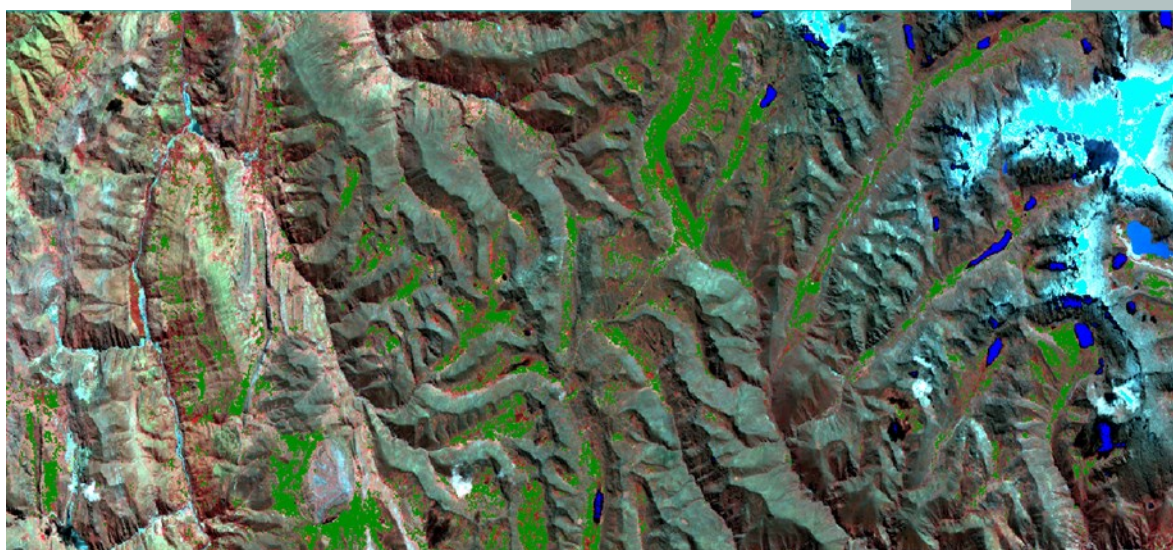


Imagen clasificada, superpuesta sobre la imagen satelital. Elaboración propia, 2021



Se visualizan los resultados. En este caso, se puede indicar que el proceso ha brindado resultados muy interesantes. Las áreas de entrenamiento han logrado clasificar a las superficies respectivas.

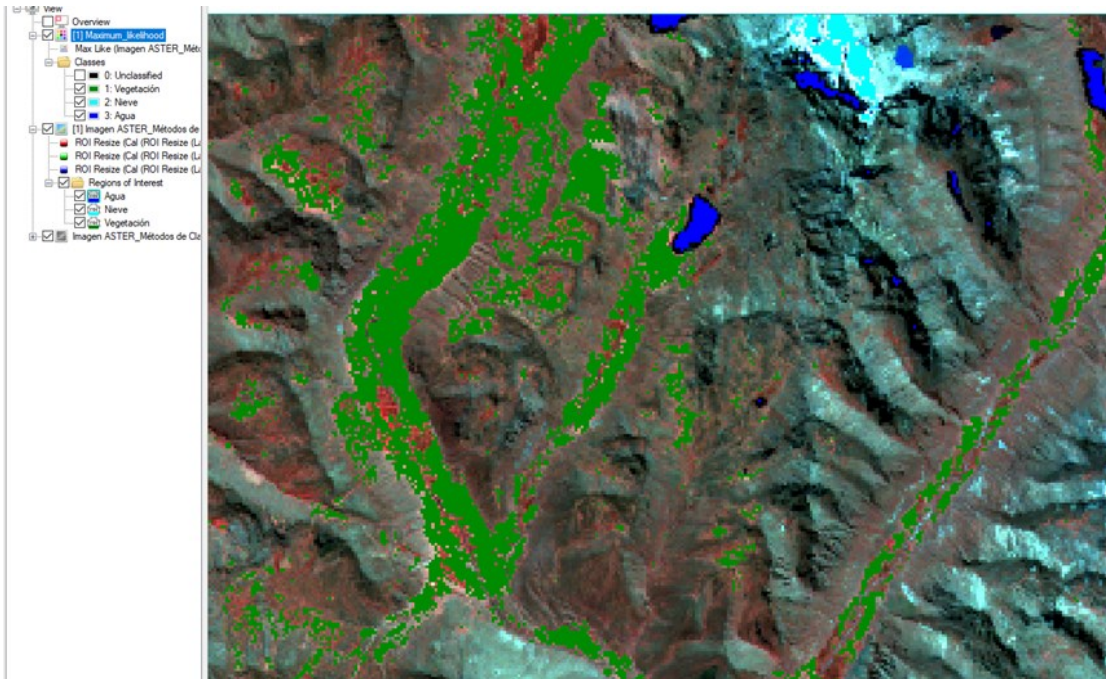


Imagen clasificada. En la cual se puede observar que las áreas de entrenamiento (ROI) permiten clasificar las coberturas de forma precisa.

Elaboración propia, 2021

Autoría: Equipo Help GIS (Perú)

Bach. Geog. Roberto Gustavo Villa Anchirayco

Ing. Geol. Evelyn Karina Caiza Cañar.

Imágenes de referencia:

Guadalupe Galindo Mendoza, Marcos Casiani. Manual de radiometría de campo para la vigilancia y protección fitosanitaria.

Caso de aplicación para HLB. Enero 2014. San Luis de Potosí, México.



<https://www.linkedin.com/school/helpgis/>



Bajo Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.



Cartógrafo.CL/01-2021



Mercator, 1569

Proyecciones Mercator y UTM

características y uso

INTRODUCCIÓN

Una de las grandes preocupaciones del hombre, desde que hizo su aparición sobre la faz de la Tierra, ha sido dar a conocer su entorno y comunicar cómo es su relación con él. Puede considerarse que las llamadas pinturas rupestres son las primeras manifestaciones de esta intención, en la cual el hombre primitivo representó su entorno, sus áreas de caza, los sectores donde recolectaba alimentos, donde desarrollaba su vida diaria, etc.

El desarrollo de la civilización incorporó ciertas problemáticas a esta incipiente ciencia; descubrir la esfericidad de la Tierra evidentemente significó un gran avance para las Geociencias; sin embargo, también se erigió como el mayor obstáculo al que se han visto enfrentados los cartógrafos de todas las épocas.

Gerardus Mercator

Gerard Kremer, universalmente conocido como Gerardus Mercator (**Figura 1**), fue un destacado geógrafo y matemático; sin embargo, su máximo legado lo dejó como cartógrafo del siglo XVI, gracias a las numerosas proyecciones que calculó, y que lo posicionó como uno de los exponentes más importantes en la historia de la Cartografía.

Mercator nació en Flandes (actual Bélgica) en 1512, fue hijo de un zapatero y a pesar de haber crecido en una familia pobre, estudió matemáticas, geografía, astronomía, y se graduó en la Universidad de Lovaina en 1532. Posteriormente desarrolló sus habilidades como grabador y calígrafo, se dedicó a la confección de globos terráneos y de instrumentos científicos de precisión. Confeccionó varios mapas de lugares de todo el mundo, entre ellos su primer mapa-mundi, que mostraba la Tierra proyectada en forma de corazón.



Figura 1.
Gerardus Mercator,
cartógrafo flamenco
(1512 – 1594).

Gabriel Moraga Gormaz
cartografo@cartografo.cl



Clic en el icono para conocer más del tema.



La incompatibilidad entre la esfera y el plano (Figura 2)

En 1569 Mercator publicó la más famosa de sus obras, el mapamundi en “Proyección Mercator”. La proyección calculada para este mapa tenía la finalidad de apoyar a los marineros en sus travesías por todo el mundo.

Como característica fundamental, en este mapa los paralelos y meridianos se cruzan en ángulo recto, y considerando su uso marítimo y oceánico, las masas de tierra sobre todo en las latitudes altas presentan grandes deformaciones de tamaño, no así de forma (Figura 3).

Geométricamente es imposible representar la superficie esférica de la Tierra en una realidad bidimensional, como lo es un plano, una carta o un mapa. Cartógrafos de todos los tiempos se han enfrentado a este desafío, y han propuesto un sinnúmero de soluciones. No obstante, la incompatibilidad entre la esfera y el plano siempre estará presente y las soluciones planteadas han tenido, tienen y tendrán deformaciones (Figura 3A y 3B). Por lo tanto, es perfectamente posible afirmar y asumir que no existe ninguna representación cartográfica que sea 100% fiel a la realidad.

La proyección Mercator ha sido utilizada por otros cartógrafos como referencia o antecedente para calcular sus propias proyecciones; por ejemplo, Peters, Wright, Lambert, incluso las proyecciones UTM y Transversal Mercator tienen como referencia al mapamundi en proyección Mercator.

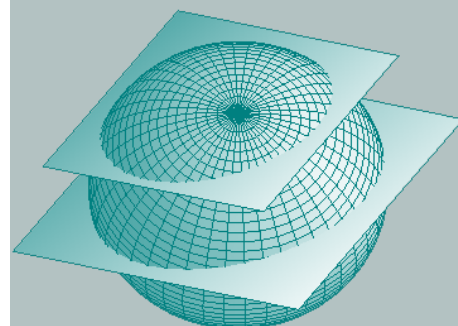


Figura 2. La representación de la superficie de la esfera sobre un plano siempre tendrá deformaciones.



Figura 3. Mapamundi en proyección Mercator.

Figuras 3A y 3B. En un mapamundi la isla de Groenlandia se visualiza más grande que toda Sudamérica, sin embargo en la realidad, Sudamérica es casi 8,3 veces más grande que la isla de Groenlandia (17,82 millones de km² de Sudamérica versus 2,16 millones de km² de Groenlandia).

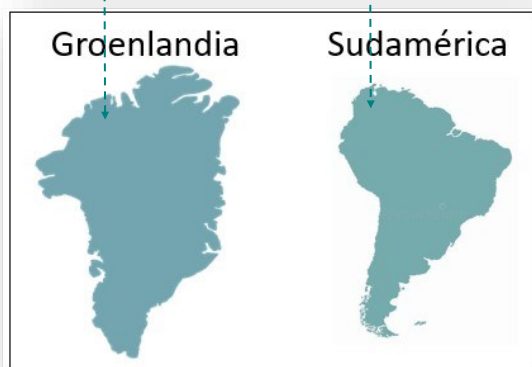


Figura 3A. En proyección Mercator.

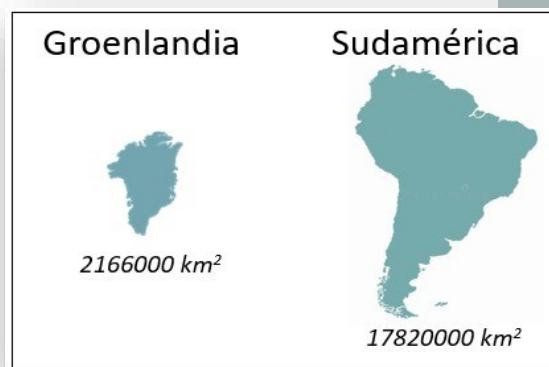


Figura 3B. En la realidad.

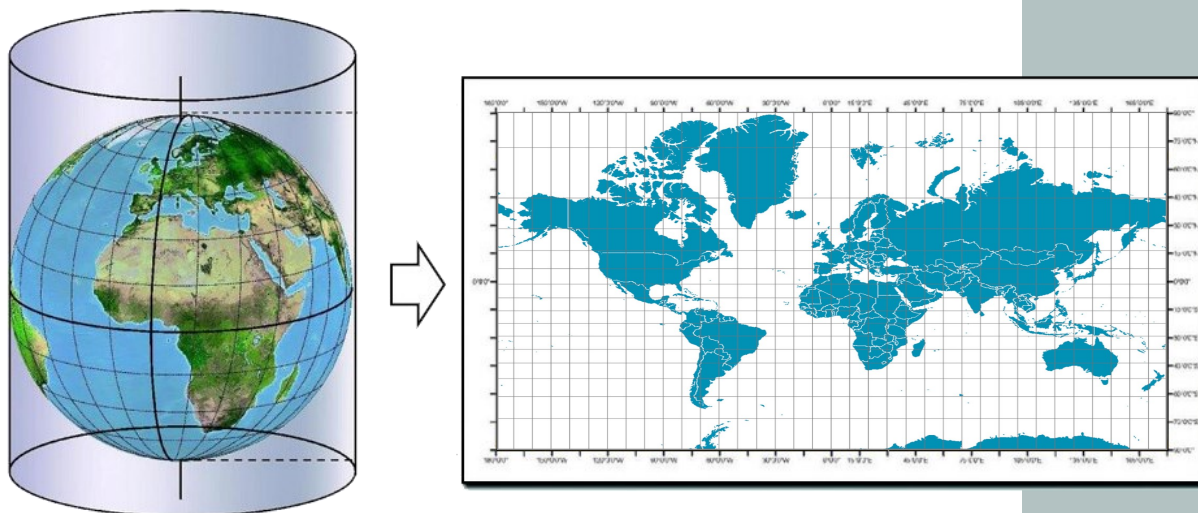


PROYECCIÓN MERCATOR

Dado que el objetivo de Mercator era confeccionar un producto cartográfico que apoyara las actividades de los navegantes, su inspiración la encontró en los portulanos^(*) de la época, que eran masivamente utilizados para surcar los mares, especialmente el Mediterráneo.

El mapamundi en proyección Mercator, que fue publicado en 1569 y cuya proyección perdura hasta nuestros días, posee las siguientes características:

(*)<https://definicion.de/portulano/>



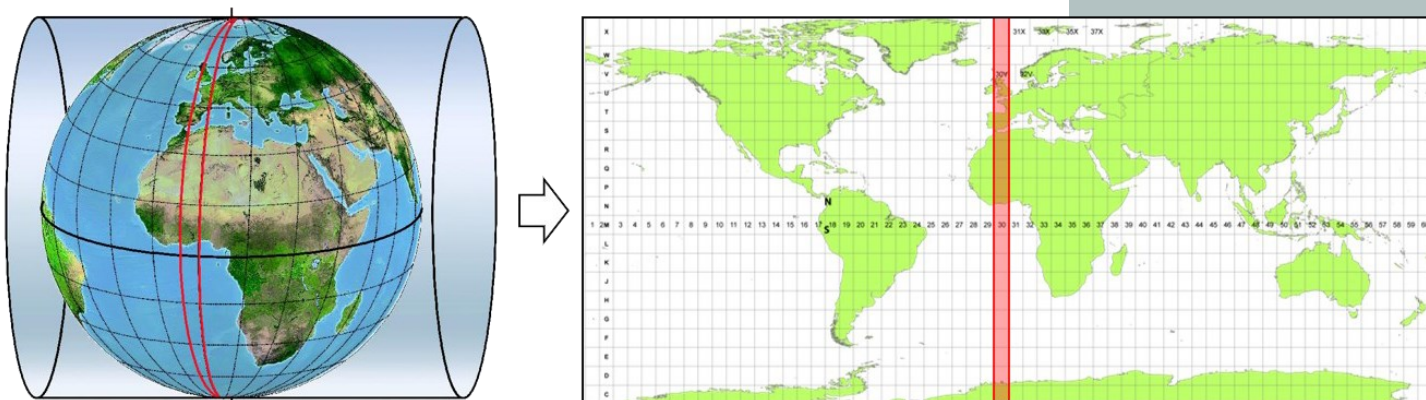
- 1] Es una derivación de una proyección cilíndrica normal tangente (Figura 4);
- 2] Su centro de proyección es la línea del ecuador, es decir, en esta línea no hay deformación;
- 3] Representa desde los 84° de latitud norte hasta los 70° de latitud sur;
- 4] Los paralelos son rectos y paralelos entre sí, y su separación aumenta al alejarse de la línea del ecuador;
- 5] Los meridianos son rectos y paralelos entre sí, y su separación es constante;
- 6] Los paralelos y meridianos se cruzan en ángulo recto;
- 7] Las deformaciones de superficie en las latitudes altas son exageradas, sin embargo, se conservan las formas;
- 8] Los rumbos y azimuts pueden ser trazados directamente sobre el mapa como líneas rectas;
- 9] Para posicionar puntos utiliza coordenadas geográficas de latitud y longitud, expresadas en grados, minutos y segundos;
- 10] En la actualidad, gran parte de la **cartografía náutica** utilizada en el mundo se encuentra en proyección Mercator (Figura 7A).

Figura 4. Origen de la proyección Mercator, a partir de una proyección cilíndrica, normal, tangente.



PROYECCIÓN UTM

La proyección UTM (Universal Transversal Mercator) surgió como una alternativa de mejora a la proyección Mercator, en consideración a las grandes deformaciones que se producen en las latitudes altas de esta proyección. Esta justificación podría no ser muy sólida en términos de que la proyección Mercator está orientada a la navegación y al trazado de rumbos y azimuts, por lo que las citadas deformaciones no influyen mayormente en esta actividad. Sin embargo, la resultante proyección UTM fue una muy buena alternativa para la cartografía terrestre, logrando gran precisión en cuanto a las deformaciones y posicionamiento de los elementos en el espacio.



Las características principales de esta proyección son las siguientes:

- 1] Es una derivación de la proyección cilíndrica transversal secante (Figura 5);
- 2] Divide a la Tierra en 60 Husos UTM, numerados del 1 al 60 (Figura 6);
- 3] De norte a sur, cada Huso UTM representa desde los 84° de latitud norte hasta los 80° de latitud sur; por lo que no representa la Tierra completa.
- 4] De este a oeste, cada Huso UTM representa 6° de longitud;
- 5] Cada Huso UTM tiene su propio Meridiano Central (MC);
- 6] Factor de escala en el MC es 0,9996;
- 7] En cada Huso UTM existen dos líneas verticales (N-S) que no tienen deformación, a 150 km a cada lado del MC;
- 8] Cada Huso UTM tiene 20 Franjas Latitudinales (FL), 10 en el hemisferio norte (HN) y 10 en el hemisferio sur (HS)
- 9] Las Franjas del HS se denominan con letras, desde la "C" hasta la "M" (excepto la "I")
- 10] Las Franjas del HN se denominan con letras, desde la "N" hasta la "X" (excepto la "O")
- 11] Todas las FL cubren 8° de norte a sur, excepto la FL "X" que cubre 12°
- 12] Para posicionar puntos utiliza coordenadas Norte (N) y Este (E) en metros, cuyos orígenes se localizan en el Norte Falso (NF) y el Este Falso (EF) respectivamente

Figura 5. Origen de la proyección UTM, a partir de una proyección, cilíndrica, transversal, secante.

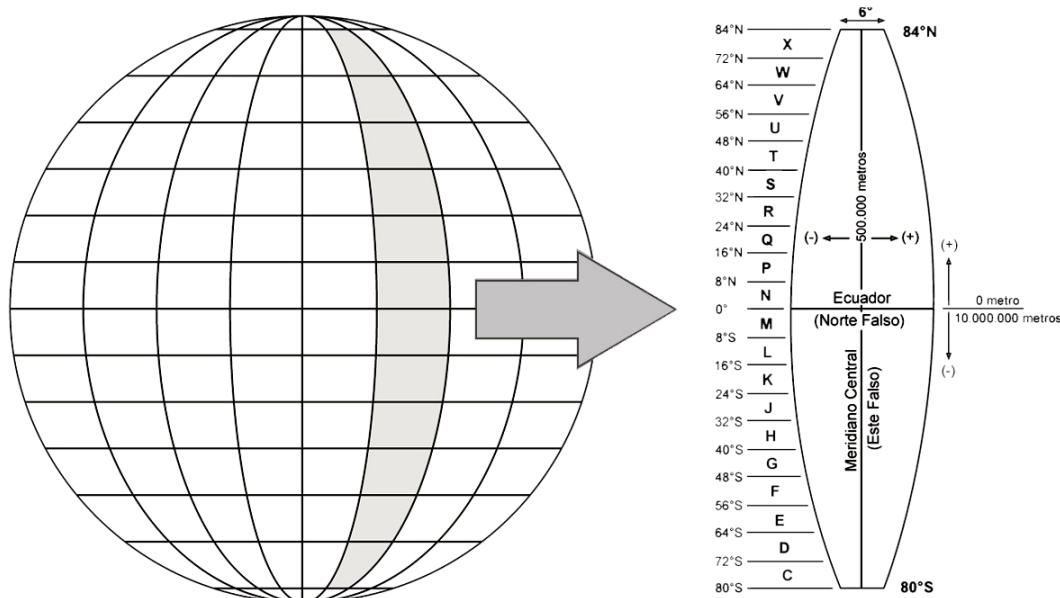


Figura 6. Características y componentes del Huso UTM.

- 13] El NF se localiza en la línea del Ecuador y tiene un valor de 0 m para el HN y de 10 millones de metros para el HS
- 14] El EF se localiza en el MC de cada Huso UTM y tiene un valor de 500 mil metros.
- 15] La proyección UTM es especialmente adecuada para la **cartografía topográfica** (Figura 7B).

CONCLUSIONES

La prolífica producción cartográfica de Mercator ha perdurado hasta nuestros días y sus proyecciones siguen vigentes y son utilizadas masivamente. En la actualidad, todo sistema cartográfico digital incorpora en sus herramientas la posibilidad de seleccionar la proyección cartográfica que mejor se acomode al objetivo que se persigue, y entre estas alternativas se encuentran las proyecciones calculadas por Mercator. En su gran mayoría, estas proyecciones fueron calculadas varios siglos atrás, sin ir más lejos, la proyección Mercator tiene más de 450 años.

Mercator se basó en los portulanos de su época y su objetivo era apoyar a la navegación, sin embargo, su obra trascendió más allá de estos límites y sus proyecciones son utilizadas tanto en la navegación como en las tareas propias de tierra como la topografía y la geodesia.

De acuerdo con la época y los medios existente, los usos náuticos que se le dio al mapamundi de Mercator estaban restringidos por la pequeña escala de representación, que en este caso permitía travesías de carácter continental. Hoy, las cartas náuticas pueden cartografiar grandes extensiones de territorio (y de mar u océano) para travesías extensas, así como también sectores muy específicos como puede ser la entrada a un puerto, o el paso a través de un estrecho. En estos casos, la incorporación de la tecnología GNSS ha sido fundamental para dar seguridad a la navegación.

Desde el punto de vista del posicionamiento de puntos en el espacio, la proyección UTM se diferencia de la mayoría de las proyecciones existentes porque utiliza coordenadas de tipo planas y expresadas en metros, lo que la hace especial-

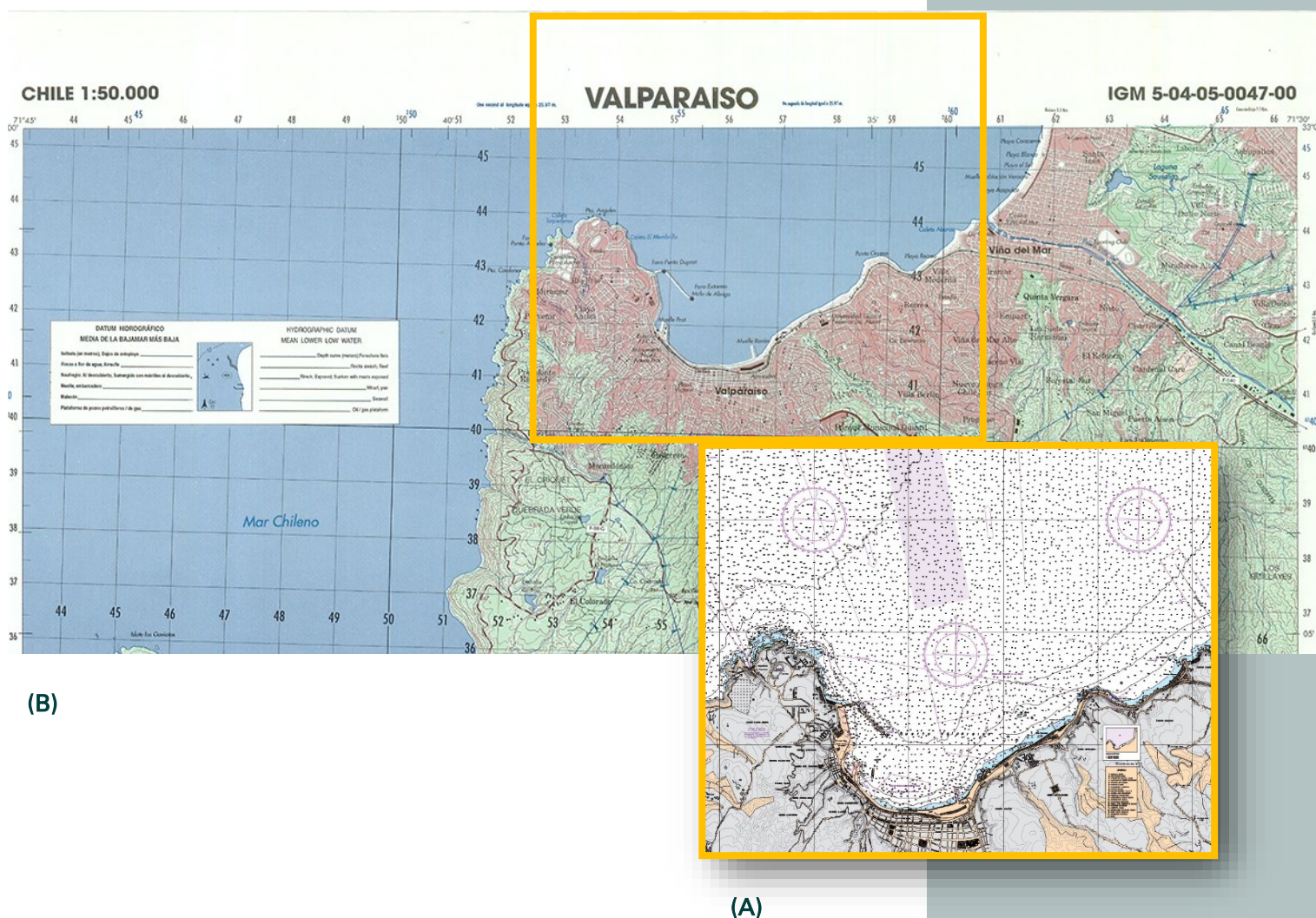


mente adecuadas para su uso en ámbitos terrestres. Ante la imposibilidad de generar mapamundi en proyección UTM, considerando la reducida extensión de los Husos UTM y el factor de escala muy cercano a 1 (casi sin deformación), es posible obtener cartografía a escala media y grande con gran precisión.

Independiente de la proyección utilizada, de las escalas de representación y de la extensión de terreno cartografiado, es importante no olvidar que todo producto cartográfico tiene deformación, en menor o en mayor medida, y solo una pequeña parte del mapa está representado en forma verdadera. El trabajo del cartógrafo y el uso de las diferentes proyecciones cartográficas consiste en tratar de maximizar el área representada en verdadera magnitud, o en su defecto, evaluar y conocer las deformaciones para así obtener los datos reales y precisos.

Figura 7. (A) Carta náutica de Valparaíso, en proyección Mercator, del Servicio Hidrográfico de la Armada (www.shoa.cl). (B) Carta topográfica, de Valparaíso, en proyección Mercator del Instituto Geográfico Militar (www.igm.cl).

El recuadro amarillo muestra la misma zona geográfica.



Bajo Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.



Amigos de Cartógrafo.CL

<https://www.agustingutierrezfornes.com/>



<http://geodevlab.xyz/>



<https://www.nosolosig.com/>



<https://srmconsulting.es/>



<http://www.wonder-maps.com/>





Inteligencia de ubicación y por qué su empresa debería adoptarla en el 2021

¿Cuál es su cliché favorito sobre 2020 y la pandemia de COVID-19?

¿Es que al final del día, no importa cuánto ganemos o dónde vivamos, todos somos iguales?

O tal vez sea que “nada volverá a ser lo mismo”, o tal vez esté harto de saber cuántos pasatiempos nuevos han decidido emprender sus amigos.

Entonces, si bien los últimos 12 meses han estado llenos de mantras y clichés, hay uno que al menos es cierto: si querías que tu negocio sobreviviera en el 2020, debías improvisar y adaptarte rápidamente; optimizar todo lo relacionado con tus procesos diarios y en el 2021, estar preparado para más de lo mismo.

EN LOS SIG CONFIAMOS

Los SIG funcionan mediante la creación de mapas a los que se acceden a través de una aplicación o servicio de software. Estos mapas incluyen diferentes tipos de capas de datos que utilizan la ubicación espacial, incluidas imágenes, coordenadas y hojas de cálculo. El servicio analiza estos datos y luego los publica a través de una aplicación u otro punto de entrada del usuario, de una manera que le sea a este, fácil de entender.

Los SIG han sido una herramienta confiable para las empresas durante muchos años; sin embargo, el concepto está empezando a quedar obsoleto. Esto es especialmente cierto para los tiempos tumultuosos en los que vivimos, en los que cuestiones que nunca hubiesen entrado en nuestra mente, hace un año se han convertido en primordiales. Estos incluyen cierres de fronteras, detenciones en los viajes internacionales, nuevas leyes de cuarentena y aduanas: una lista que sigue y sigue.

Esta situación está impulsando en parte el desarrollo de algo llamado inteligencia de ubicación (LI, Location Intelligence, por sus siglas en inglés), que podría describirse mejor como el sucesor de un SIG tradicional. Es una mejora importante en SIG, ya que incluye datos abiertos, flujos en tiempo real y grandes conjuntos de datos; nuevos métodos para analizar datos de ubicación y es más accesible para desarrolladores, analistas y científicos de datos. Ninguna persona, ninguna empresa está completamente aislada, incluso a pesar de la pandemia, y un SIG tradicional simplemente no cubre las necesidades de generar sus propios datos internos.



Aspectum



Geodevlab XY



<http://geodevlab.xyz/>

¿DE QUÉ ME SIRVE LA INTELIGENCIA DE UBICACIÓN (LI)?

Los usos potenciales de LI son numerosos, y algunas de sus ventajas comparativas con los SIG son las siguientes:

- Los flujos de datos de código abierto democratizan el acceso a la información, lo que significa que más empresas, independientes de su tamaño, pueden beneficiarse del acceso a datos de mayor calidad.
- Un SIG depende demasiado de la información histórica, mientras que las opciones de análisis mejoradas de LI pueden incluir optimización de restricciones, modelado de comportamiento, planificación logística y más.
- Históricamente, el SIG requería capacitación a nivel universitario, mientras que el LI puede ser utilizado por casi cualquier persona y a medida que más personas lo usan, mejora su calidad.

Piense en lo que esto puede hacer por su negocio.

Gracias al alcance potencial de las herramientas y los datos relacionados con LI, el límite es solo su imaginación. Puede identificar nuevas audiencias de clientes, planificar expansiones para sus historias en función de la información geográfica, planificar posibles problemas de logística y transporte, entre otras múltiples potencialidades. Lo mejor de LI es la verdadera democratización de la información, ya que tiene muchos datos de alta calidad con los cuales trabajar.

La adopción de una nueva herramienta puede ser abrumadora, pero con el 78% de los gerentes de nivel C, que informan que planean adoptar LI, usted no querrá quedarse atrás.

Por eso recomendamos [Aspectum](#) en colaboración con [Geodevlab XY](#) para comenzar con Inteligencia de ubicación (LI). Es fácil de usar y contiene los mejores aspectos de SIG y LI.

Es la excelente opción de herramienta de mapeo todo en uno que lo ayudará a optimizar todas las áreas de su negocio en el 2021.



Aspectum
Jacob Suberza
+52 5524967074
jsuberza@geodevlab.xyz





¿Qué diferencia existe entre las aeronaves no tripuladas denominadas como UAV, Drones o RPA?

El término drone (zángano) deriva del uso inicial dado a pequeños aviones a hélice que zumbaban como zánganos y se usaban en prácticas militares. La definición de drone corresponde a la de Vehículo Aéreo no Tripulado, VANT o UAV por sus siglas en inglés, o también como Sistema Aéreo no Tripulado. Es importante indicar que la plataforma que se utiliza como equipamiento para la navegación aérea, se le denomina Aeronave y a partir de esta definición tenemos el término RPA (Remotely Piloted Aircraft), que se refiere a una aeronave pilotada en forma remota.

El Departamento de Defensa de los Estados Unidos define un sistema UAV como un vehículo aéreo (aeronave) propulsado, que no transporta operador humano y usa las fuerzas aerodinámicas para elevarse; que vuela de forma autónoma (UAV) o es pilotado remotamente (RPA), desechable o recuperable, y que puede llevar a bordo una carga útil letal o no letal. Los vehículos balísticos o semibalísticos, misiles de crucero y proyectiles de artillería no son considerados vehículos aéreos no tripulados. Existen drones desde pequeña escala a radiocontrol, planeadores, helicópteros, dirigibles, aviones, hasta vehículos tan sofisticados como aviones a tamaño real, con sus respectivos equipos de navegación, GPS, VOR o servomecánicos.

En los últimos treinta años, la complejidad del drone ha avanzado considerablemente. Existen drones de carácter militar con sensores electrónicos suficientemente capaces de tomar acciones evasivas en caso de ser atacados de forma física o virtual; así como también equipados con sensores para captura de imágenes RGB o infrarrojos, programados para despegue o aterrizajes autónomos, con uso de receptores GNSS operando en modo RTK. Actualmente, se han desarrollado VANT para uso comercial en aplicaciones cartográficas, transporte y entretenimiento; también se han creado para aplicaciones militares, en donde se los conoce como vehículos aéreos de combate no tripulados.



Aporte gráfico de [Máster SIG](#) que nos indican la diferencia entre las terminologías para Aeronaves no tripuladas.



GeoGlobalty - Consultoría y Geotecnología

Wernher Ibáñez L.

Móvil/Whatsapp: +56 9 9319 83 18

asistencia@geoglobalty.com

www.geoglobalty.cl

Diferencia entre...

Drone

(Zángano)

Es un término popular, de origen militar, empleado para referirse a las aeronaves no tripuladas.

UA

(Unmanned Aircraft)

UA (Aeronaves no tripuladas) o anteriormente conocidas como UAV, es un término genérico para referirse a las aeronaves no tripuladas, sin tener en cuenta si son autónomas o controladas remotamente (RPA).

RPA

(Remotely Piloted Aircraft)

RPA (Aeronaves pilotadas de forma remota) Término para denominar a las aeronaves no tripuladas que son operadas mediante control remoto.



Master SIG

Pasión por los SIG



Inteligencia Artificial en el proceso cartográfico con Ipsilum

¿QUIÉN DIJO QUE ERA FÁCIL CARTOGRAFIAR EL MUNDO?

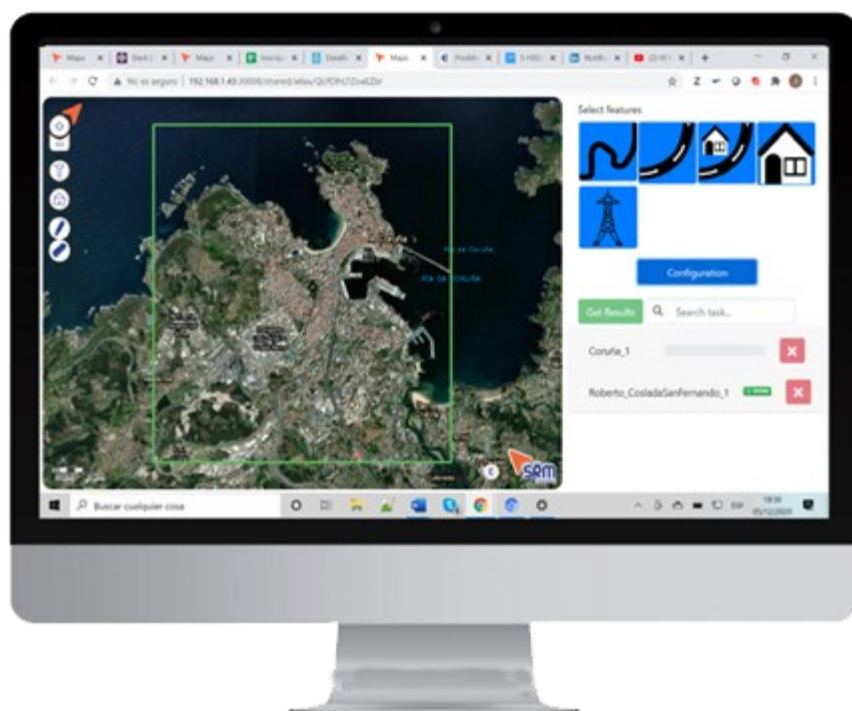
Ni en el siglo XVIII, cuando el geógrafo Tomás López solicitó la ayuda de párrocos para confeccionar el mapa de España, pidiéndoles completar unos «mapas o planos de sus respectivos territorios, de dos o tres leguas en el contorno de sus pueblos»; ni ahora, cuando contamos con potentes imágenes de satélite y software especializados. Sin embargo, desde hace unos años, tenemos la tecnología que está revolucionando el conocimiento y la forma como este es aplicado para responder a grandes retos: la Inteligencia Artificial.

A pesar de los modernos avances en tecnología, el proceso cartográfico sigue siendo complejo y requiere de un enorme esfuerzo y exhaustivos controles de calidad.

SRM Consulting pretende facilitar la tarea de organismos y empresas productoras de Cartografía, mediante el uso de la Inteligencia Artificial especializada que ofrece Ipsilum. La plataforma tecnológica para almacenar, editar, analizar y compartir información georreferenciada del equipo de ingeniería de la empresa.

Gran número de los geoprocursos incluidos en Ipsilum se basan en la Inteligencia Artificial y el aprendizaje profundo, los cuales tiene varias ventajas importantes:

- Reducción de tiempos, se detectan objetos cartográficos en cuestión de minutos.
- Reducción de costes, al disminuir el tiempo de trabajo y recursos invertidos.
- Aumento de la productividad y de la eficiencia operativa, puesto que se automatizan tareas repetitivas.



<https://srmconsulting.es/>



- Mejor calidad de los datos, al minimizar el error humano en la detección de objetos cartográficos.

¿QUÉ ES CAPAZ DE DETECTAR IPSILUM?

La herramienta se ha entrenado para detectar un número muy variado de objetos cartográficos a partir de imágenes de satélite o fotografías aéreas. Objetos que se pueden identificar con gran facilidad (carreteras y caminos; edificaciones, incluso farolas, piscinas, etc.) e incorporar a la cartografía como entidades puntuales, lineales o poligonales.

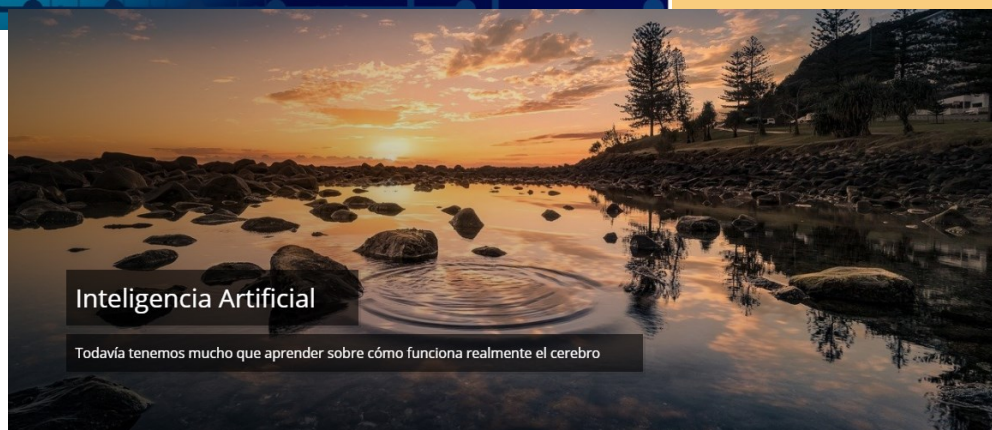
Otra de las ventajas del modelo es que, con el entrenamiento adecuado, **Ipsilum** se puede aplicar en cualquier parte del mundo, independiente del tipo de paisaje o entorno. Se ha probado en producción, adaptándose a las particularidades de cada territorio, como tipologías de edificios y de materiales empleados que generan texturas y colores diferentes (p. ej., el concreto usado en gran parte de las carreteras de América Latina, no es igual al asfalto usado en Europa).

Ipsilum supone un enorme salto hacia adelante en la producción cartográfica, ante una sociedad que nos demanda una información geográfica cada vez más actualizada, detallada y de calidad.

El enorme esfuerzo de SRM en innovación e I+D+i ha sido reconocido por el Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital de España que le ha concedido el sello de Pyme Innovadora.



info@srmconsulting.es





Conociendo los GIS Líder del Mercado

La estrategia futura de las organizaciones no se entiende sin la transformación digital; las empresas continúan evolucionando y el entorno de trabajo también. Es difícil imaginarse el puesto de trabajo sin la irrupción de las tecnologías de la información, que nos permiten trabajar de forma más rápida e inteligente, gracias a las herramientas de colaboración y productividad, automatización, analítica avanzada de datos e inteligencia artificial. Sin embargo, existe otra tecnología que puede aportar grandes avances uniendo el mundo físico con el mundo digital, como es el caso de los GIS (Geographic Information System) su incorporación en las empresas y gobiernos ha significado resolver problemas en proyectos de inversión e implementar nuevas y mejores políticas públicas para mejorar la calidad de vida de la población.

Según un estudio del mercado GIS en Europa (Pentec, 2020⁽¹⁾) los principales proveedores de GIS (*Top of Mind*) son:

En el ámbito GIS, los tomadores de decisiones, por supuesto, son principalmente los directores de tecnología e innovación, jefaturas TIC y responsables del área de medioambiente y seguridad.

En cuanto al segmento consultado, las preferencias por cursos o perfeccionamientos en el área, se centraron en los cursos presenciales en laboratorio, 44%, y dado el escenario COVID-19, los usuarios han optado fuertemente por Cursos Elearning By Doing⁽²⁾, 38%.

En Chile, el mayor uso de los GIS (SIG, en español) es en el sector público, donde hay una alta especialización, aunque en menor grado en municipalidades y empresas dado su alto costo. Sin embargo, existe una opción GIS Open Source o libre, denominada QGIS.

El proyecto Quantum GIS o QGIS nació oficialmente en mayo de 2002, como un Proyecto oficial de Open Source Geoespatial Foundation (OSGeo).

La idea fue concebida en febrero de 2002, cuando Gary Sherman empezó a buscar un visualizador GIS para Linux que fuese rápido y se apoyara en una amplia gama de almacenes de datos. Eso, junto con un interés en la codificación de una aplicación GIS, llevó a la creación del proyecto. En el principio Quantum GIS se estableció como un proyecto en SourceForge en junio de 2002.



⁽¹⁾Análisis del Mercado GIS (Geographic Information System) en España 2020. Informe Ejecutivo Pentec. <https://1bestlinks.net/8tcnD>

⁽²⁾El método Learning by Doing consiste en "aprender haciendo".



Sustaining MemberShip 2014-2021

Principales proveedores GIS.



Preferencias de formación GIS.



www.qgischile.cl
www.eprime.cl



QGIS era uno de los primeros ocho proyectos de la Fundación OSGeo y en 2008 salió oficialmente de la fase de incubación. Hoy opera como un GIS de código abierto, licenciado bajo GNU.

El código abierto garantiza el acceso al código fuente para auditoría, modificación y capacidad de redistribuir el software sin costos adicionales. El software corre sobre Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android. Soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, ráster y bases de datos.

QGIS contempla nuevas versiones cada 4 meses, recientemente en junio hemos inaugurado QGIS 3.20 Odense.

En Chile, desde 2014, el Organismo Técnico de Capacitación Eprime Formación Ltda. es el único miembro sostenedor del proyecto, no existiendo otro organismo ni universidad acreditada por QGIS.org



<https://qgis.org/es/site/>

Nuestros cursos E-learning se encuentran ubicados en

<https://aulavirtual.eprime.cl/>



Alexandra Momberg O.
Directora Ejecutiva QGIS
+56 2 2791 1086
+56 9 6831 0225
contacto@qgischile.cl
Santiago- Chile



El Centro Argentino de Cartografía

El Centro Argentino de Cartografía (CAC) es una asociación civil sin fines de lucro, que en el 2021 cumplirá 66 años; está conformado por profesionales, técnicos y estudiantes de distintas disciplinas, unidos por la pasión y el amor a la Cartografía.

Su origen se remonta al año 1951, donde un grupo de profesionales y técnicos que, por ese entonces, conformaban el Subcomité de Símbolos Cartográficos dependiente de la Sección Nacional Argentina del Comité de Cartografía del Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), realizaron una petición en el Primer Congreso Nacional de Cartografía, solicitando la creación de un Centro Argentino de Cartógrafos o de Cartografía o Sociedad Argentina de Cartografía, con la misión de crear una conciencia profesional, jerarquizar cultura e intelectualmente este género de actividades; propender al desarrollo de estas disciplinas de una manera libre y sistemática; estimular las creaciones nacientes y las investigaciones que tengan que ver con ellas y en especial vincular a los hombres y mujeres, a quienes los une idéntica inquietud profesional.

El CAC nace oficialmente el 23 de noviembre de 1955. Sus objetivos son:

- a) Contribuir a la investigación, conocimiento y el desarrollo de la cartografía;
- b) Propiciar el reconocimiento recíproco y la vinculación entre sus componentes, organizando reuniones periódicas, congresos, simposios, a efecto de fomentar y mantener la intercomunicación, difusión y la colaboración entre sus miembros y el resto de la comunidad cartográfica;
- c) Otorgar becas, premios o distinciones dentro de sus posibilidades económicas;
- d) Mantener relaciones con entidades científico-culturales similares de orden nacional, internacional o de otros países;
- e) Coadyuvar en la participación argentina en las reuniones internacionales sobre cartografía y disciplinas afines.

Su oficina, desde 1986, se encuentra en las instalaciones del Instituto Geográfico Nacional Argentino, en la ciudad autónoma de Buenos Aires. Allí, la Comisión Directiva del Centro se reúne habitualmente, para planificar y llevar adelante sus numerosas actividades. Entre las más importantes se encuentran el **Congreso de la Ciencia Cartográfica** que, el año entrante junto con el Instituto Geográfico Nacional, realizará su undécima edición; la **Competencia Internacional de Cartografía para niños y jóvenes "Bárbara Petchenick"** y el **Concurso Nacional de Cartografía**; todos estos eventos de edición bienal. Asimismo, la **Semana Nacional de la Cartografía**, en su decimoséptima edición, que se llevó a cabo entre el 22 al 25 de junio, totalmente gratuito y virtual.

El CAC se acerca a toda la geocomunidad a través de reuniones temáticas, sociales e institucionales, promoviendo la generación de lazos que entremezclan la camaradería y la participación profesional. En los últimos años, hemos organizado reuniones técnicas mensuales de manera presencial, conscientes de que existía una deuda con los socios y seguidores de cada rincón del país. El aislamiento social y preventivo producto de la COVID-19 impulsó, como en todo el mundo, a la implementación de las tecnologías de la información y comunicación. A los pocos meses de iniciado el aislamiento en el 2020, comenzamos con la primera charla virtual por el canal de YouTube, gratuito y accesible para todos los interesados en la temática de teledetección.

Fue así como partir de julio del 2020, y de forma ininterrumpida, el Centro brinda webinars, talleres y capacitaciones dirigidas a estudiantes y docentes de los distintos niveles educativos, profesionales y público en general, incrementando nuestra audiencia y llegando a distintos rincones del mundo. Abarcamos distintas temáticas, pasando por charlas sobre sistemas de proyección, escalas, lectura de cartografía topográfica, uso de las cartas náuticas, historia y evolución de la cartografía, pero también difundiendo temas actuales de disciplinas afines como observación de la Tierra con satélites de radar de apertura sintética, generación y validación de modelos digitales de elevaciones e infraestructura de datos espaciales (IDE).



Laura Pietrangelo
Impietrange@yahoo.com.ar

Jorge Horacio Machuca
machuca.jorge@gmail.com



www.centroargentinodecartografia.org

Una de las ventajas de la virtualidad es que la gran mayoría de las transmisiones realizadas por el canal de YouTube del CAC, se encuentran disponibles y accesibles para toda la comunidad para ser utilizados como material de consulta, recurso didáctico o para actualizar o reforzar conocimientos.

COMISIONES DE TRABAJO

La asociación se organiza a través de sus socios, representados en la Comisión Directiva y en distintas Comisiones de trabajo. A lo largo de la historia, las comisiones y subcomisiones fueron surgiendo y desapareciendo en función de la dinámica y situación social del país, lo cual también afectó al Centro. A pesar de ello, el CAC mantuvo la premisa de asegurar la participación de sus asociados y el espíritu de trabajo multidisciplinario, por lo que en estos momentos existen dos comisiones de trabajo, la [Comisión de Cartografía](#), conformada por profesionales representantes de la cartografía aérea, náutica, topográfica, cartografía temática y cartografía web, y la [Comisión de Toponimia](#), que se encuentra en plena conformación. Además, en el congreso recientemente efectuado a pedido de sus asistentes se acordó conformar la [Comisión de Educación](#) por lo que próximamente se trabajará en su organización con ayuda de los socios.

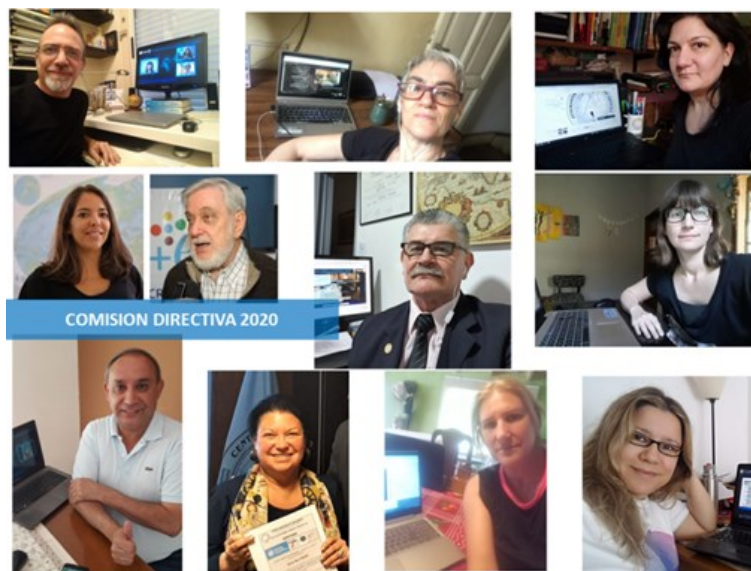
EL CAC SE REINVENTA

Desde el 23 de noviembre de 1955, el CAC ha recorrido un largo sendero en el quehacer cartográfico; por aquellos años, una forma de llegar a la sociedad era con publicaciones semestrales a través de boletines impresos. Hoy, podemos llegar de forma masiva a todo el país y al mundo mediante las redes sociales. El uso de las redes es vital no solo para lograr visibilidad, sino como un lugar de encuentro para compartir, difundir artículos científico-técnicos, novedades, tendencias, trabajos realizados por alumnos en la materia de Geografía, imágenes cartográficas, efemérides, contenido geomático, etc.

Nos pueden encontrar y seguir en [Facebook](#), [Instagram](#) y [LinkedIn](#): aun cuando nuestro mayor deseo es que se sume a nuestra asociación y nos ayude a mantener viva nuestra pasión por la cartografía, difundiendo su correcta confección y utilización por parte de todas las ciencias y disciplinas. Las cuales, al fin y al cabo, deben valerse de ella, tanto al momento de dar a conocer los resultados de sus investigaciones como para el estudio y análisis previo de las diversas problemáticas, con información que de alguna u otra forma pueden ser georreferenciadas y son de interés de toda la sociedad.

CAPACITACIÓN

Este 2021, dado el confinamiento, pensamos en seguir fortaleciendo la transferencia de conocimientos y saberes por medio de transmisiones en vivo por



Algunos integrantes de la Comisión Directiva del CAC 2020.



nuestro canal de YouTube. En lo que va del año ya hemos realizado dos "geoentrevistas", talleres de lectura de cartografía, infraestructura de datos espaciales y procesamiento de imágenes multiespectrales Sentinel con SNAP. Así como distintos webinaris, relacionados con la cartografía y las geociencias. Se han destacado en especial el "Curso de Diseño Cartográfico" y los talleres de "Lectura de Cartografía", como los de mayor interés institucional.

EL CAC Y LA CARTOGRAFÍA HOY

Con el avance tecnológico, la cartografía ha adquirido un desarrollo impensado (internet, Google Earth, smartphone) y se ha difundido como una herramienta auxiliar y transversal a todas las ciencias y disciplinas. Esto lo podemos ver en la presentación de una serie de cartas y mapas temáticos que grafican aspectos de otras ciencias, o desarrollados por otros especialistas en conjunto con los cartógrafos.

Podemos decir que la cartografía ha sorprendido al resto de las ciencias, no les ha preguntado si están de acuerdo en utilizarla, simplemente, muchos profesionales empezaron a hacerlo y a partir de allí, se dieron cuenta que se encontraban en una situación de desventaja al carecer de los conocimientos que les permitan explotar estas nuevas posibilidades tecnológicas que vienen de la mano de los mapas.

El CAC como entidad técnica forma parte de la Asociación Cartográfica Internacional (ICA), cuyo propósito fundamental es contribuir a la investigación, conocimiento y desarrollo de la cartografía, ya que hoy todos somos usuarios y productores de documentos cartográficos. Todos quedan invitados a sumarse

al CAC, porque como dice su lema, la fortaleza está en sus socios.



Eventos –concursos, talleres, cursos, reuniones técnicas – organizados por el CAC.

Teléfonos (+54 11) 4576-5576/5545 interno 184. Av. Cabildo 381-C1426AAD-Ciudad Autónoma de Buenos Aires. República Argentina. www.centroargentinodecartografia.org/ cac@centroargentinodecartografia.org / centro.de.cartografia@gmail.com



<https://cartografo.cl>

Vol. 1, Núm 1 (2021)