



Revista  
**Geográfica**

número 164 • enero-junio 2022



INSTITUTO PANAMERICANO DE  
**GEOGRAFÍA E HISTORIA**

**AUTORIDADES DEL  
INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA  
2022-2025**

**PRESIDENTE** Dra. Patricia Solís (Estados Unidos)  
**VICEPRESIDENTE** Lic. Rocsa Pahola Méndez Mata (Guatemala)

**SECRETARIO GENERAL**  
Mtro. Antonio Campuzano Rosales  
(México)

**COMISIÓN DE CARTOGRAFÍA**

(Costa Rica)

Presidente:

*MSc. Max Lobo Hernández*

Vicepresidente:

MSc. Christian Núñez Solís

**COMISIÓN DE GEOGRAFÍA**

(Chile)

Presidente:

Dr. Hermann Manríquez Tirado

Vicepresidente:

Dr. Rodrigo Barriga Vargas

**COMISIÓN DE HISTORIA**

(República Dominicana)

Presidente:

Dr. Filiberto Cruz Sánchez

Vicepresidente:

Dra. Reina Cristina Rosario Fernández

**COMISIÓN DE GEOFÍSICA**

(Ecuador)

Presidente:

Dr. Mario Calixto Ruiz Romero

Vicepresidente:

Dra. Alexandra Alvarado Cevallos

**MIEMBROS NACIONALES DE LA COMISIÓN DE GEOGRAFÍA**

Argentina	Prof. Héctor O. J. Pena
Belice	
Bolivia	Tcnl. DAEN Hector German Sandy Romero
Brasil	
Chile	Dra. Gloria Naranjo Ramírez
Colombia	Geog. Fredy Alberto Gutiérrez García
Costa Rica	M.Sc. Francisco Solano Mata
Ecuador	PhD (c). Giannina Zamora Acosta
El Salvador	Lic. William Roberto Bernal
Estados Unidos	Dr. David Salisbury
Guatemala	Arq. Joshua Alejandro Chavarría
Haití	Prof. Claire Benoit Joseph
Honduras	Lic. Richard Humberto Díaz
México	Dra. María del Carmen Reyes Guerrero
Nicaragua	MSc. Vladimiro Prado
Panamá	Dr. Mario. De León
Paraguay	Prof. Ing. Oscar Alfonso Correa
Perú	Geóg. Pedro Tipula Tipula
Rep. Dominicana	Lic. Susana Hernández
Uruguay	MSc. Raquel Alvarado
Venezuela	



Revista  
**Geográfica**

número 164 • enero-junio 2022



INSTITUTO PANAMERICANO DE  
**GEOGRAFÍA E HISTORIA**

# Revista Geográfica

Publicación anual fundada en 1941

Indizada en Latindex y PERIÓDICA

Disponible en: Cengage Learning, Ebsco, JStor, LatAm-Studies y ProQuest

La preparación de la **REVISTA GEOGRÁFICA**  
está a cargo de la editora:

M.Sc. Johana Marcela Norori Solís

Universidad Nacional Autónoma de Honduras  
Correo electrónico: revista.geografica@ipgh.org  
<https://revistasipgh.org/index.php/regeo>

Canje, ventas y distribución de publicaciones:  
**Instituto Panamericano de Geografía e Historia**  
**Secretaría General**

Apartado Postal 18879 C.P. 11870, Ciudad de México, México  
Teléfonos (52 55) 5277-5791 / 5277-5888 / 5515-1910

Correo electrónico: publicaciones@ipgh.org / Página web: <https://revistasipgh.org/>

Las opiniones expresadas en notas, informaciones, reseñas y trabajos publicados en la  
Revista Geográfica, son de la exclusiva responsabilidad de sus respectivos autores.

Los originales que aparecen sin firma ni indicación de procedencia, son de la Dirección de la Revista.

En cumplimiento con la Resolución IX de la XIV Reunión del Consejo Directivo del IPGH, celebrada en julio de 1972, en Buenos Aires, se advierte que: "Los límites que aparecen en los mapas de esta publicación no están, en algunos casos, finalmente determinados y su reproducción no significa aprobación oficial o aceptación por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH)".

In accordance with Resolution IX of the XIV Meeting of the PAIGH Directing Council in Buenos Aires, Argentina, in July, 1972. "The boundaries which appear on the present maps are not in some cases, finally determined and their reproduction does not indicate official approval or acceptance by the Pan American Institute of Geography and History (PAIGH)".

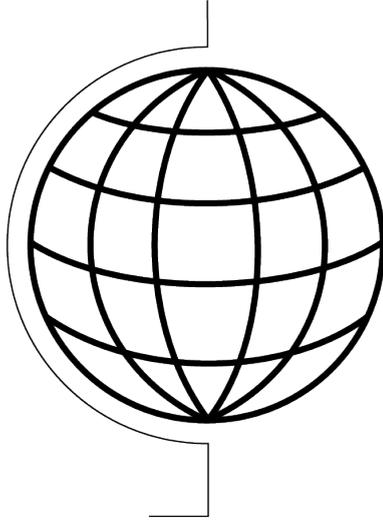
**Imagen de portada:** Marta Paniagua, <https://flic.kr/p/21zfAN1>

© 2022 Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

---

*Revista Geográfica*, núm. 164, enero-junio 2022, es una publicación semestral editada por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia | Ex-arzobispado núm. 29, Col. Observatorio, Delegación Miguel Hidalgo, C.P. 11860, Ciudad de México, México | Tels. (52-55)5277-5888, 5277-5791, 5515-1910 | [www.ipgh.org](http://www.ipgh.org) | <https://revistasipgh.org/> | [publicaciones@ipgh.org](mailto:publicaciones@ipgh.org) | Editora: M.Sc. Johana Marcela Norori Solís, [revista.geografica@ipgh.org](mailto:revista.geografica@ipgh.org) | Reserva de Derechos al Uso Exclusivo (impresa): 04-2015-100911312100-102, (en línea): 04-2019-010811483200-203, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor | ISSN (impresa): 0031-0581, ISSN (en línea): 2663-399X | | Responsable de la última actualización de este número: Departamento de Publicaciones del IPGH, Ex-arzobispado núm. 29, Col. Observatorio, Alcaldía Miguel Hidalgo, C.P. 11860, Ciudad de México, México | Fecha de última modificación: 31 de enero de 2022.

Se autoriza cualquier reproducción parcial o total de los contenidos e imágenes de la publicación, incluido el almacenamiento electrónico, siempre y cuando sea para usos estrictamente académicos y sin fines de lucro, citando la fuente sin alteración del contenido y otorgando los créditos autorales.



## Comité Editorial

**Dr. Osvaldo Muñoz Solari**

Universidad de Texas, Estados Unidos de América

**Dr. Jean Pierre Bergoeing**

Universidad de Costa Rica, Costa Rica

**Dr. Vicente Aprigliano Fernandes**

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile



# Revista **Geográfica**

La *Revista Geográfica* es una publicación anual de la Comisión de Geografía del Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), organismo dependiente de la Organización de Estados Americanos (OEA), cuyo primer número fue editado en el año 1941. Constituye un espacio que ha permitido difundir investigaciones geográficas originales e innovadoras centradas esencialmente en América por ya cerca de 80 años.

La *Revista Geográfica* constituye una vitrina en la cual es posible observar y desde la cual es posible difundir las temáticas y principales preocupaciones que tienen implicancias territoriales que afectan directamente a los países americanos, bajo miradas disciplinarias, interdisciplinarias, transdisciplinarias e integradas de la geografía.

# Revista Geográfica

número 164

•

enero-junio 2022

---

## ÍNDICE

Editorial	7
<b>Artículos</b>	
<b>Efectos del cambio climático en la precipitación local del Parque Nacional Radal Siete Tazas, República de Chile, empleando un método de downscaling estadístico</b>	
<i>Effects of climate change on local precipitation in Radal Siete Tazas National Park, República de Chile, using a statistical downscaling method</i>	
Juan José Garcés Gálvez	13
<b>Vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán, Colombia, a los incrementos de temperatura en un escenario de cambio climático</b>	
<i>Ecological vulnerability of paramos complex Chili-Barragán, Colombia, to the temperature increases in a scenario of climate change</i>	
Cristian D. Moreno	
Juan D. Palma	
Jenny M. Trilleras	
José A. Salamanca	21
<b>Gradiente de vulnerabilidad socioambiental en el Partido de Quilmes, Provincia de Buenos Aires, Argentina</b>	
<i>Gradient of socio-environmental vulnerability in Quilmes Municipality, Province of Buenos Aires, Argentina</i>	
Pablo Lacabana	39

<b>Análisis de la distribución espacial de la precipitación anual (1979-2014) aplicando métodos de interpolación en la Región Occidental del Paraguay</b>	
<i>Analysis of the spatial distribution of annual precipitation (1979-2014) applying interpolation methods in the Western Region of Paraguay</i>	
Monserrat Victoria García-Calabrese María Teresa Paniagua Elena Chicaiza	63
<b>Evaluación de estimaciones satelitales de precipitación nívea en la cuenca superior del río San Juan, Argentina</b>	
<i>Evaluation of satellite estimates for solid precipitation in the upper San Juan River basin, Argentina</i>	
Adriana Lorena Cardús Monserrat	83
<b>Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos con CMIP5 para el Perú</b>	
<i>Statistical Regionalization of Climate Scenarios with CMIP5 for Peru</i>	
Jorge Llamocca Huamani	99
<b>Evaluación de la vulnerabilidad socioecológica: estudio de caso en la Parroquia San Juan Cuenca, del río Chimborazo, Ecuador</b>	
<i>Evaluation of social-ecological vulnerability: a case study in the San Juan Parish, Chimborazo River Basin, Ecuador</i>	
Carlos Rolando Rosero Erazo Andrés Agustín Beltrán Dávalos Dayana Alvarez	113
<b>Reseñas</b>	
<b><i>Un lugar de La Mancha. La patria de Don Quijote al descubierto</i></b>	
Antonio F. Rodríguez Pascual	143
<b>Directrices para Autores</b>	147



## Editorial

El cambio climático ha venido a exacerbar las condiciones existentes de riesgos a desastres a nivel planetario. En la actualidad, los impactos producto de las variaciones climáticas, derivadas del calentamiento global por el aumento en la emisión de gases de efecto de invernadero y el mal manejo que ha hecho el hombre sobre su entorno y recursos naturales, están siendo cada vez más perceptibles en diversas regiones del mundo, ya que el cambio climático no tiene fronteras. Periodos prolongados de sequías, incendios, deshielo en las zonas polares, inundaciones, entre otros, son algunos de los impactos más evidentes que aquejan a nuestras comunidades y ecosistemas.

Según datos publicados en el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030,<sup>1</sup> entre los años 2008 y 2012, 144 millones de personas resultaron desplazadas por desastres. Por otro lado, en el 2016 cuando entró en vigor el Acuerdo de París,<sup>2</sup> se había consensuado hacer los esfuerzos necesarios para limitar el incremento de la temperatura muy por debajo de los 2 °C respecto a los niveles preindustriales para el término del siglo XXI; sin embargo, en la revisión realizada en la COP26<sup>3</sup> desarrollada en Glasgow, Reino Unido en noviembre de 2021, se discutieron los resultados de informes del grupo de expertos del IPCC<sup>4</sup> y PNUMA,<sup>5</sup> que muestran que hace falta un mayor compromiso y trabajo por hacer; ya que si se sigue el mismo ritmo, el aumento de la temperatura global esperado para finales del siglo será de 2.7 °C, muy alejado de los 1.5 °C deseados. ¿Qué le espera a la humanidad y a nuestro planeta?

Desde el campo de la Geografía, que, a través de sus distintas ramas, nos permite conocer y entender nuestro entorno, tanto hacia al pasado, como en

<sup>1</sup> ONU: Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres. 2015-2030, 15 marzo 2015, (p. 10). <https://www.refworld.org/es/docid/5b3d419f4.html> [consultado el 15 de enero de 2022].

<sup>2</sup> Acuerdo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático: Acuerdo de París, 2015, (artículo 2). [https://unfccc.int/files/meetings/paris\\_nov\\_2015/application/pdf/paris\\_agreement\\_spanish\\_.pdf](https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf) [coconsultado el 15 de enero de 2022]

<sup>3</sup> Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2021

<sup>4</sup> Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés).

<sup>5</sup> Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

el presente y hacia el futuro, es importante subrayar el esfuerzo que realizan los investigadores de la comunidad Panamericana, que, apoyados en las tecnologías de la información geográfica, los modelados de prospectivas y la geoestadística, indagan y buscan respuestas, desarrollando investigaciones que abordan la problemática del cambio climático, identificando vulnerabilidades, evaluando riesgos y determinando sus efectos.

Por lo que nos complace presentarles el número 164 de la *Revista Geográfica* del Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), el cual está conformado por siete publicaciones de investigadores de Argentina, Chile, Colombia, Ecuador, España, Paraguay y Perú, a los cuales agradecemos por sus valiosos aportes científicos para nuestra comunidad; así como también agradecemos al Centro Panamericano de Estudios e Investigaciones Geográficas (CEPEIGE), ya que cuatro de estos artículos, son producto de investigaciones desarrolladas en el marco del XLVII Curso Internacional de Geografía Aplicada que se llevó a cabo en el año 2020.

Además, deseamos destacar la colaboración de nuestros revisores, ya que cada uno de los artículos pasa por un proceso de revisión de doble ciego en la plataforma de OJS de la *Revista Geográfica*, manteniendo la calidad y rigurosidad científica debida; y hacemos el respectivo reconocimiento a nuestro comité editorial que junto al Departamento de publicaciones del IPGH, permiten que este nuevo número salga publicado, esperamos lo disfruten.

*Johana Marcela Norori Solís*  
Editora

# Editorial

Climate change has come to exacerbate existing disaster risk conditions worldwide. Nowadays, the impacts resulting from climatic variations, derived from global warming due to the increase in greenhouse gas emissions and man's mismanagement of his environment and natural resources, are becoming more noticeable in multiple regions of the world, being that climate change has no borders. Prolonged periods of droughts, fires, thawing in the polar areas, floods, among others, are some of the most obvious impacts that afflict our communities and ecosystems.

According to data published in the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030,<sup>1</sup> between 2008 and 2012, 144 million people were displaced by disasters. On the other hand, in 2016, when the Paris Agreement<sup>2</sup> came into force, it had been agreed to make the necessary efforts to limit the increase in temperature to well below 2 °C compared to pre-industrial levels by the end of the 21st century; However, in the review carried out at COP26<sup>3</sup> held in Glasgow, United Kingdom in November 2021, the results of the reports from the group of experts of IPCC<sup>4</sup> and UNEP<sup>5</sup> were discussed, showing that greater commitment and work is needed to be done; since if the same pace is continued, the expected global temperature increase by the end of the century will be 2.7 °C, far from the desired 1.5 °C. What is in store for humanity and our planet?

From the field of Geography, which, through its different branches, allows us to know and understand our environment, both in the past, in the present, as in the future, it is important to highlight the efforts made by researchers of the Pan American community, who, supported by geographic information technologies, prospective modeling and geostatistics, inquire and seek

<sup>1</sup> United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. <https://www.refworld.org/es/docid/5b3d419f4.html> [accessed January 15, 2022].

<sup>2</sup> United Nations Framework Convention on Climate Change: Paris Agreement, 2015, (article 2). [https://unfccc.int/files/meetings/paris\\_nov\\_2015/application/pdf/paris\\_agreement\\_spanish\\_.pdf](https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf) [accessed January 15, 2022].

<sup>3</sup> United Nations Climate Change Conference 2021.

<sup>4</sup> The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

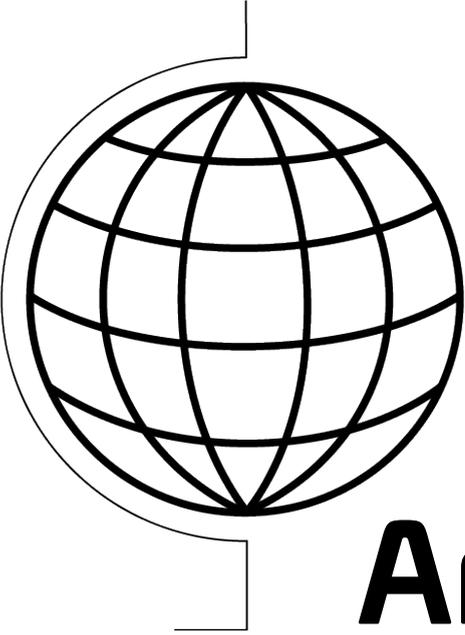
<sup>5</sup> United Nations Environment Programme (UNEP).

answers, developing research that addresses the problem of climate change, identifying vulnerabilities, evaluating risks and determining its effects.

We are therefore pleased to be able and share with you the issue 164 of the PAIGH's Geographical journal, which is made up of seven publications by researchers from Argentina, Chile, Colombia, Ecuador, Spain, Paraguay and Peru, whom we thank for their valuable scientific contributions to our community; We also thank the Pan-American Center for Geographic Studies and Research (CEPEIGE), since four of these articles are the product of research carried out within the framework of the XLVII International Course on Applied Geography that was held in 2020.

In addition, we would like to highlight the collaboration of our reviewers, since each of the articles undergoes a double-blind review process on the OJS platform of the journal, maintaining the quality and scientific rigor required. We would also like to acknowledge our editorial committee who, together with the Publications Department of the PAIGH, has made it possible for this new issue to be published, and we hope you enjoy it.

*Johana Marcela Norori Solís*  
Editor



# **Artículos**





# Efectos del cambio climático en la precipitación local del Parque Nacional Radal Siete Tazas, República de Chile, empleando un método de *downscaling* estadístico

Effects of climate change on local precipitation in Radal Siete Tazas National Park, República de Chile, using a statistical downscaling method

Juan José Garcés Gálvez<sup>1</sup>

Fecha de recibido: 23 de mayo de 2021

Fecha de aceptado: 2 de septiembre de 2021

## Resumen

El estudio determinó los efectos del cambio climático en la precipitación local del Parque Nacional Radal Siete Tazas, República de Chile, empleando el método delta de *downscaling* estadístico. En términos promedio el sector experimentará una disminución de la precipitación diaria de un 14,7%. El método delta reprodujo las tendencias de los modelos globales considerando las particularidades observadas en el área de estudio.

Palabras clave: *cambio climático, Métodos de reducción de escala estadísticos, Modelos Climáticos Globales.*

## Abstract

The study determined the effects of climate change on local precipitation in the Radal Siete Tazas National Park, República de Chile, using the delta

<sup>1</sup> Universidad de Santiago de Chile, Chile, correo electrónico: [juan.garces@usach.cl](mailto:juan.garces@usach.cl)

method of statistical downscaling. On average, the sector will experience a decrease in daily rainfall of 14.7%. The delta method reproduced the trends of the global models considering the particularities observed in the study area.

*Key words: Climate change, Statistical downscaling method, Global circulation model.*

## Introducción

Los efectos del cambio climático afectan de forma desigual a los diferentes lugares del planeta, por lo que determinar el nivel de variación de los escenarios futuros a nivel local, permitiría una adecuada toma de decisiones en materia de mitigación y adaptación para unidades productivas, ciudades y sitios de protección ambiental. En este sentido, los parques nacionales en Chile protegen y conservan la biodiversidad del país, para mantener esta tarea es necesario conocer los efectos locales que tendrá el cambio climático. Específicamente los ecosistemas de la región del Maule que se encuentran en la zona de transición de los biomas del matorral esclerófilo chileno y del bosque templado lluvioso valdiviano, encontrándose entre los 35 *hotspots* mundiales de biodiversidad y clasificados entre las zonas más amenazadas por la iniciativa Global 200 del Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF por sus sigls en inglés) y el Banco Mundial (BM) (Mittermeier *et al.*, 2011; Salinas, 2015). El objetivo del presente trabajo es determinar los efectos del cambio climático en la precipitación local del Parque Nacional Radal Siete Tazas, República de Chile, empleando un método de *downscaling* estadístico.

Las Simulaciones Climáticas Globales o Modelos Climáticos Globales son representaciones numéricas de la dinámica atmosférica global empleadas como herramientas para simular las condiciones futuras del clima ante el aumento de los gases de efecto invernadero (Armenta *et al.*, 2016; *Intergovernmental Panel on Climate Change* ([IPCC], 2014). La resolución aproximada de estos modelos climáticos es de aproximadamente 100 a 200 km (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR2], 2018), para representar el clima a escala regional o local esta resolución no es adecuada toda vez que los fenómenos locales no son reproducidos adecuadamente (Armenta *et al.*, 2016). Estos escenarios han sido configurados con diferentes características asociadas a distintos niveles de concentraciones de gases de efecto invernadero llamados *Representative Concentration Pathway* (en adelante RCP), destacando los escenarios extremos de gases de efecto invernadero: RCP 2.6 el más optimista y RCP 8.5, el más pesimista (Dirección Meteorológica de Chile, 2015; IPCC, 2014).

Para determinar los efectos de los Modelos Climáticos Globales a escala regional o local, se emplean métodos de *downscaling* (o de reducción de

escala), los cuales permiten analizar el comportamiento local de una variable de estudio (Blin, 2018). De acuerdo con Armenta *et al.* (2016), existen tres métodos de *downscaling*:

1. Estadísticos: por medio de relaciones estadísticas de largo plazo empleando datos observados se obtienen el comportamiento futuro de variables de interés.
2. Dinámicos: emplean modelos regionales de circulación y condiciones de borde de modelos globales para modelar el comportamiento de variables con resoluciones más detalladas. Este método requiere de grandes capacidades de cómputo.
3. Dinámico-estadísticos: combina los métodos anteriores para reducir la escala. Usualmente primero se aplica la reducción dinámica a una resolución aceptable y luego se realiza la reducción estadística.

En este estudio se emplea el método delta de *downscaling* estadístico aplicado a tres intervalos: 1) Futuro cercano (2021-2045), 2) Futuro intermedio (2046-2070) y 3) Futuro lejano (2071-2095). Al aplicar el método se determina una disminución media de un 14,7% en la precipitación media diaria del área de estudio.

## **Metodología**

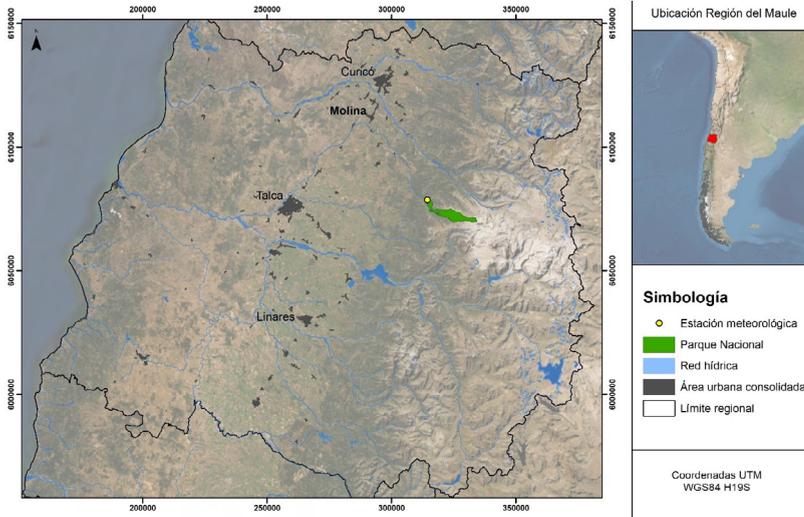
En las siguientes secciones se señalan los datos y métodos que se emplearon en el estudio.

### **Área de estudio**

El Parque Nacional Radal Siete Tazas se ubica en la Región del Maule de Chile, a 50 km al sureste de la ciudad de Molina, en la parte superior de la cuenta de río Claro entre los 650 msnm y los 2 156 msnm; los ecosistemas representativos corresponden a Coironales (estepa alto andina del Maule) y Roble-Raulí-Coihue (Castro-Pantene *et al.*, 2019). El parque es un sitio privilegiado por su gran biodiversidad y endemismo, cumpliendo un rol fundamental en la conservación de los ecosistemas originales de la zona (Consejo Ecológico Comunal de Molina, 2015). Administrativamente, existe una división entre zonas de reserva y parque nacional, pero para efectos del presente estudio se señalará como parque a toda el área protegida. En la Figura 1 se presenta la ubicación del parque y la estación meteorológica Fundo El Radal en el contexto regional.

### **Datos de precipitación**

Se consideraron datos observados de una estación meteorológica del área de estudio y los datos de las Simulaciones Climáticas Globales.



**Figura 1.** Parque Nacional Radal Siete Tazas.

Fuente: elaboración propia a partir de datos disponibles en Catálogo Nacional de Información Geoespacial. Geoportal de Chile. <https://geoportal.cl>

## Datos observados

Se emplearon los datos observados de la estación meteorológica Fundo El Radal, ubicada en el área de estudio. El período de datos registrados es del año 1992 al 2020. Para efectos de aplicación del método de *downscaling* se consideraron los datos del período 1995-2019 para comprender un horizonte temporal de 25 años.

## Simulaciones Climáticas Globales

Se descargaron los datos de precipitación de 45 modelos climáticos globales para el área de estudio, disponibles en la plataforma de simulación climática del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. Para cada modelo se descargó la información de los períodos históricos y escenarios RCP2.6 y RCP8.5.

## Métodos

La metodología de trabajo consideró:

1. La descarga de data meteorológica observada y modelada para el área de estudio;
2. La aplicación del método delta de *downscaling* estadístico, para esto se consideraron cuatro intervalos temporales de 25 años (Período base (1995-

2019), Futuro cercano (2021-2045), Futuro intermedio (2046-2070) y Futuro lejano (2071-2095));

3. El análisis de la variación de la precipitación para los diferentes intervalos temporales. En la Figura 2 se ilustra la metodología mencionada. Es importante señalar que se empleó el promedio de las proyecciones de los modelos globales.



**Figura 2.** Metodología. Fuente: elaboración propia.

### **Método delta aplicado a la precipitación**

El método delta consiste en la determinación de factores de cambio o escalamiento mensual para una variable y el posterior escalamiento de la serie base (Blin, 2018; Camici *et al.*, 2014; Hamlet *et al.*, 2010; Tohver y Hamlet, 2014). Específicamente para el caso de la precipitación se consideró:

Factor de escalamiento (Ecuación 1).

$$d_{p,k} = \frac{P\_GCM_k^{futuro}}{P\_GCM_k^{periodo\ base}} \tag{1}$$

Donde:

*K*: mes.

*P\_GCM*: Precipitación media del modelo global.

Escalamiento de la serie diaria (Ecuación 2).

$$P\_OBS_k^{futuro} = P\_OBS_k^{periodo\ base} \times d_{p,k} \tag{2}$$

Donde:

*K*: mes.

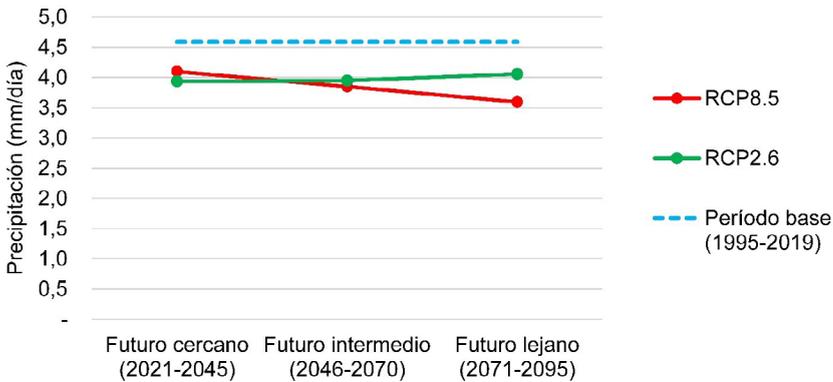
*P\_OBS*: Precipitación diaria observada.

## Resultados

En la Tabla 1 se presenta la variación diaria promedio de la precipitación para el Período base (1995-2019), Futuro cercano (2021-2045), Futuro intermedio (2046-2070) y Futuro lejano (2071-2095). En la Figura 3 se aprecia que tanto el escenario RCP8.5 y RCP2.6 se ubican bajo la media de la precipitación del período base.

**Tabla 1.** Variación de la precipitación diaria para diferentes intervalos temporales

Precipitación (mm/día)	Período base (1995-2019)	Futuro cercano (2021-2045)		Futuro intermedio (2046-2070)		Futuro lejano (2071-2095)		Futuro total (2021-2095)	
		RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6
		Media	4,6	4,1	3,9	3,8	3,9	3,6	4,1
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Máximo	216,5	183,2	182,4	175,1	185,3	164,3	186,6	183,2	186,6



**Figura 3.** Precipitación media diaria.

## Discusión

Ambos escenarios extremos de gases de efecto invernadero, RCP 2.6 el más optimista y RCP 8.5 el más pesimista, configuran condiciones de disminución de la precipitación para todos los intervalos de análisis, presentando disminuciones entre un 10,7% y un 21,7%. Específicamente en el período 2021 a 2095, el escenario RCP2.6 proyecta una disminución promedio de las precipitaciones de un 13,3% y el escenario RCP8.5 de un 16,2%, coincidiendo que el escenario RCP2.6 es más optimista en términos de precipitación.

De acuerdo con el análisis de los escenarios RCP realizado por Rojas (2014), en el centro y sur de Chile las precipitaciones disminuirán entre un 5% y un 20%. Considerando que el lugar de estudio —Parque Nacional Radal Siete Tazas— se sitúa la zona central de Chile, el pronóstico realizado con el método delta se encuentra en el rango superior de la disminución de la precipitación previsto por el análisis de Rojas.

## Conclusiones

De aplicación del método delta de *downscaling* estadístico y el análisis de sus resultados a nivel local se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. El método delta es de fácil y rápida aplicación, aspecto que es relevante para instalar capacidades de análisis en instituciones locales encargadas de la mitigación y adaptación al cambio climático;
2. El método mantiene las tendencias de los modelos globales y las particularidades registradas localmente;
3. Una desventaja es que se debe contar con un amplio período de datos observados en una estación meteorológica del área de estudio;
4. El área de estudio experimentará una disminución de las precipitaciones que fluctuará entre un 13,3% y un 16,2%.

## Bibliografía

- Armenta, G., Villa, J. & Jácome, P. (2016). *Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático*.
- Blin, N. (2018). *Efectos del cambio climático en el acuífero del salar del Huasco*, 81. Santiago, Chile. <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/22273>
- Camici, S., Brocca, L., Melone, F., & Moramarco, T. (2014). Impact of Climate Change on Flood Frequency Using Different Climate Models and Downscaling Approaches. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000959](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000959)
- Castro-Pantene, C., Carrasco, H., Villa, A., & Palma-Aedo, N. (2019). Animales domésticos ferales y meso-mamíferos invasores del Parque Nacional Radal Siete Tazas. *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural*, 68, 121-130. [http://publicaciones.mnhn.gob.cl/668/articles-94500\\_archivo\\_01.pdf](http://publicaciones.mnhn.gob.cl/668/articles-94500_archivo_01.pdf)
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 (2018). *Guía de referencia para la plataforma de visualización de simulaciones climáticas*. <https://www.cr2.cl>
- Consejo Ecológico Comunal de Molina (2015). *Flora y Fauna Nativa del Parque Nacional Radal Siete Tazas, Molina*. Molina, Chile. <http://concejoecologicomolina.cl/descarga/>
- Dirección Meteorológica de Chile (2015). *Resumen de Informe de Simulaciones Climáticas - Análisis de los Resultados Convenio Alta Dirección Pública*, Dirección

- Meteorológica de Chile, Objetivo N° 3. Santiago. <http://archivos.meteochile.gob.cl/portaldmc/meteochile/documentos/SintesisInformeClima.pdf>
- Geoportal de Chile. <https://www.geoportal.cl>
- Hamlet, A., Salathé, E., and Carrasco, P. (2010). *Statistical downscaling techniques for global climate model simulations of temperature and precipitation with application to water resources planning studies*. <https://digital.lib.washington.edu/researchworks/bitstream/handle/1773/38428/2010>
- IPCC (2014). *Resumen para responsables de políticas. Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático*. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Reino Unido y Nueva York: Cambridge University Press.
- Mittermeier, W., Turner, W., Larsen, F., Brooks, T. and Gascon, C. (2011). Global biodiversity conservation: the critical role of hotspots. *Biodiversity hotspots* (3-22), Springer Berlin Heidelberg.
- Rojas, M. (2014). Último informe del IPCC: evidencias del calentamiento global. *Beauchef Magazine*. <http://ingenieria.uchile.cl/publicaciones/101342/edicion-1er-semester-2014-la-nueva-mineria-chilena>
- Salinas, P. (2015). *Diagnóstico del estado y tendencia de la biodiversidad en las regiones de Chile: Región del Maule*. Ministerio del Medio Ambiente. Departamento de Políticas y Planificación de la Biodiversidad, Santiago. <https://biodiversidad.mma.gob.cl/avance-actualizacion-erb-maule/>
- Tohver, I. and Hamlet, A. (2014). *Impacts of 21st century climate change on hydrologic extremes in the Pacific Northwest region of North America*. Wiley Online Library. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jawr.12199>



# Vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán, Colombia, a los incrementos de temperatura en un escenario de cambio climático

Ecological vulnerability of paramos complex Chili-Barragán, Colombia, to the temperature increases in a scenario of climate change

Cristian D. Moreno<sup>1</sup>

Juan D. Palma<sup>2</sup>

Jenny M. Trilleras<sup>3</sup>

José A. Salamanca<sup>4</sup>

Fecha de recibido: 19 de febrero de 2021

Fecha de aceptado: 19 de noviembre de 2021

## Resumen

La presente investigación tiene como finalidad evaluar la vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán a los incrementos de la temperatura en el escenario de cambio climático RCP 6,0 para el periodo 1981-

<sup>1</sup> Ingeniería Geográfica y Ambiental, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA), Colombia, correo electrónico: [crimoreno@udca.edu.co](mailto:crimoreno@udca.edu.co)

<sup>2</sup> Ingeniería Geográfica y Ambiental, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA), Colombia, correo electrónico: [jpalma@udca.edu.co](mailto:jpalma@udca.edu.co)

<sup>3</sup> Ciencias Ambientales, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA), Colombia, correo electrónico: [jetrilleras@udca.edu.co](mailto:jetrilleras@udca.edu.co)

<sup>4</sup> Ingeniería Geográfica y Ambiental, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA), Colombia, correo electrónico: [josalamanca@udca.edu.co](mailto:josalamanca@udca.edu.co)

2095. Para lo cual se deben estimar los incrementos de la temperatura del periodo 1981-2010 y 2011-2095, determinar el impacto potencial y el potencial de recuperación del complejo de páramos Chilí-Barragán.

La evaluación de la vulnerabilidad ecológica se llevó a cabo con diferentes índices e indicadores, entre los que se destaca el índice de vulnerabilidad ecológica. Los métodos que se emplearon son el del proceso analítico jerárquico y opinión de expertos.

En el complejo se encontró un incremento de la temperatura media de 0,79 °C (1981-2010) y de 2,12 °C (2011-2095). Un potencial de recuperación medio y un impacto potencial alto. La vulnerabilidad ecológica es en su mayor medida alta, y representa el 47,51% del área del complejo.

*Palabras clave: vulnerabilidad ecológica, ecosistema páramo, cambio climático, Sistema de Información Geográfica (SIG), impacto potencial, potencial de recuperación.*

## Abstract

This research aims to assess the ecological vulnerability of the complex páramos Chilí-Barragán to increases in temperature in the climate change scenario RCP 6.0 for the period 1981-2095. To which must be estimated temperature increases in the period 1981-2010 and 2011-2095, determine the potential impact and potential recovery in the complex of páramos Chilí-Barragán.

The ecological vulnerability assessment was carried out with different indexes and indicators, including the ecological vulnerability index. The methods used are the analytic hierarchy process and expert opinion.

In the complex was found an increase in the average temperature of 0,79 °C (1981-2010) and 2,12 °C (2011-2095). It has mostly average recovery potential and a high potential impact. The ecological vulnerability is mostly high extent, and represents 47,51% of the area of the complex.

*Key words: ecological vulnerability, páramo ecosystem, climate change, Geographic Information System (GIS), potential impact, recovery potential.*

## Introducción

Actualmente se están presentando cambios globales que amenazan el soporte de vida en el planeta (Steffen *et al.*, 2011), uno de estos es el cambio climático que provoca alteraciones en los ecosistemas en diferentes áreas geográficas Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés, 2007b). Colombia, que posee diversos ecosistemas con alta diversidad biológica y con una proyección de incremento de temperatura

para el año 2100 de entre 3 °C y 4 °C (Pabón, 2012) o de 1,5 °C y 4 °C (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales —IDEAM *et al.*, 2015), se convierte en un país altamente vulnerable a pesar de su baja contribución en la emisión y contaminación que provoca el cambio climático. En consecuencia, es fundamental evaluar los potenciales cambios que tendrían los ecosistemas como respuesta al cambio climático, y dentro de estos ecosistemas con prioridad a evaluar se encuentran los de alta montaña, como los páramos que presentan una mayor fragilidad, en comparación con otros ecosistemas en función de sus procesos y servicios ecosistémicos (Castaño, 2002).

En la primera comunicación nacional de Colombia sobre la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC), se presenta a los ecosistemas de alta montaña, como los más vulnerables a los efectos del cambio climático. Ya que se prevé para el año 2050, el aumento de la temperatura media anual del aire en un promedio de 1 °C a 2 °C; y una variación espacial y temporal en la precipitación  $\pm 15\%$ , el retroceso y pérdida del 78 % de los nevados y del 56% de los páramos (Ministerio de Ambiente, vivienda y Desarrollo Territorial —MAVDT *et al.*, 2001).

Los impactos del cambio climático en el ecosistema páramo en Colombia son diversos, porque a medida que avanza el cambio climático se producen pérdidas del ecosistema (transgresión) y hábitat o disminución del área de los mismos, lo que puede provocar la pérdida de la biodiversidad, esto sucederá según sea la capacidad de adaptación de la biota al cambio climático, si el ecosistema ha contado con la presencia de glaciares o perturbaciones similares de periodos interglaciales, y que las especies que habitan el páramo estén adaptadas a cambios en su distribución geográfica (IDEAM, 2002; Van der Hammen *et al.*, 2002).

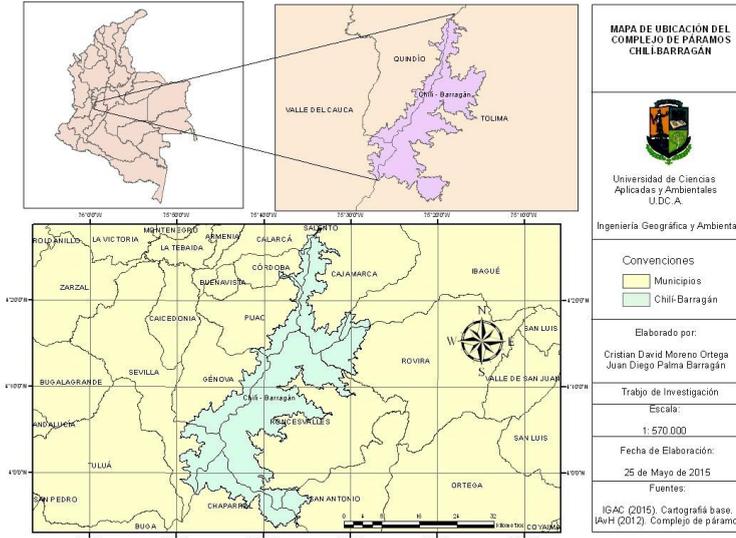
La adaptación en general suele ser muy limitada ante cambios bruscos, pero esto se debe examinar por especie y las interacciones entre estas, porque cada especie tiene diferentes adaptaciones y comportamientos según sea el medio. Es importante destacar que se debe considerar la conectividad entre los ecosistemas, dado que entre mayor sea la conectividad entre ecosistemas y del hábitat natural de las especies, menor será el impacto del cambio climático (Van der Hammen *et al.*, 2002).

El complejo de páramos Chilí-Barragán es un importante enlace de paisaje (referido generalmente como corredor biológico y ecológico) de la cordillera central de Colombia, puesto que tiene la función de conectar los nevados de Caldas, Tolima, Huila y Cauca, es decir provee la importante conexión de dos parques nacionales naturales, los cuales son el del Nevado y el de las Hermosas (Corporación Autónoma Regional del Valle Cauca —CVC, 2005).

## Metodología

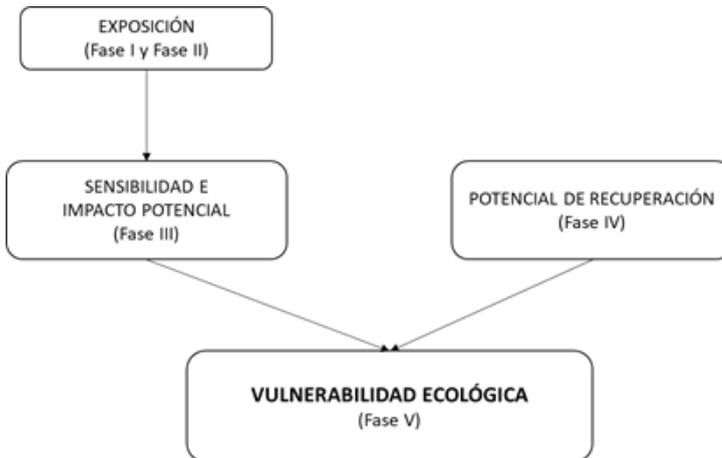
El complejo de páramos Chilí-Barragán está localizado aproximadamente entre los 4° 30' 00" N y 3° 55' 00" N, y los 75° 50' 00" W y 75° 25' 00" W, en

Colombia. Cuenta con 27.900 hectáreas aproximadamente, se ubica en la cordillera Central, entre los departamentos de Tolima, Quindío y Valle del Cauca (Figura 1) (Morales *et al.*, 2007; CVC, 2005).



**Figura 1.** Ubicación del complejo de páramos Chilí-Barragán.

Fuente: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH, 2012).



**Figura 2.** Diseño metodológico de toma de datos para evaluar la vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán.

Fuente: elaboración propia.

Para evaluar la vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán, se estimó el impacto potencial y la capacidad de adaptación del complejo de páramos (Cinner *et al.*, 2013; Marshall *et al.*, 2013; y Marshall *et al.*, 2010) siguiendo las cinco fases que se describen en la Figura 2.

### **I) Exposición-incrementos de temperatura 1981-2010**

Esta fase se dividió en dos etapas: Primera etapa: Organización, preparación de los datos y análisis descriptivo. Para realizar la climatología del complejo de páramos Chilí-Barragán se realizó el procesamiento de datos de las variables meteorológicas (temperatura del aire y precipitación) y se les aplicó las medidas de tendencia central, observaciones y medición. Las variables de temperatura del aire y precipitación se pueden obtener a partir de observaciones y mediciones en estaciones meteorológicas o climatológicas y con el uso de modelos meteorológicos o climatológicos, para este caso se optó por seleccionar las siguientes estaciones meteorológicas: Barragán y Cumarco en Valle del Cauca; El Edén y Calarcá en Quindío; Cajamarca, Cucuana, Demostración, San Antonio, Riomanso y Yerbabuena en el Tolima. Segunda etapa: Interpolación de los datos, las herramientas de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés) y Spline son consideradas como métodos de interpolación determinísticos, debido a que se basan directamente en los valores medidos circundantes o en fórmulas matemáticas especificadas que determinan la suavidad de la superficie resultante. Pero, también se encuentran los métodos geoestadísticos, de los cuales Kriging es un ejemplo, y este se fundamenta en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación (*Environmental Systems Research Institute —ESRI, 2015*). El método de Kriging se utilizó con la temperatura del aire y el de IDW con el de precipitación. La interpolación se realizó con los datos promedios anuales de la temperatura del aire máxima, mínima, media y precipitación, en el programa de ArcGIS 10.2, para lo cual se editó la tabla de atributos del archivo con formato shapefile tipo punto obtenido de la página del IDEAM o la digitalización de la ubicación de cada estación para generar la distribución espacial de la temperatura del aire y precipitación para el periodo 1981-2010.

### **II) Exposición-incrementos de temperatura 2011-2095**

En esta fase se utilizó la aplicación web MarkSim, realizada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) y su seccional el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), en la que se trabajó con datos de modelos globales climáticos, y estimó los incrementos de la temperatura del aire en el escenario de cambio climático RCP 6,0. La herramienta en línea MarkSim es una plataforma de generación de tiempo estocástica que tiene como objetivo ayudar a los usuarios con datos meteorológicos diarios en todo el mundo. MarkSim fue desarrollado en la

década de 1980 y 1990 para simular el clima de fuentes conocidas de datos climáticos mensuales de todo el mundo. Se dividió el mundo en 720 grupos de clima que eran todos distintos entre sí y dispuestos de un tercer modelo de Markov a los datos de precipitación. La simulación de datos de temperatura del aire se deriva de SIMMETEO (Geng *et al.*, 1988). Los incrementos de temperatura del aire se obtienen de restar los promedios multianuales del periodo 2011-2095 con los del periodo 1981-2010, operación que se realiza en la calculadora ráster (*Raster Calculator*) con los dos rásteres de los dos periodos y de la temperatura del aire respectiva.

### III) Sensibilidad e impacto potencial

La sensibilidad se estimó como las Zonas de Vida y transición de Holdridge que se perderían o ganarían como respuesta a los cambios en la precipitación o incrementos de temperatura del aire. Estas áreas de pérdida o ganancia se generaron para los periodos 1981-2010 y 2011-2095, tomando los resultados de la exposición (las interpolaciones). Se establecieron previamente los valores de clasificación que se obtuvieron principalmente de Gutiérrez (2001). El impacto potencial se determinó mediante el índice de impacto potencial que es una propuesta metodológica que se realizó en el transcurso de esta investigación, para determinarlo se toman los rásteres finales que resultan de los indicadores de incrementos de temperatura (IT) y movimientos de las zonas de vida de *Holdridge* (MZVH), y se realiza un promedio de estos en la calculadora ráster (*Raster Calculator*), teniendo en cuenta la siguiente fórmula (Ecuación 1):

$$IIP = \frac{(IT + MZVH)}{2} \quad (1)$$

Donde:

*IIP*: Índice de Impacto Potencial

*IT*: Incrementos de temperatura

*MZVH*: Movimiento de las zonas de vida de Holdridge.

El indicador de los incrementos de temperatura (IT), se obtuvo al realizar el promedio de los incrementos de la temperatura del aire media, máxima y mínima, en la calculadora ráster (*Raster Calculator*) como sigue (Ecuación 2):

$$IT = \frac{(ITMED + ITMAX + ITMIN)}{3} \quad (2)$$

Donde:

*ITMED*: Incremento de la temperatura media

*ITMAX*: Incremento de la temperatura máxima

*ITMIN*: Incremento de la temperatura mínima.

El indicador de los movimientos de las zonas de vida de Holdridge (MZVH) es el resultado de la intersección (Intersect) con los archivos tipo vector de las zonas de vida de Holdridge para el periodo 1981-2010 y para el periodo 2011-2095.

#### **IV) Potencial de recuperación**

En esta fase se demuestran las condiciones con las que cuenta el complejo para afrontar los impactos del cambio climático, por lo que se seleccionaron los indicadores de cambio de cobertura (1988-2014), de cambio de conectividad (1988-2014), suelos (órdenes), áreas protegidas y erosión. De acuerdo con lo reportado por Van der Hammen y colaboradores (2002), se considera fundamental evaluar la conectividad, pero también se debe analizar la influencia humana en los ecosistemas, las características azonales dadas por los suelos y las áreas protegidas que representan iniciativas de conservación y protección para los ecosistemas. Para la construcción de este índice se utilizó la metodología Delphi (consulta a expertos) Dalkey y Helmer (1963), la cual consiste en la selección de un grupo de expertos a los que se les pregunta su opinión sobre cuestiones referidas a diferentes acontecimientos, en este caso se les preguntó sobre el peso que le darían a cada indicador, el resultado fue el peso ponderado que aparece en la Ecuación 3:

$$IPR = 0,3 CE + 0,2 CC + 0,2 OS + 0,2 AP + 0,1 E \quad (3)$$

Donde:

*IPR*: Índice de potencial de recuperación

*CE*: Conectividad estructural

*CC*: Cambio de cobertura

*OS*: Órdenes de suelos

*AP*: Áreas protegidas

*E*: Erosión.

#### **V) Vulnerabilidad ecológica**

Se combinan los resultados obtenidos del impacto potencial (IIP) y el potencial de recuperación (IPR), jerarquizando los valores de la vulnerabilidad ecológica en muy baja, baja, media, alta y muy alta. El índice de vulnerabilidad ecológica es el componente principal para evaluar la vulnerabilidad ecológica, seguido de los índices de potencial de recuperación e impacto potencial, como se observa en la Ecuación 4.

$$IVE = (0,6 IIP) - (0,4 IPR) \quad (4)$$

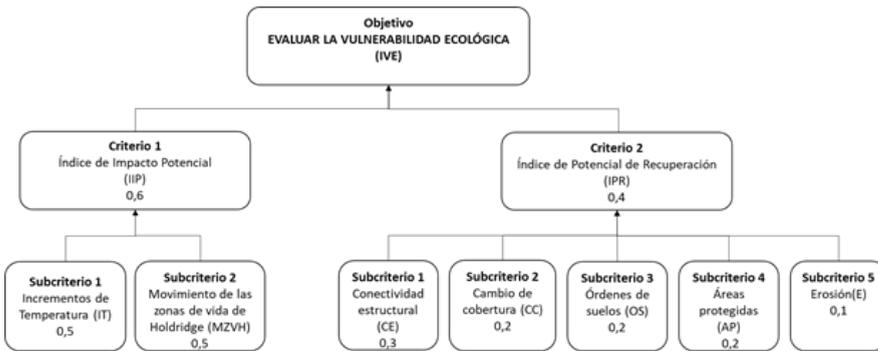
Donde:

*IVE*: Índice de Vulnerabilidad ecológica

*IIP*: Índice de impacto potencial

*IPR*: Índice de potencial de recuperación.

El método utilizado para evaluar la vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán fue un proceso analítico jerárquico, que es una técnica de decisión multicriterio que emplea dos etapas: la modelización y la valoración (Moreno, 2012). En la etapa de modelización, se elabora una estructura en la que se encuentran representados todos los aspectos relevantes del proceso de resolución, que pueden ser escenarios, interdependencias, elementos y factores. El proceso analítico jerárquico considera cuatro axiomas, el de homogeneidad, expectativas, jerarquías y sistemas con dependencias y reciprocidad. La principal estructura de modelización es la jerarquía. En el mayor nivel se pone la meta global, en los siguientes niveles se ponen los demás aspectos relevantes. En la etapa de valoración, se incluyen las preferencias y los juicios que se introducen en las matrices de comparaciones pareadas o de decisión (Saaty, 1980; Moreno, 2012). También, en la jerarquía se deben considerar dos conceptos, el de prioridades locales y el de prioridades globales. Para, las prioridades locales se pueden hablar de subcriterios, es decir los indicadores, y los criterios son los índices de potencial de recuperación e impacto potencial, y la prioridad global es evaluar la vulnerabilidad ecológica, cada uno de los componentes y subcomponentes tienen un valor de ponderación que representa la importancia de cada uno en el nivel superior (Figura 3).



**Figura 3.** Modelo de prioridades y valores de ponderación dados con el proceso analítico jerárquico para evaluar la vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán.

Fuente: elaboración propia.

## Resultados y discusión

### Exposición-incrementos de temperatura del aire

La temperatura del aire media en el complejo de páramos Chilí-Barragán se incrementó en promedio 0,79 °C para el periodo 1981-2010. El mayor

incremento de temperatura se registró en la estación de Riomanoso con 1,03 °C, seguida de la estación Cajamarca con 0,91 °C, de San Antonio Quinta con 0,84 °C y Barragán con 0,82 °C, mientras que los menores incrementos en temperatura se registraron en las estaciones del Edén (0,61 °C) y Demostración (0,63 °C). Estos resultados complementan estudios previos como el de Pabón en el 2012, quien encontró un calentamiento generalizado entre 0,1 °C-0,2 °C/decenio en diferentes regiones del territorio colombiano para el periodo 1960-2005. De igual manera, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2010) reportó un incremento de 0,13 °C por década para el periodo 1971-2000. Para el caso del complejo de páramos Chilí-Barragán el incremento de la temperatura del aire por decenio es de 0,26 °C para el periodo 1981-2010. Estos hallazgos tienen implicaciones sobre la fauna y flora de los ecosistemas de alta montaña, como el desplazamiento de especies que afecta la dinámica de estos ecosistemas (Roselli *et al.*, 2017), las interacciones planta-patógeno que están afectando las especies de frailejones (Cifuentes, 2017), así como también tiene implicaciones sobre los procesos ecosistémicos que dan lugar al suministro de servicios ecosistémicos (Hofstede *et al.*, 2014).

En prospectiva, la temperatura del aire media en el complejo de páramos Chilí-Barragán se incrementó en promedio 2,12 °C para el periodo 2011-2095 en el escenario RCP 6,0. El mayor incremento de temperatura se registró en la estación de Barragán con 2,94 °C, seguido de la estación del Edén con 2,67 °C y Demostración con 2,26 °C, mientras que los menores incrementos en temperatura se registraron en las estaciones de San Antonio Quinta (1,38 °C) y Cucuana (1,84 °C). Estos resultados son consistentes con los incrementos de temperatura reportado por el IPCC (2013) para el escenario RCP 6.0, quienes reportan un incremento de 2,2 °C para el periodo 2081-2100. De igual manera, para Colombia el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) estimaron un incremento de 1,0 °C para el periodo 2011-2040 con el ensamble de todos los escenarios del IPCC (IDEAM *et al.*, 2015). Otros escenarios para Colombia reportan incrementos de 2,4 °C para el periodo 2041-2070 (Ruiz, 2010), y de 3 °C y 4 °C para el periodo 2071-2100 (Pabón, 2012).

Las implicaciones de estos incrementos son variadas, en los páramos se encuentran especies que se han adaptado y han sincronizado su funcionamiento a las condiciones bioclimáticas, por lo que pueden ser alteradas por el cambio climático (Pabón y Hurtado, 2002). Conocer los incrementos de la temperatura del aire en prospectiva, permite tomar medidas de adaptación al cambio climático en zonas de alta montaña, por lo que el manejo, gestión y administración de estas áreas debe ser prioritario (Isch, 2012; Uribe, 2015). Por tal razón es imprescindible el conocimiento de las condiciones climáticas en las que funciona el páramo, la variación espacio-

temporal, las fluctuaciones extremas del clima y su incidencia en el ecosistema de páramo (Pabón y Hurtado, 2002).

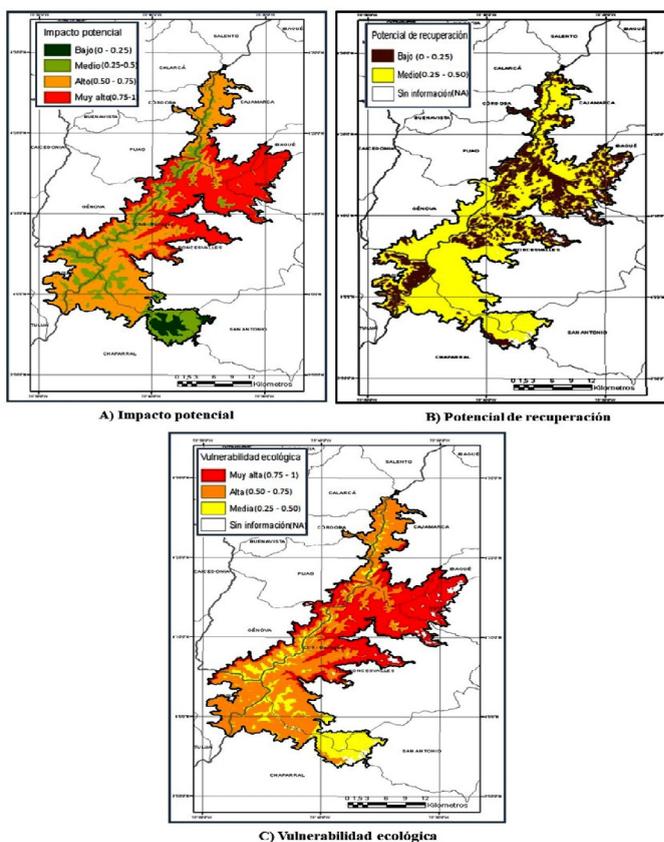
## Sensibilidad e impacto potencial

Las Zonas de Vida y Transiciones de Holdridge que perderían área para el periodo 2011-2095, debido al desplazamiento altitudinal por cambios en precipitación e incrementos de temperatura del aire, es la Zona de Vida de páramo pluvial subalpino (páramo) que perdería 52.381 hectáreas (96,86% del área que tiene para el periodo 1981-2010) y la Transición de Holdridge de páramo pluvial subalpino (Páramo) y tundra pluvial alpina (Superpáramo) que perdería 26.340 hectáreas (100% del área que tiene para el periodo 1981-2010) (Figura 4). Estos resultados complementan estudios previos que muestran que la zona de vida de Páramo Pluvial Subalpino pierde el 92% y tiene una conversión del 76% a Bosque Muy Húmedo Montano (bmh-M) (Gutiérrez, 2001). Por otro lado, Van der Hammen y colaboradores (2002) describieron como el cambio climático podría desaparecer áreas de Superpáramo en zonas con alturas menores a los 4.600 msnm y cómo el ascenso de las zonas bioclimáticas altoandinas estaría entre los 400 o 500 metros.

En el sentido opuesto, las Zonas de Vida y Transiciones de Holdridge que ganarían área para el periodo 2011-2095, es la Zona de Vida del bosque muy húmedo montano (subpáramo) que aparecería dentro del complejo de páramos con 34.119 hectáreas y la Transición de Holdridge de bosque muy húmedo montano (subpáramo), páramo pluvial subalpino (páramo) y bosque pluvial montano (subpáramo) con 44.601,8 hectáreas o 412 veces más de lo que tenía de área en el periodo 1981-2010. Como resultado de la ganancia de área de las zonas de vida y transiciones de Holdridge se presentará una sucesión o el recambio de las especies vegetales como lo menciona Cabrera y Ramírez (2014). De acuerdo con Flórez (2002), los pisos bioclimáticos responden a los cambios climáticos globales y cambian de posición altitudinal de acuerdo a las variaciones térmicas, por lo que los páramos se pueden considerar como eslabones que disminuyen o aumentan la superficie respecto a los cambios térmicos atmosféricos parecido a una catena.

El impacto potencial en el complejo de páramos Chile-Barragán es alto en su mayor parte, porque se presentaría en aproximadamente el 43,02% del área del complejo (Figura 4). El impacto potencial para los incrementos de temperatura es alto (62,66%) y para los movimientos de las Zonas de Vida y Transiciones de Holdridge es muy alto (72,66%). Se tiene también un impacto potencial muy alto en el 33,49% del área del complejo, un impacto potencial medio en el 19,92% del área del complejo y un impacto potencial muy bajo en el 3,57% del área del complejo de páramos. El impacto potencial alto responde a incrementos de la temperatura del aire que se encuentran entre 1,5 °C y 2 °C,

que de acuerdo con Van der Hammen y colaboradores (2002) es una situación que se le debe prestar atención en el menor tiempo posible. Lo anterior indica que en menos de cien años la vegetación del páramo propiamente dicho se ocuparía por la del subpáramo, lo que para Castaño (2002) es una traslocación, que consecuentemente afectaría los procesos ecológicos del ecosistema, y también como lo menciona el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP por sus siglas en inglés, 2005, 2007) se afecta la seguridad alimentaria, los suelos y el recurso hídrico, como consecuencia del incremento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos climáticos extremos.



**Figura 4.** Variaciones en el impacto potencial (A), potencial de recuperación (B) y vulnerabilidad ecológica (C) del complejo de páramos Chili-Barragán al incremento de temperatura en el escenario RCP 6,0.

### Potencial de recuperación

El potencial de recuperación del complejo de páramos Chili-Barragán es predominantemente medio y cubre una superficie de 56.040 hectáreas

(69,38%). El potencial de recuperación bajo cubre 22.010 hectáreas (27,25%) y las áreas que no tienen información de potencial de recuperación son 2.722 hectáreas (3,37%) (Figura 4). Para el IPCC (2007a) el potencial de recuperación se puede concebir como la capacidad de adaptación que tiene un determinado sistema ecológico con miras a ajustarse al cambio climático, pudiendo mitigar los posibles impactos, o también aprovechar las condiciones y consecuencias dadas por el cambio climático (IPCC, 2013; IDEAM *et al.*, 2015). En este sentido el complejo de páramos Chilí-Barragán cuenta con algunas condiciones como por ejemplo, abandono de áreas con sistemas agropecuarios, alto grado de endemismo, ubicación de dos importantes áreas protegidas como Proaves (<http://www.proaves.org/>) y Corporación Semillas de Agua (<https://semillasdeagua.org/>) que promueven la investigación y el conocimiento de los ecosistemas, para afrontar los posibles impactos potenciales de un cambio climático, por lo tanto se recomienda considerar la articulación de sectores (institucionales, privados y públicos), territorio y comunidades mediante proyectos y la implementación de políticas públicas (Uribe, 2015), que promuevan el potencial de recuperación del complejo de páramos Chilí-Barragán.

## Vulnerabilidad ecológica

El complejo de páramos Chilí-Barragán tiene una vulnerabilidad ecológica alta al incremento de temperatura en el escenario RCP 6,0. La vulnerabilidad ecológica alta se presenta en un área de 38.370 ha (47,51%), seguido de una vulnerabilidad ecológica muy alta en 25.850 ha (32,01%) y una vulnerabilidad ecológica media en 13.640 ha (16,89%) (Figura 4). Las áreas sin información de vulnerabilidad ecológica ocupan un 3,59% del área del complejo. La vulnerabilidad ecológica alta se distribuye en el centro del complejo, en la que se encuentra la mayor parte del bosque y del páramo propiamente dicho, las implicaciones de estos hallazgos van desde efectos sobre la biodiversidad (desplazamiento de las especies) y los servicios ecosistémicos que estos ecosistemas proporcionan a la sociedad (fuente de agua dulce, regulación hídrica, alimentos, importancia cultural, entre otros) (Anderson *et al.*, 2012), hasta la intensificación o expansión de la frontera agrícola a tierras altas, como por ejemplo lo que ha estado sucediendo con los cultivos de papa en Perú, donde el calentamiento regional del clima ha estado acompañado por un ascenso del cultivo de 300 m en los últimos 38 años (Hole *et al.*, 2012).

Además se encontró que la vulnerabilidad ecológica muy alta se reporta en la vertiente húmeda del complejo, que es la parte del departamento del Tolima cuyas condiciones presentan también un alto impacto potencial y un bajo potencial de recuperación, debido posiblemente al cambio de cobertura y la ausencia de áreas protegidas. La vulnerabilidad ecológica media se distribuye

en su mayor proporción hacia los bordes inferiores del complejo, cuyas condiciones son el relieve inclinado a escarpado, clima frío, y la presencia de flora y fauna típica del ecosistema páramo, además no se encuentran grandes cambios de cobertura, hay presencia de áreas protegidas y buena conectividad estructural, lo que brinda mayores capacidades para la adaptación al cambio climático (Murillo *et al.*, 2017).

## Conclusiones

Los ecosistemas de páramo, superpáramo y subpáramo del complejo de páramos Chilí-Barragán son vulnerables al cambio climático. La evaluación de la vulnerabilidad ecológica usada en esta investigación tiene en cuenta recomendaciones de expertos y es abordado desde un contexto socio-ecológico. Sin embargo, se recomienda también desarrollar este tipo de evaluaciones a diferentes niveles jerárquicos (poblaciones, comunidades, ecosistemas y paisaje) (Ippolito *et al.*, 2010). No obstante, la información generada aquí se hizo a nivel de paisaje y constituye información novedosa para la zona evaluada. La información generada puede usarse en el establecimiento de planes de manejo e incorporación de políticas públicas que contribuyan a salvaguardar los ecosistemas de páramo, superpáramo y subpáramo del complejo de páramos Chilí-Barragán y hacer una mezcla de conservación mediante áreas protegidas y planificación integral de uso sostenible del suelo (Hole *et al.*, 2012), que además podría apoyar el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (DNP *et al.*, 2012) para reducir la vulnerabilidad ecológica al cambio climático.

Los diferentes incrementos en la temperatura del aire demostraron la presencia de un cambio climático en el complejo de páramos Chilí-Barragán para el periodo considerado 1981-2010 que indican cambios que acentúan la exposición del complejo en el tiempo de referencia y ante futuros incrementos. Para el periodo 2011-2095 en el escenario RCP 6,0 la temperatura del aire aumentará en promedio 2 °C, tal incremento se presentaría de manera diferencial en el complejo debido a las particularidades del complejo de páramos como lo son la presencia de barlovento y sotavento, las diferentes coberturas, las diferencias del relieve y los cambios en los vientos. De igual manera, aunado a lo anterior, la desaparición de zonas de vida y transiciones de Holdridge provocarían un alto impacto del cambio climático en el complejo de páramos Chilí-Barragán para el periodo 1981-2095, como consecuencia se afectarían la flora y la fauna que se asocia con la respectiva zona de vida, los servicios ecosistémicos (ej. regulación hídrica), la población que depende del complejo, la transición bosque altoandino y páramo, la economía de la región y las culturas ancestrales.

Por otro lado, el potencial de recuperación medio del complejo de páramos Chilí-Barragán sugiere que el complejo carece de las condiciones que faciliten adaptarse y mitigar los impactos potenciales del cambio climático. Sin embargo, hay posibilidades de incrementar el potencial de recuperación del complejo de páramos, para lo que se requiere el fortalecimiento del vínculo del ser humano con el ecosistema páramo, y el trabajo interdisciplinario entre las instituciones, la academia y la comunidad. Pese a que la vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán es alta, el complejo presenta características como alto grado de endemismo, clima cambiante, relieve variado, ubicación geoestratégica en la cordillera central y su participación en las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca que podrían proporcionarle también capacidad de adaptación o potencial de recuperación. Por tal razón es importante que para el complejo de páramos Chilí-Barragán se planeen y ejecuten políticas públicas, programas y proyectos de restauración ecológica, estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático.

## Referencias

- Anderson, E. P., Marengo, J. A., Villalba, R., Halloy, S. R., Young, B. E., Cordero, D. y Ruiz Carrascal, D. (2012). Consecuencias del cambio climático en los ecosistemas y servicios ecosistémicos de los Andes Tropicales. *Cambio climático y biodiversidad en los Andes Tropicales*, 426.
- Cabrera, M. y Ramírez, W. (Eds.) (2014). *Restauración ecológica de los páramos de Colombia. Transformación y herramientas para su conservación*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH): Bogotá, D.C. Colombia, 296 pp.
- Castaño, C. (2002). Colombia alto andina y la significancia ambiental del bioma páramo en el contexto de los Andes tropicales: una aproximación a los efectos de un tensor adicional por el Cambio Climático Global (Global Climatic Tensor): 27-51(en) IDEAM (2002). Páramos y ecosistemas alto andinos de Colombia en Condición HotSpot & Global Climatic Tensor. IDEAM (Instituto de Meteorología, Hidrología y Estudios Ambientales), Bogotá, Colombia.
- Cifuentes, J. M. (2017). *Relación de variables climáticas y de uso de suelo, con afectaciones presentes en frailejones del Páramo de Chingaza, Colombia* [Tesis de maestría, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales].
- Cinner, J. E., Huchery, C., Darling, E. S., Humphries, A. T., Graham, N. A. J., Hicks, C. C., Marshall, N. & McClanahan, T. R. (2013). Evaluating social and ecological vulnerability of coral reef fisheries to climate change. *PLoS ONE*, 8 (9), 1-12.
- CVC (2005). *Páramos de las Cordilleras Central y Occidental de Colombia. Informe Región del Grupo de Trabajo de Páramos Centro Occidente de Colombia-GTP-CO*. Dirección Técnica Ambiental. Santiago de Cali, 300 pp.
- Dalkey, N., y Helmer, O. (1963). An experimental application of the Delphi method to the use of experts. *Management Science*, 9(3), 458-467.

- DNP, MADS, IDEAM y UNGRD (2012). *ABC: Adaptación bases conceptuales. Marco conceptual y lineamientos Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC)*, 80 pp.
- ESRI (2015). *Cómo funciona Kriging*. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>
- Flórez, A. (2002). Movilidad altitudinal de páramos y glaciares en los Andes colombianos.. En: MMA, CAR, IDEAM y C. I. Colombia. *Memorias Congreso Mundial de Páramos. Tomo I* (pp. 80-97), Bogotá.
- Geng, S., Auburn, J., Brandstetter, E. y Li, B. (1988). A Program to Simulate Meteorological Variables. Documentation for SIMMETEO. (Agronomy Report No. 204). University of California: Davis Crop Extension.
- Gutiérrez, H.J. (2001). *Aproximación a un modelo para la evaluación de la vulnerabilidad de las coberturas vegetales de Colombia ante un posible cambio climático utilizando SIG* [Tesis de grado para optar al título de magíster, Instituto de Estudios Ambientales IDEA], Universidad Nacional de Colombia.
- Hofstede, Robert et. al. (2014). *Los páramos andinos. ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. UICN, Quito, Ecuador.
- Hole, D. G., Young, K.R, Seimon, A., Gómez, C., Hoffman, D., Schutze, K., Sánchez, S., Muchoney, D., Grau, H. R. y Ramirez, E. (2012). Manejo adaptativo para la conservación de la biodiversidad frente al cambio climático, perspectiva en los Andes tropicales. En Herzog, S.K., Martinez, R., Jørgensen, P. M. y Tiessen, H. *Cambio climático y biodiversidad en los Andes tropicales* (23-57). Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), Sao José dos Campos, y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente (SCOPE), París.
- IAvH (2012). Proyecto: Actualización del Atlas de Páramos de Colombia. Complejo de Páramos Chili - Barragán Distrito Viejo Caldas - Tolima Sector Cordillera Cental CC-CT-CBG. Convenio Interadministrativo de Asociación 11-103, Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander von Humboldt y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Escala 1:100.000. Bogotá D.C. Colombia. [http://www.humboldt.org.co/images/Atlas%20de%20paramos/23CC-CT-CBG\(Chili-Barragan\).pdf](http://www.humboldt.org.co/images/Atlas%20de%20paramos/23CC-CT-CBG(Chili-Barragan).pdf).
- IDEAM (2002). *Páramos y ecosistemas alto andinos de Colombia en Condición HotSpot & Global Climatic Tensor*. Bogotá, Colombia.
- IDEAM (2010). *Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Bogotá, Colombia, 448 pp.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, Cancillería (2015). *Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100. Herramientas científicas para la toma de decisiones*. Enfoque Nacional Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.
- IPCC (2007a). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press: Cambridge, UK.

- IPCC (2007b). Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J., and Hanson, C.E. (Eds). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability (AR4 WG2)*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- Ippolito, A. S., Sala, J. H., Faber, M. V. (2010). Ecological vulnerability analysis: a river basin case study. *Sci Total Environ*, 408 (18), 3880-3890.
- Isch, E. (2012). *El cambio climático y la gestión de páramos*. Quito, Ecuador: Imprimax.
- Marshall, N. A., Marshall, P. A., Tamelander, J., Obura, D., Malleret-King, D. and Cinner, J.E. (2010). *A framework for social adaptation to climate change: sustaining tropical coastal communities and industries*. GlandSwitzerland: IUCN, 36 pp.
- Marshall, N., Tobin, R., Marshall, P., Gooch, M. and Hobday, A. (2013). Social vulnerability of marine resource users to extreme weather events. *Ecosystems*.
- MAVDT, IDEAM and PNUD (2001). Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Bogotá, Colombia.
- Morales, M., Otero, J., Van der Hammen, T., Torres, A., Cadena, C., Pedraza, C., Rodríguez, N., Franco, C., Betancourth, J. C., Olaya, E., Posada, E. & Cárdenas, L. (2007). *Atlas de páramos de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., 208 pp.
- Moreno Jiménez, J. M. (2012). *El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones*. Departamento de Métodos Estadísticos. Facultad de Económicas. Universidad de Zaragoza, 33 pp.
- Murillo, L. G., Pabón Restrepo, G. A., Pérez Álvarez, P. A., Rojas Laserna, M., and Suárez Castaño, R. (2017). *Política Nacional de cambio climático: documento para tomadores de decisiones*.
- Pabón, J. D. (2012). Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36 (139), 261-278.
- Pabón, J. D. and Hurtado, G. (2002). La variabilidad y el cambio climático y su efecto en los biomas de páramo. En Ange Jaramillo, C., Castaño Uribe, C., Arjona Hincapié, F., Rodríguez, J.V. y Durán, C.L. *Memorias del Congreso Mundial de Páramos. Tomo 1*. Ministerio de Medio Ambiente, IDEAM, Conservación Internacional, Bogotá, Colombia, pp. 98-103.
- Rosselli, L., Stiles, F. G. y Camargo, P. A. (2017). Changes in the avifauna in a high Andean cloud forest in Colombia over a 24-year period. *Journal of Field Ornithology*, 88 (3), 211-228.
- Ruiz, F. (2010). *Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (panorama*

- 2011-2100). Nota Técnica de IDEAM, No. IDEAM- METEO/005-2010. Bogotá D.C., 91 pp.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill: New York.
- Steffen, W., Persson, Å., Deutsch, L., Zalasiewicz, J., Williams, M., Richardson, K. and Molina, M. (2011). The Anthropocene: From global change to planetary stewardship. *Ambio*, 40 (7), 739-761.
- UNEP (2005). *Climate change: processes, characteristics and threats*. UNEP/GRID-Arendal Maps and Graphics Library. [http://maps.grida.no/go/graphic/climate\\_change\\_processes\\_characteristics\\_and\\_threats](http://maps.grida.no/go/graphic/climate_change_processes_characteristics_and_threats)
- UNEP (2007). *Insuring for sustainability: Why and how the leaders are doing it*. The inaugural report of the Insurance Working Group of the United Nations Environment Programme Finance Initiative. May 2007. [http://www.unepfi.org/fileadmin/documents/insuring\\_for\\_sustainability.pdf](http://www.unepfi.org/fileadmin/documents/insuring_for_sustainability.pdf)
- Uribe Botero, E. (2015). *El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina*. Unidad de Cambio Climático de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Programa EUROCLIMA (CEC/14/001). Naciones Unidas, Santiago
- Van der Hammen, T., Pabón, J. D., Gutiérrez, H. and Alarcón, J. C. (2002). El Cambio Global y los Ecosistemas de Alta Montaña de Colombia (163-209). E, IDEAM, *Páramos y ecosistemas alto andinos de Colombia en Condición HotSpot & Global Climatic Tensor*. IDEAM, Colombia.





# Gradiente de vulnerabilidad socioambiental en el Partido de Quilmes, Provincia de Buenos Aires, Argentina

## Gradient of socio-environmental vulnerability in Quilmes Municipality, Province of Buenos Aires, Argentina

Pablo Lacabana<sup>1</sup>

Fecha de recibido: 23 de mayo de 2021

Fecha de aceptado: 15 de noviembre de 2021

### Resumen

El concepto de “adaptación al cambio climático” nos remite a posibles actuaciones emprendidas anticipadamente para reducir la vulnerabilidad de un sistema, de una ciudad o de un grupo social. Para generar capacidad adaptativa, es decir, poder evitar pérdidas y acelerar la recuperación tras cualquier impacto climático, resulta fundamental, entre otras acciones, contar con información territorial. Detectar a tiempo las vulnerabilidades como fragmentaciones territoriales producidas por la desigualdad socioambiental, pueden hacer la diferencia para una eficiente gestión del riesgo. Es por ello que este trabajo propone un análisis a partir de la propuesta de aplicación de un índice de vulnerabilidad socioambiental para el partido de Quilmes con el propósito de obtener metadatos ambientales necesarios para posibles políticas de adaptación y resiliencia al cambio climático. Si bien el índice presenta algunas limitaciones es un buen indicador de los diferentes

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Quilmes, Argentina. XLVII Curso Internacional de Geografía Aplicada 2020, Centro Panamericano de Estudios e Investigaciones Geográficas (CEPEIGE). Correo electrónico: [acardus123@gmail.com](mailto:acardus123@gmail.com).

escenarios ambientales y sociales presentes en el municipio de Quilmes. Esta heterogeneidad social y ambiental está presente incluso dentro de las villas que son los lugares más vulnerables. Las variables con más peso son hogares no conectados a la red de cloacas, hogares con insuficiente calidad de servicios, hogares sin computadoras, hogares sin gas y hogares con insuficiente calidad constructiva.

Palabras clave: *vulnerabilidad, socioambiental, villas, radios censales, Quilmes.*

## **Abstract**

The concept of "adaptation to climate change" refers to possible actions taken in advance to reduce the vulnerability of a system, a city or a social group. In order to generate adaptive capacity, that is, to be able to avoid losses and accelerate recovery after any climatic impact, it is essential, among other actions, to have territorial information. Detecting vulnerabilities in time, such as territorial fragmentations produced by socio-environmental inequality, can make a difference for efficient risk management. For this reason, this work proposes an analysis based on the proposal to apply a socio-environmental vulnerability index for the Quilmes district in order to obtain environmental metadata necessary for possible adaptation and resilience policies to climate change. Although the index has some limitations, it is a good indicator of the different environmental and social scenarios present in the municipality of Quilmes. This social and environmental heterogeneity is present even within the villages, which are the most vulnerable places. The variables with the most weight are households not connected to the sewer network, households with insufficient quality of services, households without computers, households without gas, and households with insufficient construction quality.

Key words: *vulnerability, socio-environmental, villages, censals ratios, Quilmes.*

## **Introducción**

El riesgo al que se expone la sociedad actual es complejo y multicausal: hace un par de décadas se hacía hincapié en investigar riesgos relacionados a catástrofes naturales extremas. Actualmente, se reconoce que la población es vulnerable a diversos fenómenos que pueden originar cambios principalmente negativos en la vida cotidiana; se trata no solo de eventos naturales (inducidos o no), sino también de índole cultural, territorial, social, sanitaria y económica. Los estudios indican que los niveles de riesgo han aumentado, debido a la forma en que la sociedad ocupa y utiliza territorios con elevados riesgos ambientales y servicios con grandes deficiencias o inexistentes (Olcina Cantos, 2008).

Aunado a esto, el concepto de “adaptación al cambio climático” nos remite a posibles acciones iniciadas anticipadamente para disminuir la vulnerabilidad de un sistema ante los efectos del mencionado cambio. Según el Informe mundial sobre asentamientos humanos, elaborado por el Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat, 2011):

Los estudios sobre los impactos de fenómenos climatológicos extremos en zonas urbanas muestran que la mayoría de los que han muerto o han resultado heridos y que han perdido gran parte o todos sus bienes proceden de grupos de bajos ingresos. En un episodio de una catástrofe natural, las viviendas de bajos ingresos a menudo carecen de los recursos para mitigar el daño producido mediante la asistencia sanitaria, las reparaciones estructurales, la comunicación, los alimentos y el agua (p. 37).

Para generar capacidad adaptativa, es decir poder evitar pérdidas y acelerar la recuperación tras cualquier impacto climático, resulta fundamental, entre otras acciones, contar con información territorial. Detectar a tiempo las vulnerabilidades como fragmentaciones territoriales producidas por la desigualdad socioambiental, pueden hacer la diferencia para una eficiente gestión del riesgo. Es por ello que este trabajo propone un análisis a partir de la propuesta de aplicación del índice de vulnerabilidad socioambiental (IVSA) para el partido de Quilmes,<sup>1</sup> con el propósito de obtener meta datos ambientales necesarios para posibles políticas de adaptación y resiliencia al cambio climático.

Es importante señalar que la vulnerabilidad está asociada al concepto de “riesgo” y a los desastres que se desencadenan en América Latina como resultados de complejos e incompletos modelos de gestión económica-social del territorio. En este sentido, los aportes teóricos como técnicos han sido diversos en la escala internacional: Arroyo y Zusman (2011), Beck (1993, 2006), Giddens *et al.* (1996), Lavell (1996, 1999, 2002), Wilches Chaux (1993), Kaztman (2000), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2014, 2017), Olcina Cantos (2008) entre otros. En Argentina también se ha avanzado en esta línea: Natenzon (1995), Natenzon y Ríos (2015), Herzer y Gurevich (1996), Carballo (2001), Herzer (2011), Pereyra, A. (2017), Carballo y Lacabana (2018), Cardoso (2017), Lacabana *et al.* (2017), Massera (2020), Con *et al.* (2011), Viand y Briones (2015), por nombrar algunos aportes.

<sup>1</sup> En Argentina se han realizado contribuciones como el Índice de Desarrollo Sostenible Provincial (IDSP) que nos permite contextualizar en el territorio las heterogeneidades en materia de sostenibilidad. Este índice coloca a la Provincia de Buenos Aires en el puesto 9 con un IDSP de 0,556 bastante más bajo que el de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires que llega hasta 0,792 (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2017). Esto nos coloca en un marco referencial donde la inclusión social sigue siendo el principal desafío para la provincia. En este caso, Quilmes representa un claro testimonio de estos procesos de escala provincial, reflejado también a escala municipal. (PNUD, 2014).

Todos estos avances han construido enfoques teóricos, críticos, que hoy nos permiten avanzar en un análisis empírico que demanda información indispensable para la adaptación local al cambio climático. En esta línea de ideas, se parte de diversos antecedentes y aportes sobre el desarrollo y espacialización de un índice de vulnerabilidad que permite una visión territorial de las amenazas de vulnerabilidad en términos cuali-cuantitativos en la escala local.

A partir de estos postulados generales se elaboró un IVSA que permite una visión territorial de las amenazas y vulnerabilidad en términos cuali-cuantitativos en la escala local. Para ello se toma el caso del Partido de Quilmes, Provincia de Buenos Aires, Argentina, a través de los sistemas de información geográfica (SIG), no solo como herramienta sino como estrategia para el análisis material del territorio, su sociedad, los efectos que tiene esta última sobre el ambiente y como se revierten estos efectos sobre los asentamientos humanos.

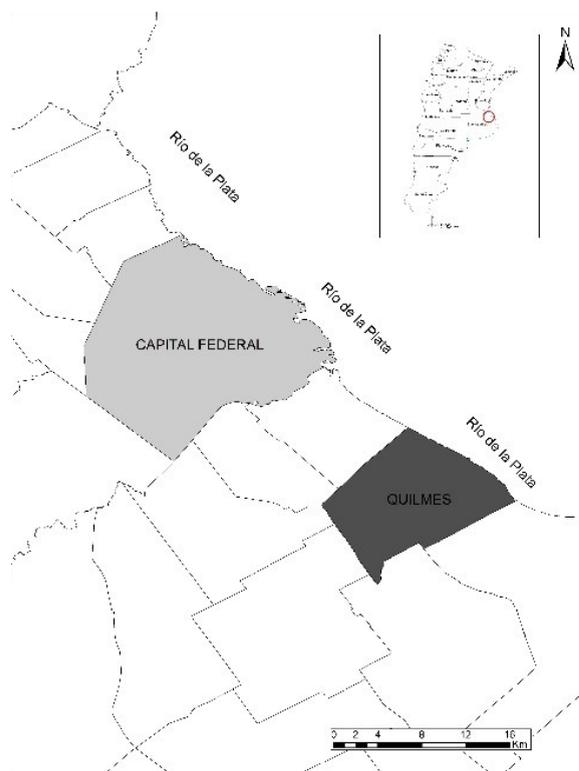
Los resultados permiten visibilizar la vulnerabilidad en la escala ambiental local, y en especial identificar la desigual criticidad territorial. En esta propuesta, los SIG tienen una doble función, tanto metodológica como técnica, ya que un SIG no solo es una valiosa herramienta de representación visual de información sino que es un estrategia para el análisis material del territorio al definir su alcance y desarrollo técnico de abordaje de la realidad socioambiental hacia la construcción de una capacidad adaptativa al cambio climático.

## Área de estudio

El partido de Quilmes es uno de los 135 municipios que integran la Provincia de Buenos Aires (Figura 1). Es un municipio que se encuentra al sur de la Ciudad de Buenos Aires y es parte de lo que se considera el Gran Buenos Aires a pesar de no ser limítrofe con la ciudad. Tiene una superficie de 94 km<sup>2</sup> aproximadamente y una población superior a los 580 mil habitantes.

Quilmes está contenido en un clima de tipo templado pampeano. Las condiciones climáticas se ven modificadas por la extendida urbanización del partido. Su temperatura promedio es de 25 °C en verano y de 11 °C en invierno, con máximas de 35° y mínimas de -2° respectivamente. Las precipitaciones son de unos 1 000 mm anuales, promedio. Por otra parte, el sustento físico del territorio tiene particularidades que comparten la ribera del Río del Plata y su transición hacia las formaciones marginales de la pampa ondulada. De forma paralela a la ribera platense aparece de forma irregular y gradual la barranca muerta, al pie de esta formación se extiende un amplio bañado sobre la costa del Río de la Plata. Es una franja de un ancho que oscila entre dos y tres kilómetros. Sobre esa planicie surgen elevaciones suavemente onduladas

como consecuencia de los rellenos sanitarios introducidos durante la década de los ochenta, actualmente intervenida por diversos usos del suelo.

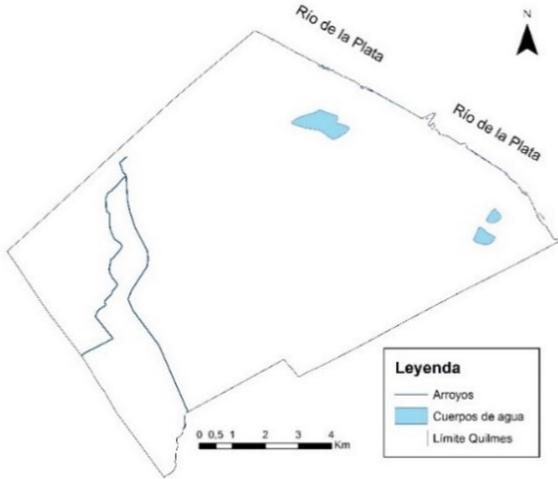


**Figura 1.** Ubicación relativa del partido de Quilmes.

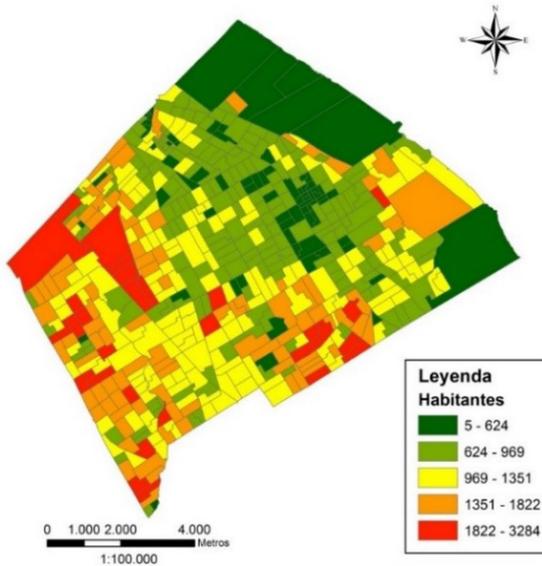
Fuente: elaboración propia con base en los archivos de forma del Instituto Geográfico Nacional (IGN). <https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>

En general, los cauces de los arroyos, lagunas, y micro cuencas, se comportan bajo la dinámica hídrica del Río de la Plata. La hidrografía se caracteriza por cauces de poca hondura, de tipo llanura, con escasa pendiente de drenaje, lechos barrosos, contornos inundables, aguas frecuentemente turbias y mansas. Que con precipitaciones intensas se producen desbordes de los arroyos e inundaciones que afectan la trama urbana (Figura 2). Encontramos un sistema de anegamiento de lento escurrimiento, sobre todo en las zonas más bajas o en exhumedales, procesos que se intensifican por las anárquicas ocupaciones del suelo. El agua superficial se caracteriza por una alta contaminación industrial y de aguas servidas. Por la falta de infraestructura y servicios adecuados, muchas veces los arroyos se comportan como contenedores espontáneos de residuos domiciliarios.

De manera rápida podemos observar que los radios censales que están más cerca del Río de la Plata son los de menor número de habitantes (Figura 3), mientras que los de mayor número de habitantes coinciden en muchos casos con



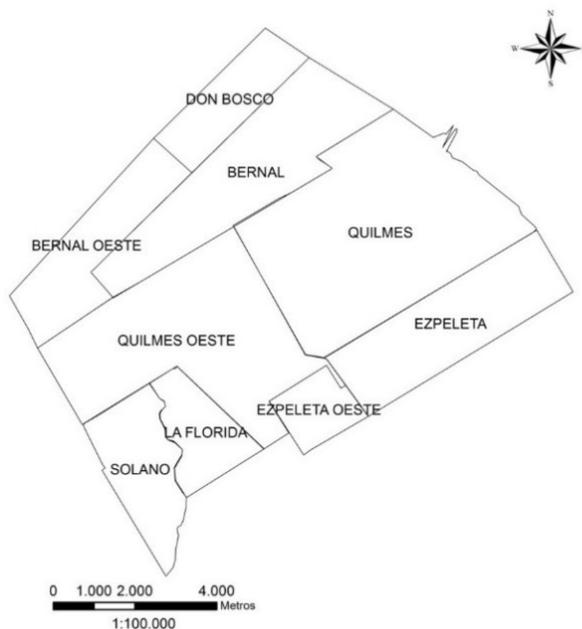
**Figura 2.** Hidrografía del partido de Quilmes.  
Fuente: elaboración propia con base en el IGN. <https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>



**Figura 3.** Distribución y cantidad de habitantes del partido de Quilmes.  
Fuente: elaboración propia con base en datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina (INDEC, 2010) y el IGN.

los lugares donde se encuentran las villas y asentamientos (Figuras 3 y 5). Estos últimos, generalmente, surgieron con el auge industrial de mediados del siglo XX y se localizan en una trama compleja de desindustrialización y tierras fiscales cercanas a arroyos o en zonas anegables. La densidad poblacional del partido de Quilmes es de 6.334,27 hab./km<sup>2</sup>. En los radios censales la densidad mínima es de 1,55 hab./km<sup>2</sup> y la máxima de 46.180,30 hab./km<sup>2</sup> con una media de 9.629,75 hab./km<sup>2</sup> y una desviación estándar de 5.646,96 hab./km<sup>2</sup>. Al igual que en el caso anterior los radios más grandes se encuentran cerca del Río de la Plata.

En la Figura 4 se observan las zonas en las que está dividido el partido de Quilmes, la menor superficie la tiene la zona de Ezpeleta Oeste con 3,37 km<sup>2</sup> y la mayor Quilmes con 29,11 km<sup>2</sup>, con una media de 12,4 km<sup>2</sup> y una desviación estándar de 8,21 km<sup>2</sup>.



**Figura 4.** Zonas del partido de Quilmes.

Fuente: elaboración propia con base en los archivos de forma del IGN. <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>

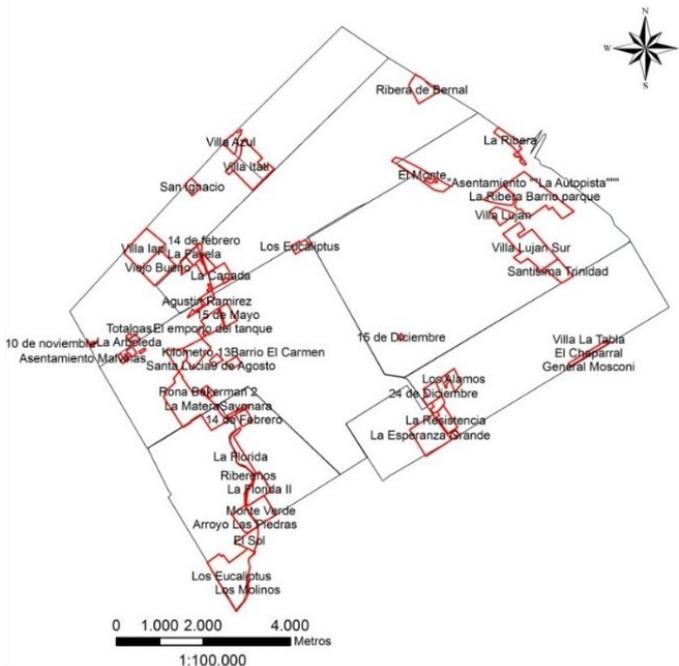
La Tabla 1 indica que el menor número de habitantes lo tiene Don Bosco (23 458) y el mayor número Quilmes Oeste (133 980) con una media de 64 771,56 habitantes y una desviación estándar de 41 584,77 habitantes. Por otra parte la densidad poblacional varía entre 2 323,45 hab./km<sup>2</sup> (Bernal) y 9 508,74 hab./km<sup>2</sup> (Bernal Oeste) con una media de 5 892,36 hab./km<sup>2</sup> y una desviación estándar de 2 214,93 hab./km<sup>2</sup>.

**Tabla 1.** Densidad poblacional de las áreas del partido de Quilmes

Nombre	Habitantes	Área (km <sup>2</sup> )	Hab/km <sup>2</sup>
Don Bosco	23 458	6,00	3 909,67
Bernal oeste	85 959	9,04	9 508,74
Bernal	37 547	16,16	2 323,45
Ezpeleta	55 274	12,89	4 288,13
Ezpeleta oeste	26 256	3,37	7 791,10
Quilmes	125 373	29,11	4 306,87
Quilmes oeste	133 980	22,49	5 957,31
La Florida	35 135	5,11	6 875,73
Solano	59 962	7,43	8 070,26

**Fuente:** elaboración propia con base en el INDEC (2010) y el IGN.

Un aspecto resaltante del partido de Quilmes es la cantidad de personas que viven, en el elevado número de villas y asentamientos (barrios pobres) de este municipio. Algunos estudios indican que más del 20% de la población habita este tipo de territorios (Lacabana *et al.*, 2017) (Figura 5).



**Figura 5.** Villas del partido de Quilmes.

Fuente: elaboración propia con base en datos de la Fundación Techo (2016).

En el partido de Quilmes existen 55 villas con superficies que varían de 0,17 ha a 88,87 ha para un total de 954,72 ha, lo que representa el 10,2% de la superficie del partido de Quilmes con una media de 15,66 ha y una desviación estándar de 19,59 ha. Las villas se encuentran en su mayoría a los lados de los arroyos que cruzan el partido de Quilmes y a los lados de la autopista Buenos Aires-La Plata. El número de habitantes en las villas varía de 20 en la villa 10 de noviembre ubicada en Bernal Oeste, a 13 000 habitantes en Villa Itatí ubicada en Don Bosco, para un total de 43 611 habitantes con una media de 605,71 y una desviación estándar de 1 552,79 habitantes.

## Metodología

La metodología intentará superar los desafíos técnicos y reflejar los comportamientos más relevantes en función de la información estadística bajo la expresión de síntesis cartográficas, mediante los SIG. La cartografía construida a partir del índice nos plantea la necesidad de descifrar desde un lenguaje territorial y urbano, los diversos niveles de criticidad socioambiental. Pero también nos ofrece futuros escenarios posibles de intervención, según los niveles de vulnerabilidad social, frente a la evidencia del avance del cambio climático como cambio global.

El IVSA pretende ser un índice integrador, dado que abarca diferentes aspectos de las sociedades y de los individuos en particular, al llevarlo a la escala de radio censal. Incluye dimensiones educativas, demográficas (relativas al ciclo de vida), condiciones de vivienda, de infraestructura, equipamientos y servicios, entre otros. Esta síntesis y sistematización de la información de la realidad social permite una necesaria complejidad de los resultados, relevantes en el momento de la toma de decisiones. Las variables consideradas representativas de los factores sociales y ambientales son adecuadas para los casos de este estudio y del municipio en estudio en particular.

Para establecer el IVSA del partido de Quilmes se utilizaron 17 variables por radio censal tomadas del INDEC y del IGN, con algunos datos complementarios ofrecidos por la municipalidad de Quilmes.

Para la generación del índice se utilizó “La obtención de puntajes de clasificación espacial, una metodología de análisis multivariado simple que se basa en la estandarización de variables con la finalidad de obtener un valor resumen que se mapea y del cual se analiza su distribución espacial” (Buzai, 2014, p. 165).

El procedimiento consta de la estandarización de los datos de cada variable al obtener el porcentaje de la población o el hogar respecto al total del radio. Se convierten los valores originales a un rango que va del 0 a 1, volviéndolos perfectamente comparables independientemente del tipo de variable. Para

este índice todas las variables se trataron como indicadores de costo (que expresan situaciones desfavorables por ejemplo el analfabetismo), los valores estandarizados de las diecisiete variables tomadas del INDEC y del IGN se compararon entre sí, promediando los porcentajes y obteniendo el índice para cada radio censal. Luego se dividieron los valores en quintiles y los valores se llevaron a las siguientes categorías que se pueden ver en la leyenda de cada uno de los mapas: Muy Alto, Alto, Medio, Bajo y Muy Bajo, expresando así el índice de manera cuali-cuantitativa (Tabla 2).

**Tabla 2.** Categorías del IVSA

<i>Categorías</i>	<i>Descripción del IVSA</i>
Muy Alto	Expresa la situación más crítica cuando el promedio de los indicadores da valores por encima del 50%, por lo que hay que tomar medidas rápidas para resolver los problemas dentro de un asentamiento o radio censal.
Alto	Se identifica una clara situación de peligro cuando la situación, sin ser crítica, es lo suficientemente compleja para ser abordada, ya que hay un deterioro importante de los niveles de calidad de vida de la población.
Medio	La población representa datos de relativa homogeneidad hacia un grado vulnerable cuando la mejor evidencia disponible indica que enfrenta un moderado riesgo de deterioro de los niveles de calidad de vida poblacional a mediano plazo.
Bajo	Los niveles de calidad de vida de la población están casi amenazados cuando el promedio de los indicadores no ha alcanzado las categorías anteriores pero se ve en riesgo de llegar a estar vulnerable si no se toman medidas en el mediano plazo.
Muy Bajo	Finalmente los niveles de calidad de vida de la población están en preocupación menor cuando el promedio de los indicadores demuestra que el radio censal no tiene una amenaza ambiental o social.

**Fuente:** Elaboración propia. El grado de criticidad es análogo a las categorías de extinción de la Unidad Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).

En una fase se generó un primer índice social donde se toman en cuenta solo las variables del INDEC y del IGN. Y luego, en otra fase, se desarrolló el índice ambiental con las variables de incidencia ambiental sobre las poblaciones. Este último, es un índice que va de 0 a 0,4, el cual se pondera desde la presencia o ausencia en el radio censal; para, finalmente, obtener el

IVSA, entendiendo que este puede llegar hasta 1,4 en el caso de que el radio censal tenga el máximo valor de todas las variables mencionadas, tanto las sociales como las ambientales, dado que el IVSA es la suma del llamado índice de vulnerabilidad social (IVS) que va de 0 a 1; y el índice de vulnerabilidad ambiental (IVA). En relación a este último índice, tendrá un valor de 0,4 cuando en el mismo radio censal contenga: industrias, basurales, inundaciones y esté cercano a las autopistas.

En cada una de las variables seleccionadas (servicios de saneamiento e higiene, desnutrición, pobreza, desempleo, nivel educativo, necesidades básicas insatisfechas [NBI], entre los principales) fueron atendidas e incorporadas centralmente, según los datos censales del INDEC (2010).

Las variables sociales son las siguientes: población de 0 a 14 años y de 65 años y más, analfabetos (población mayor de 4 años que no sabe leer ni escribir), población de 15 años y más que cursa el nivel primario, hogares con agua que no proviene de la red pública, hogares no conectados a la red de cloacas, hogares sin gas, hogares sin computadoras, hogares sin celular, hogares sin heladera, hogares con NBI, hogares habitados por personas que no son propietarios, viviendas tipo rancho, viviendas con insuficiente calidad constructiva, hogares con dos o más personas por cuarto, hogares con insuficiente calidad de servicios y hogares con personas desocupadas.

Se justifica la consideración de la variable de la población pasiva, que está representada por la población de menores de 15 años y de 65 años y más; debido a que se trata de personas que en la mayoría de los casos dependen de otros ante la ocurrencia de fenómenos adversos (como crisis económicas, sanitarias, enfermedades epidémicas, desnutrición, inundaciones, etcétera). En la vejez, la pobreza suele ser crónica, puesto que la falta de oportunidades y seguridad económica en anteriores etapas de la vida convergen en los últimos años de las personas. La acumulación de desventajas durante la juventud también hace que la pobreza se herede de una generación a otra (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2014).

Por su parte, la variable de población de 15 años y más que no sabe leer ni escribir, representa claramente una situación desfavorable, pues es reflejo de las carencias de las herramientas que brinda la educación al individuo para formar parte de la vida en sociedad y la integración al mercado laboral formal, entre otras. Similar es el caso de la población de 15 años y más que cursa nivel educativo primario, dado que estarían en condiciones desfavorables que incrementan los niveles de vulnerabilidad, dado que tendrían bajos niveles educativos y una situación de vulnerabilidad social latente.

El desempleo es un problema recurrente en las sociedades latinoamericanas. Cuantas más personas desocupadas hay en un hogar, mayor riesgo de caer bajo la línea de pobreza tienen, con todo lo que eso

implica, por esta razón se tomó en cuenta la variable de hogares con personas desocupadas.

En la dimensión servicios domésticos, se definieron tres variables: 1) hogares con agua procedente de la red pública, dado que contar con aprovisionamiento de agua por cañería dentro de la vivienda no solo es beneficioso, sino necesario para el logro de una buena calidad sanitaria de la población; 2) hogares con descarga de inodoro a red pública, que dan cuenta de condiciones sanitarias favorables en cuanto al tratamiento de las aguas servidas, previniendo la proliferación de enfermedades derivadas de un ambiente contaminado con este tipo de residuos; y 3) la referida a un servicio de diferente naturaleza como lo es el gas de red, fundamental, especialmente en invierno cuando muchos hogares que carecen de él enfrentan dificultades como altos costos de otros combustibles.

En cuanto a las variables de infraestructura, los hogares habitados por personas no propietarias estarían en una situación de inestabilidad y de indefensión ante un derecho primordial de la persona como es la vivienda, teniendo muchas veces que caer en situaciones de habitabilidad irregular o precaria, casi parecido es el de las viviendas particulares tipo rancho, generalmente con paredes de adobe, piso de tierra y techo de chapa o paja e insuficiente calidad constructiva, conformada a partir de la calidad de los materiales con los que está construida la vivienda; la insuficiente calidad refiere a aquellas que no disponen de materiales resistentes, sólidos y con la aislación adecuada, ni tampoco de cañerías dentro de la vivienda y de inodoro con descarga de agua.

Sumado a esto, relacionados a la calidad habitacional dependiente del equipamiento y de los servicios con los que cuentan las personas, se optó por tres variables: 1) hogares sin computadoras; 2) hogares sin celular. Ambas variables como dos elementos tecnológicos destinados a la comunicación, a la integración, a la información y a la instrucción, claves en el contexto de la sociedad de la información en la que vivimos; y 3) la presencia de una heladera en el hogar, la cual es de suma importancia en el verano para mantener la comida en buen estado por más tiempo.

Para finalizar con el análisis de las variables sociales, como indicadores de condiciones de vida, se eligieron las variables hogares con NBI (aquellos en los cuales al menos se cuenta con alguna de las cinco condiciones: NBI vivienda, hogares sin retrete, hacinamiento, asistencia escolar y capacidad de subsistencia), viviendas particulares habitadas según la calidad de materiales IV (refiere a la vivienda que presenta materiales de baja calidad en pisos y techos) y hogares hacinados (con tres o más personas por cuarto). Estas variables son importantes dado que la vivienda es el ámbito de las relaciones primarias, de la construcción de la identidad social, del desarrollo de la persona como individuo y ciudadano.

Las variables ambientales seleccionadas se justifican de la siguiente manera: cercanía a las industrias, lo cual puede traer contaminación sonora, atmosférica, acumulación de desechos sólidos peligrosos y no peligrosos, y contaminación de cuerpos de agua. Cercanía a basurales a cielo abierto, lo que trae acumulación de desechos sólidos y acumulación de vectores de enfermedades que pueden perjudicar a los pobladores. De riesgo de inundación del Río de La Plata (80 m) y arroyos de la zona, pueden acabar con hogares si se dan de manera abrupta, pueden ocasionar enfermedades por el grado de contaminación del agua, principalmente el alto grado de contaminación de los arroyos del partido de Quilmes y la última variable cercanía a autopistas, por la contaminación sonora que genera, y la posibilidad de que las viviendas se vean afectadas por accidentes.

Es importante señalar que la construcción de índices implica ciertos riesgos que pueden desencadenar una inadecuada adaptación, ya que la selección de las dimensiones y variables a incorporar y, posteriormente, su utilización para orientar la acción tiene que ser contextualizada con otros parámetros de análisis. Si bien los mapas de vulnerabilidad tienen un gran potencial en poder evaluar o comparar efectos a lo largo del tiempo, exige una prudencia técnica en su aplicación política. El riesgo de priorizar ciertos aspectos y desenfocar el abordaje integral de las intervenciones o planes de acción que necesita la problemática del lugar en materia de adaptación pueden producir el incremento, en vez de reducir, la vulnerabilidad a los impactos del cambio climático.

## **Resultados**

### ***Escenarios territoriales en tiempo de cambio climático***

A continuación se presentan algunos de los resultados y mapas correspondientes a la fase de construcción previa al IVSA: el índice de vulnerabilidad social (IVS) y el índice de vulnerabilidad ambiental (IVA). La representación de estos resultados de vulnerabilidad se expresan en dos recortes territoriales solidarios entre sí: el escenario del partido en su forma tradicional de organización política-administrativa, y por radio censal. Y, el escenario de los territorios vulnerados como las villas y los asentamientos, según recientes relevamientos y fuentes secundarias.

### ***Índice de vulnerabilidad social (IVS)***

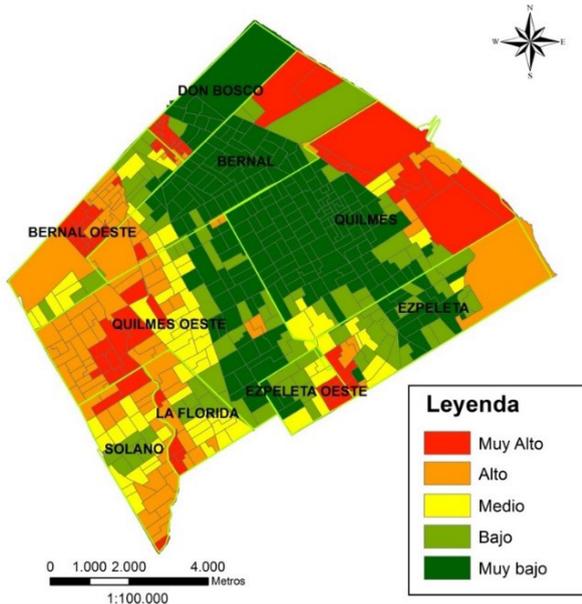
En la Tabla 3, se observa cuáles son las variables con mayor incidencia en el resultado del IVS: hogares no conectados a la red de cloacas, hogares con insuficiente calidad de servicios, hogares sin computadoras, hogares sin gas y hogares con insuficiente calidad constructiva. Los hogares sin conexión

directa de agua potable son tan pocos que solo en unos pocos radios tiene la misma importancia que las otras variables. En un segundo plano de importancia respecto al valor del IVS se encuentran las variables, población inactiva, población con solo educación primaria, hogares sin celular, hogares con necesidades básicas insatisfechas y hogares hacinados con más de tres personas por cuarto. Finalmente las variables con la menor influencia son pobladores analfabetos, viviendas tipo rancho y hogares con personas desocupadas.

**Tabla 3.** Incidencia de las variables en el IVS

	Inacti	Analf	Prim	Agua	Cloacas	Propieta	Ranch	Inouf Serv	Compu	Celu	Helad	Gas	NBI	Calid 4	Masde 3	Inouf CalCont	Desoc
Máx	47,06	13,94	62,77	100,00	100,00	38,51	17,19	100,00	100,00	50,00	34,00	100,00	63,11	33,33	65,80	100,00	11,11
Min	22,22	0,00	11,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
X	35,14	5,76	36,02	1,72	37,86	10,37	0,71	15,34	50,91	16,13	3,85	31,97	8,82	1,36	18,19	27,37	3,35
S	2,85	2,57	12,60	8,08	42,81	3,67	1,73	19,86	16,59	4,20	4,90	33,02	9,89	3,03	14,13	31,72	1,17

**Fuente:** elaboración propia con base en el INDEC (2010) e IGN.



**Figura 6.** IVS por radio censal (2010).

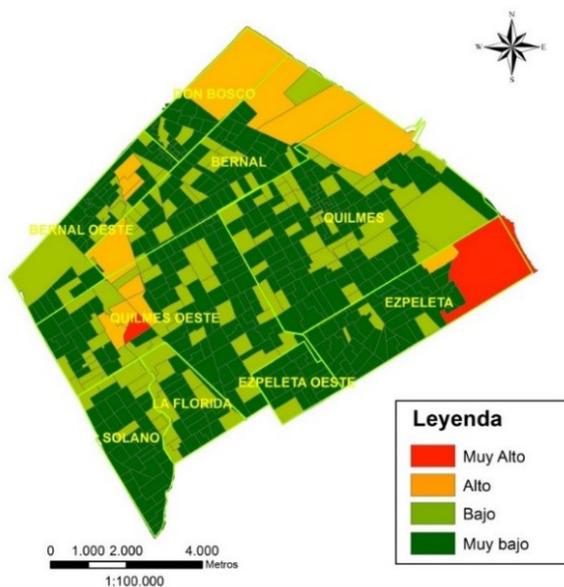
Fuente: Elaboración propia con base en el censo del 2010 del INDEC y el IGN.

Al tomar en cuenta y promediar solo las variables provenientes del INDEC (Figura 6) se obtuvo un IVS con valores entre 5,4% y 51,09% obteniendo al igual que en las variables más influyentes, que los radios más vulnerables son los que contienen a los asentamientos humanos más desfavorecidos que se encuentran a los lados de los arroyos y algunos de los bordes del Río de la Plata. Siendo el centro de Quilmes, Bernal y Don Bosco los lugares que en mejor situación se encuentran. Los valores obtenidos al promediar los porcentajes de las variables del INDEC en la mayoría de los casos, son menores al 50%, a pesar de que muchas variables lleguen a un 100% hay otras que no pasan de 14%, el promedio de los valores máximos de las variables es de casi 61% y el de los valores mínimos es de 2,8%.

En el IVS se visibiliza una organización del territorio que se replica en las localidades de Quilmes, un centro y una periferia. De esta manera, los resultados muestran una clara distribución de la problemática social que se incrementa en la medida que nos alejamos de las zonas centrales de Don Bosco, Bernal y Quilmes, las que se encuentran en mejor situación social; mientras que Quilmes Oeste, Bernal Oeste y Solano constituyen las zonas menos favorecidas.

### Índice de vulnerabilidad ambiental (IVA)

El IVA se estableció tomando en cuenta los radios que podían estar sujetos a inundación, ya sea por alguno de los arroyos o ya sea por la dinámica hídrica



**Figura 7.** IVA por radio censal.

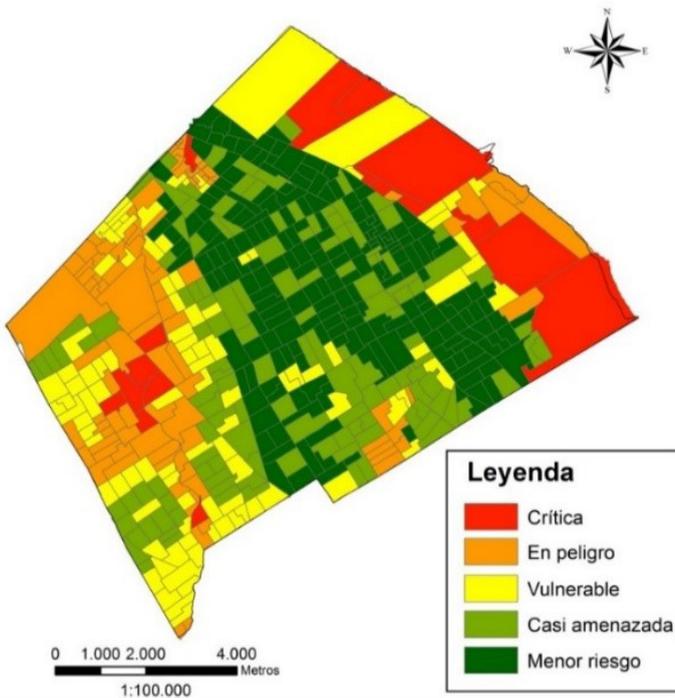
Fuente: elaboración propia con base en el INDEC y el IGN.

del Río de la Plata, los radios que contienen basurales a cielo abierto, los radios que contienen industrias y/o cercanía a autopistas.

Este índice oscila entre 0 y 0,4 y es un índice de presencia-ausencia. Los radios en rojo son los que presentan las tres variables mientras que los radios censales en verde oscuro son los que no presentan ninguna variable. Verde claro una sola y naranjas dos variables. Ninguno de los radios presentó las cuatro variables al mismo tiempo (Figura 7).

### ***Índice de vulnerabilidad socioambiental (IVSA)***

Finalmente se estableció un IVSA que es una suma de los índices anteriores, donde el valor resultante es la suma del valor del índice social más el valor del índice ambiental.



**Figura 8.** IVSA para el partido de Quilmes.

Fuente: elaboración propia con base en el INDEC (2010) y el IGN.

Se podría pensar que el valor de este índice debería estar entre 5,4% y 91,09% pero la combinación de los dos índices no hizo coincidir en ningún caso radios censales con los máximos valores de cada índice por lo tanto el valor

del IVSA varió entre 5,4% y 71,09% dado que los radios con el máximo valor de las variables del INDEC solo presentaron dos variables ambientales. También se puede observar que muchos lugares que no se consideraban vulnerables al evaluar solo las variables del INDEC, aumentan su vulnerabilidad al tomar en cuenta las otras variables como las inundaciones, basurales, industrias y la cercanía a las autopistas (Figura 8). Sin embargo, el centro de Quilmes, el centro de Bernal y el centro de Don Bosco siguen siendo los lugares menos vulnerables; mientras que las villas en las zonas bajas a los lados de los arroyos y en las áreas próximas al Río de la Plata, son los más vulnerables.

En la Tabla 4 se puede observar que el grado de vulnerabilidad en los diferentes radios censales del partido de Quilmes es inversamente proporcional al número de habitantes, al número de hogares y al área total de los radios. El 52% de la superficie total del partido de Quilmes tiene algún tipo de vulnerabilidad al igual que el 45% de sus habitantes y el 40% de sus hogares.

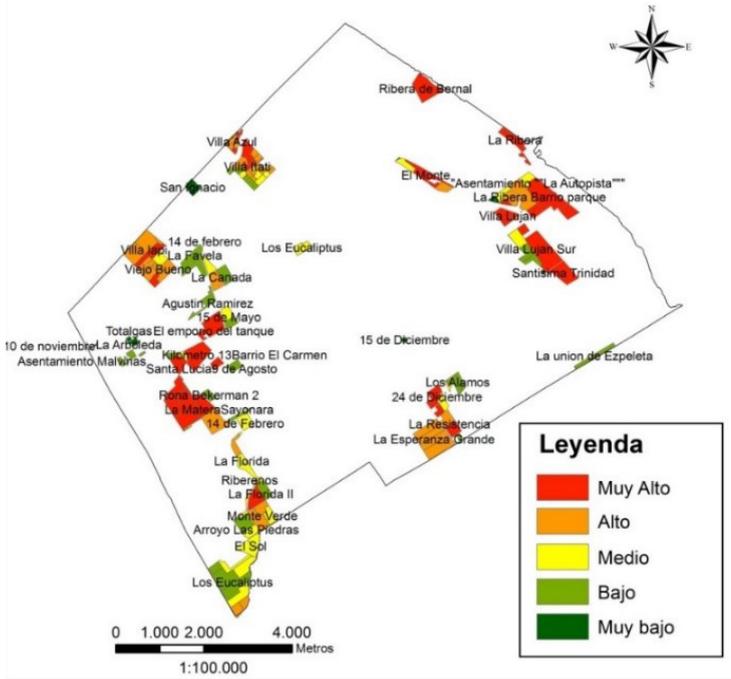
**Tabla 4.** Grado de vulnerabilidad de los radios censales y sus proporciones

IVSA	IVSA	Núm. de radios	Habitan- tes	%	Hogares	%	Área km <sup>2</sup>	%
Muy Alto	CR	18	19.749	3%	5.051	3%	13,99	15%
Alto	EN	95	115.792	20%	30.122	17%	15,39	17%
Medio	VU	101	128.495	22%	35.865	20%	18,14	20%
Bajo	CA	133	144.057	25%	45.026	25%	19,99	22%
Muy Bajo	PM	211	174.850	30%	61.046	34%	24,53	27%
<i>Total</i>		558	582.943	100%	177.110	100%	92,03	100%

**Fuente:** elaboración propia.

Si tomamos la situación específica de villas y asentamientos nos encontramos con una generalizada condición de alta vulnerabilidad. De las 55 villas evaluadas por la Fundación Techo (2013, 2016), al aplicar el IVSA tenemos que: 17 (31% de las villas) se encuentran con alta vulnerabilidad, con valores entre 37 y 51%, 10 (18%) con vulnerabilidad media (32 a 37%) y las otras 30 (51%) con valores bajos, de las cuales 11 tienen valores medios entre 28 y 32% (Figura 9). Es decir, aparecen gradientes de vulnerabilidad dentro de unidades de alta homogeneidad territorial.

A pesar de que el grado de vulnerabilidad en las villas es bastante alto se puede observar que en el caso de algunos radios censales dentro de ellas no es tan grave, por lo que se considera hacer estudios detallados en la escala local para abordar la complejidad de las nuevas estructuras de la pobreza en el territorio.



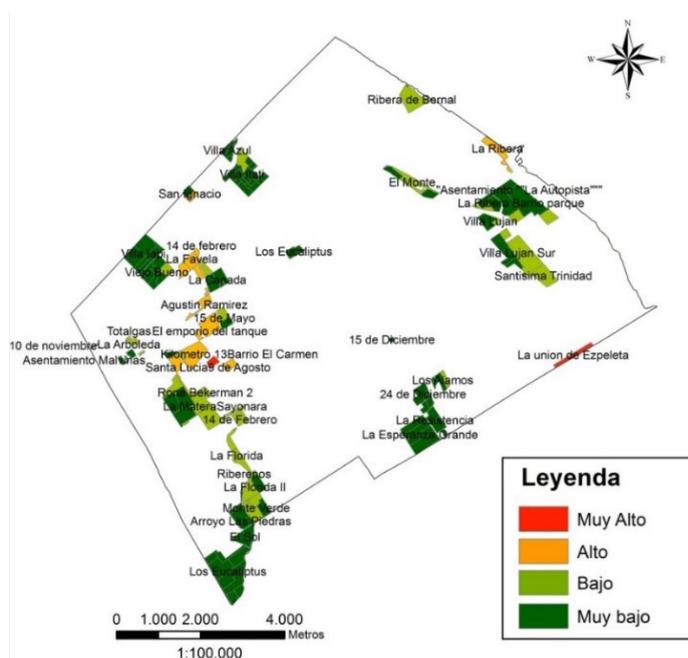
**Figura 9.** IVSA por radio censal en las villas.

Fuente: elaboración propia con base en el censo del 2010 del INDEC y Fundación Techo (2013, 2016).

El IVA para los radios que coinciden con las villas evaluadas por la Fundación Techo (2013, 2016) en general tienen una sola de las variables ambientales presentes en las villas, por lo cual se establece que la amenaza principal son las inundaciones por parte de los arroyos o el Río de la Plata, y que en muchos casos los basurales o industrias se encuentran cerca, pero no dentro del radio censal. Las únicas villas afectadas por todas las variables son 9 de agosto y la Unión de Ezpeleta (Figura 10).

Las 55 villas evaluadas por la Fundación Techo (2013, 2016) abarcan 241 radios censales y cada villa puede abarcar más de un radio censal, por lo cual sería importante que el INDEC reevalúe la dimensión y forma de los radios censales en estas zonas, y ser más fieles al territorio.

Las villas más afectadas tomando en cuenta el IVSA son: Villa Itatí, La Ribera de Bernal, La Ribera, Barrio Parque, Villa Lujan Sur, Santísima Trinidad, 9 de agosto, el Emporio del Tanque, Kilómetro 13, Santa Lucía, La Matera y la Unión de Ezpeleta. Para un total de 19.846 habitantes y 3,49 km<sup>2</sup> (Tabla 5). Los valores del IVSA para estas villas van de 50 a 71%. Mientras que para las



**Figura 10.** IVA por radio censal en las villas (2010).

Fuente: elaboración propia con base en el censo del 2010 del INDEC y Fundación Techo (2013, 2016).

**Tabla 5.** Habitantes y superficie de las villas de acuerdo a su grado de vulnerabilidad

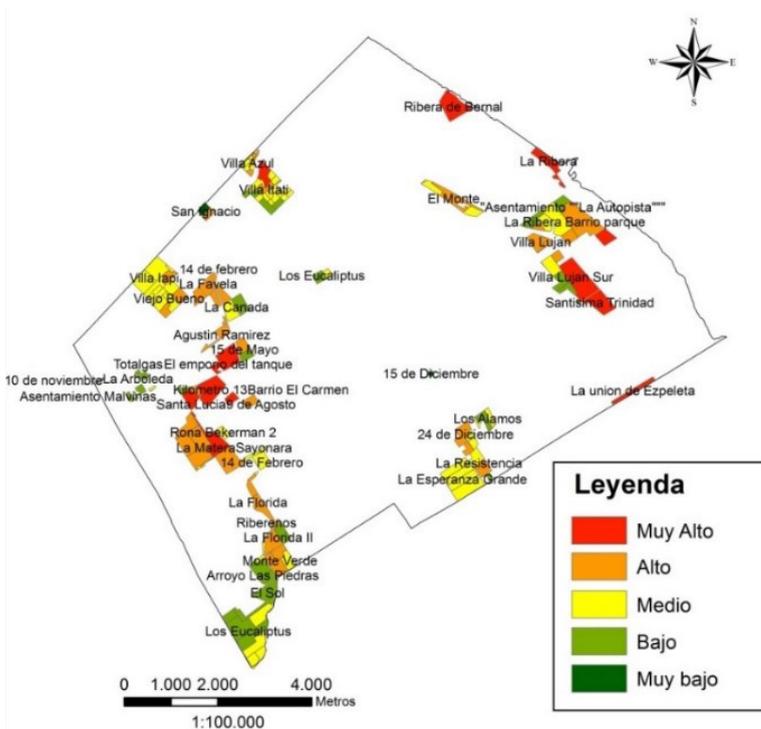
IVSA	Núm. de villas	Habitantes	%	Área km <sup>2</sup>	%
Muy Alto	13	19.749	51%	3,49	37%
Alto	21	10.122	27%	2,73	29%
Medio	13	5.300	14%	2,73	29%
Bajo	8	2.860	7%	0,60	6%
Total	55	38.031	100%	9,55	100%

**Fuente:** elaboración propia con base en datos de la Fundación Techo (2013, 2016).

que tienen una vulnerabilidad alta varían entre 38 y 49%. Y entre 29 y 38% para las de vulnerabilidad media. No hay ninguna villa con vulnerabilidad muy baja (Figura 11).

Este último mapa (Figura 11) además resulta útil para el manejo sanitario, no solo en tiempos de pandemia, sino frente a infecciones como el dengue que se instalan en estas áreas donde el exceso del agua o las zonas húmedas conviven con la población o con los basurales. Estas condiciones

conforman el escenario ideal para la reproducción del mosquito transmisor de la enfermedad. Cabe resaltar que Villa Itatí, además de los problemas socioambientales que tiene, presentó en el 2015 los primeros 30 casos de dengue dentro del partido de Quilmes. También otras villas fueron (y siguen siendo actualmente), en verano, víctimas de la proliferación del mosquito, que continúa siendo de alto riesgo para la salud de la población por el incremento de las temperaturas medias en la zona durante períodos más largos, dado que estás zonas históricamente no presentaban casos de dengue (Lacabana, 2017).



**Figura 11.** IVSA de los radios censales en las villas (2010).

Fuente: elaboración propia con base en el censo del 2010 del INDEC y datos de la Fundación Techo (2013, 2016).

Sin duda el principal resultado del desarrollo metodológico del IVSA ha sido lograr una síntesis territorial de criticidad según la categoría de vulnerabilidad socioambiental. Los valores que conducen a los grados de criticidad son equivalentes a las categorías propuestas por el índice (Tabla 1) que nos permiten aproximarnos a la heterogeneidad del territorio a partir de la información disponible.

De la lectura territorial surge la desigualdad de condiciones que construyen diversos gradientes de vulnerabilidad frente a posibles eventos extremos, cada vez más frecuentes, como resultado de la presencia del cambio climático y de las diversas intervenciones no sostenibles en Quilmes. Por lo cual, las acciones de adaptabilidad climática nos exigen medidas y planes de acción que atiendan esta complejidad ambiental del territorio, y que se invierta la dirección de los procesos urbanos que conllevan a la vulnerabilidad.

## Conclusiones

El índice de vulnerabilidad socioambiental (IVSA) permite una visión territorial de las amenazas en términos cuali-cuantitativos en la escala local. Este índice se constituye con base en otros dos índices: vulnerabilidad social (IVS) y vulnerabilidad ambiental (IVA).

Se puede observar que los lugares más afectados por la falta de servicios son: Villa Itatí, las villas cercanas a los arroyos y al Río de la Plata.

El área central de las principales localidades del partido de Quilmes: Bernal, Quilmes y Don Bosco son las menos vulnerables, según el IVSA.

A pesar de algunas limitaciones que presenta el índice termina siendo un buen indicador de la diversidad de situaciones sociales y ambientales presentes en Quilmes. Hay variables que tienen más peso que otras a la hora de sacar el promedio para el índice social. Las variables con más peso son hogares no conectados a la red de cloacas, hogares con insuficiente calidad de servicios, hogares sin computadoras, hogares sin gas y hogares con insuficiente calidad constructiva.

En los resultados de este estudio está presente la heterogeneidad social y ambiental, incluso dentro de las villas que son los lugares más afectados. La heterogeneidad se replica en estos lugares, encontrando áreas con baja vulnerabilidad y, por supuesto, áreas con alta y muy alta vulnerabilidad.

De esta síntesis se desprende que en los radios censales en peor situación viven 19 749 habitantes en casi 14 km<sup>2</sup> con 5 051 hogares. Mientras que los radios menos vulnerables tienen una población de 174 850 habitantes en un área de 24,53 km<sup>2</sup> con 61 046 hogares. En el caso de los radios censales con una vulnerabilidad alta hay 115 792 habitantes de 30 122 hogares en 15,39 km<sup>2</sup> y en los radios censales con vulnerabilidad media hay 128 495 habitantes de 35 865 hogares en 18,14 km<sup>2</sup>.

Entender el territorio como un espacio heterogéneo y fragmentado hacia su interior enriquece los resultados desde varios aspectos, principalmente en la identificación de las áreas con situaciones de mayor degradación socioambiental lo cual evidencia la necesidad de la implementación de políticas diferenciadas, acordes con las necesidades de cada realidad territorial.

Por lo tanto, dotando y mejorando los servicios de Quilmes, haciendo más planes de formación para adultos, ofreciendo créditos para mejorar la infraestructura y construcción de hogares y asegurar que las viviendas no se vean afectadas por los distintos tipos de contaminación que generan industrias, basurales a cielo abierto, autopistas e inundaciones, se puede influir en la resiliencia del sistema urbano, para que este sea menos vulnerable y más sustentable.

Finalmente, tomando en cuenta los resultados y las limitaciones de este estudio se puede replicar la metodología considerando que el peso de algunas variables puede estar repetido, como es el caso de la calidad de los materiales de los hogares, dado que también es parte de la variable necesidades insatisfechas y que los problemas ambientales no son los mismos en todas las jurisdicciones, por lo cual puede ser distinto el número de variables que se tomen para hacer el análisis socio ambiental en otros municipios.

## Referencias

- Arroyo M. y Zusman P. (2011). *Argentina e Brazil: possibilidades e obstáculos no processo de integracao territorial*. Capes.
- Beck, U. (1993). De la sociedad industrial a la sociedad del riesgo. Cuestiones de supervivencia, estructural social e ilustración ecológica. *Revista de Occidente*, 150, 19-40.
- Beck, U. (2006). *La sociedad del riesgo: hacia una nueva modernidad*. Paidós.
- Buzai, G. (2014). *Mapas sociales urbanos*. Lugar Editorial.
- Carballo, C. T. (2001). Inundación, degradación urbana y construcción social del riesgo. *Revista Geográfica*, 129, 95-110.
- Carballo, C. T. y Lacabana, M. (2018). Fragilidad ambiental y paisajes diferenciados en Villa Itatí (Quilmes). En Vidal Koppmann, S. (Comp.), *Dinámica socio-espacial de regiones metropolitanas. Claves para el análisis de un fenómeno complejo* (pp. 91-118). IMHICIHU-CONICET.
- Cardoso, M. (2017). Estudio de la vulnerabilidad socio-ambiental a través de un índice sintético. Caso de distritos bajo riesgo de inundación: Santa Fe, Recreo y Monte Vera, Provincia de Santa Fe, Argentina. *Caderno de Geografia*, 27(48), 156-183.
- Con, M., Susini, S.; Catala, S. y Quinteros, S. (2011). Índice de Vulnerabilidad Social (IVS). *Documento metodológico*. Dirección de Investigación y Estadística del Ministerio de Educación del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. [https://www.buenosaires.gob.ar/sites/gcaba/files/2011\\_-\\_indice\\_de\\_vulnerabilidad\\_social\\_.pdf](https://www.buenosaires.gob.ar/sites/gcaba/files/2011_-_indice_de_vulnerabilidad_social_.pdf)
- Fundación Techo (2013). *Relevamiento de asentamientos informales, 2013*. Techo Argentina.
- Fundación Techo (2016). *Relevamiento de asentamientos informales, 2016*. Techo Argentina.

- Giddens, A.; Bauman, Z.; Luhmann, H., y Beck U. (1996). *Las consecuencias perversas de la modernidad: modernidad, contingencia y riesgo*. Anthropos Editorial.
- Herzer, H. M. (2011). Construcción del riesgo, desastre y gestión ambiental urbana: Perspectivas en debate. *Revista virtual REDESMA*, 5(51), 51-61.
- Herzer, H. M. y Gurevich, R. (2016). Construyendo el riesgo ambiental en la ciudad. Desastres & Sociedad. *Revista semestral de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*, 7(4), 1-12.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina. (2010). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas, 2010 (Datos definitivos)*. <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135>
- Kaztman, R. (2000). Notas sobre la medición de la vulnerabilidad social. Quinto Taller Regional sobre la Medición de la Pobreza: Métodos y Aplicaciones: documentos presentados - LC/R.2026 - 2000 - pp. 275-301. CEPAL.
- Lacabana, P. (2017). Sistemas de información geográfica para la toma de decisiones. El dengue en el Partido de Quilmes. En Moreno, F. (Comp.). *Ambiente y desarrollo sustentable: miradas diversas* (107-117). SPG-Universidad Nacional de Quilmes.
- Lacabana, M., Bressano, C. y Carballo, C. (2017). Territorios vulnerables e injusticia ambiental en Argentina. *Revista Política e Planejamento Regional*, 3(2), 283-304.
- Lavell, A. (1996). Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. En Fernández, M.A. (Comp.), *Ciudades en riesgo* (12-42). USAID.
- Lavell, A. (1999). Un encuentro con la verdad: los desastres en América Latina durante 1998. *Anuario Político y Social de América Latina*, 2, 1-19.
- Lavell, A. (2002). Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. En Fernández, M. A. (Comp.), *Ciudades en riesgo. Degradación ambiental, riesgos urbanos y desastres* (13-42). Panamá: La Red.
- Massera, C. (2020). El riesgo como función compleja y dinámica. En Gonzalez, M., Massera, C., Vázquez, A. y Freddo, B. (Comps.), *Transformaciones territoriales en Patagonia: destinos y prácticas de los espacios* (pp. 36-69). Editorial Universitaria de la Patagonia-EDUPA.
- Natenzon, C. (1995). *Catástrofes naturales, riesgo e incertidumbre*. FLACSO. Serie Documentos e Informes de Investigación, 197.
- Natenzon, C. y Ríos, D. (2015). *Riesgos, catástrofes y vulnerabilidades. Aporte desde la Geografía y otras ciencias sociales para casos argentinos*. Ediciones Imago Mundi.
- Olcina Cantos, J. (2008). Cambios en la consideración territorial, conceptual y de método de los riesgos naturales. Diez años de cambios en el Mundo, en la Geografía y en las Ciencias Sociales, 1999-2008. En Capel, H. Actas del X Coloquio Internacional de Geocrítica, Universidad de Barcelona, 26-30 de mayo.

- Pereyra, A. (2017). *Territorio, riesgo y vulnerabilidad ambiental*. Serie Carpeta de Trabajo. Universidad Nacional de Quilmes.
- Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. (2011). Las ciudades y el cambio climático: orientaciones para políticas. Informe mundial sobre asentamientos humanos 2011. <https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Las%20Ciudades%20Y%20El%20Cambio%20Clim%C3%A1tico%20Orientaciones%20Para%20Pol%C3%ADticas.pdf>
- Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (2014). *Informe sobre Desarrollo Humano 2014. Sostener el Progreso Humano: reducir vulnerabilidades y construir resiliencia*. Organización de las Naciones Unidas. <http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr14-summary-es.pdf>
- Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (2017). Información para el desarrollo sostenible. Argentina y la Agenda 2030. Organización de las Naciones Unidas. [http://hdr.undp.org/sites/default/files/pnudargent-pnu\\_2017\\_baja.pdf](http://hdr.undp.org/sites/default/files/pnudargent-pnu_2017_baja.pdf)
- Viand, J. y Briones, F. (Comp.) (2015). *Riesgos al sur. Diversidad de riesgos de desastre en Argentina*. Imago Mundi.
- Wilches Chaux, G. (1993). La vulnerabilidad global. En Maskrey, A. (Comp.) *Los desastres no son naturales* (11-40). Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina.



# Análisis de la distribución espacial de la precipitación anual (1979-2014) aplicando métodos de interpolación en la Región Occidental del Paraguay

## Analysis of the spatial distribution of annual precipitation (1979-2014) applying interpolation methods in the Western Region of Paraguay

Monserrat Victoria García-Calabrese<sup>1</sup>  
María Teresa Paniagua<sup>2</sup>  
Elena Chicaiza<sup>3</sup>

Fecha de recibido: 8 de junio de 2021

Fecha de aceptado: 15 de noviembre de 2021

### Resumen

Los eventos de lluvia menos frecuente o con alta intensidad, seguidos de periodos largos de sequía, someten a excesivo estrés a un ecosistema

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción (UNA), Paraguay. XLVII Curso Internacional de Geografía Aplicada 2020, Centro Panamericano de Estudios e Investigaciones Geográficas (CEPEIGE), Ecuador, correo electrónico: [mgarcia@ing.una.py](mailto:mgarcia@ing.una.py). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4706-2914>

<sup>2</sup> Investigación para el Desarrollo, Paraguay. ; XLVII Curso Internacional de Geografía Aplicada 2020, Centro Panamericano de Estudios e Investigaciones Geográficas (CEPEIGE), Ecuador, correo electrónico: [tpaniagua@desarrollo.org.py](mailto:tpaniagua@desarrollo.org.py)

<sup>3</sup> Universidad Politécnica de Madrid, España. XLVII Curso Internacional de Geografía Aplicada 2020, Centro Panamericano de Estudios e Investigaciones Geográficas (CEPEIGE), Ecuador, correo electrónico: [elenag.chicaiza@gmail.com](mailto:elenag.chicaiza@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4975-9344>

y pueden aumentar la posibilidad de pérdida de suelo por erosión o aumentar la vulnerabilidad de las comunidades. El Chaco paraguayo es una región dominada por el uso pecuario y vegetación sumamente vulnerable, con escasas lluvias a lo largo del año. Además, posee pocas estaciones meteorológicas para su monitoreo a lo largo del territorio. Por tanto, el uso de métodos geoestadísticos adecuados, presentan una oportunidad para predecir la distribución espacial de la precipitación. En este estudio se obtuvieron datos de precipitación diaria desde 1979-2014 de siete estaciones meteorológicas in situ y se las combinó con datos de reanálisis del Sistema de Pronóstico del Clima (CFSR). Se seleccionaron 400 puntos de los cuales se escogieron al azar 78, contando con un total de 84 puntos de muestreo para interpolar. Se optó por la interpolación de *Kriging* ordinario y se compararon los variogramas teóricos exponencial, matern, esférico, lineal y gaussiano para la caracterización de la precipitación. De la comparación de los valores obtenidos en el presente estudio, el modelo con ajuste automático, exponencial, matern, lineal y esférico son los que presentaron un menor error, por lo que se los considera adecuados para la estimación de precipitación en el Chaco paraguayo.

Palabras clave: *Chaco paraguayo, precipitación, Kriging, interpolación.*

## Abstract

Less frequent or high intensity rain events followed by long periods of drought put pressure on an ecosystem and can increase the possibility of soil loss due to erosion or increase the vulnerability of communities. The Paraguayan Chaco is a region dominated by livestock use and with extremely vulnerable vegetation that receives little rainfall throughout the year. However, it has very few meteorological stations for monitoring throughout the territory. Thus, geostatistical methods present an opportunity to predict the spatial distribution of precipitation. In this study, daily precipitation data from 1979-2014 were obtained from seven in-situ meteorological stations and combined with reanalysis data from the Climate Forecast System (CFSR). 400 points were selected of which 78 were randomly chosen, with a total of 84 sampling points to interpolate. The ordinary *Kriging* interpolation was chosen and the theoretical exponential, matern, spherical, linear and Gaussian variograms were compared for the characterization of precipitation. From the comparison of the values obtained in the present study, the model with automatic, exponential, matern, linear and spherical adjustment are those that present a lower error, for which they are considered adequate for estimating precipitation in the Paraguayan Chaco.

Key words: *paraguayan Chaco, precipitation, Kriging, interpolation.*

## 1. Introducción

En las últimas décadas el planeta Tierra se encuentra sufriendo un acelerado cambio climático. Este proceso es un fenómeno cíclico natural que tarda millones de años en ocurrir, pero la actividad humana ha ocasionado su aceleración. Según el Grupo de Expertos Intergubernamentales sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014) es prácticamente seguro que la energía de la Tierra haya aumentado considerablemente entre 1971 y 2010 indicando un calentamiento.

Debido a estos cambios constantes en la atmósfera es de suma importancia comprender el comportamiento de las variables climáticas, dicha información nos permite entender y predecir los efectos del cambio climático, que representa en la actualidad un tema obligado en las preocupaciones de toda sociedad y debe ser incluida en la agenda de cualquier gobierno (Díaz Cordero, 2012).

Una de las variables importantes para el control de cambios que se producen en un entorno que afectan a comunidades, tanto social como económicamente, es la precipitación. Las precipitaciones tienen un impacto importante en las actividades humanas. Por ejemplo, la producción agrícola y el suministro de agua urbana, dependen no solo de la cantidad total de lluvia anual recolectada en las presas, sino también de la distribución temporal y espacial de la lluvia. Los eventos frecuentes de lluvia con baja intensidad son beneficiosos para las capas del acuífero y los cultivos. En contraste, los eventos de lluvia menos frecuentes con tasas de alta intensidad seguidas de períodos prolongados de sequía pueden ser devastadores para la producción agrícola, tanto a corto como largo plazo, al degradar la calidad del suelo a través de la erosión y la humificación mecánica (Michaelides, 2009).

En contraste a esta situación, el país cuenta con pocas estaciones meteorológicas cuya distribución no es homogénea entre regiones. El Paraguay es un país que se encuentra en el continente americano, específicamente en el sur, y se divide en dos regiones con características distintas, la Región Oriental y la Región Occidental o Chaco como comúnmente se le conoce.

El área de estudio se ubica en la Región Occidental, que cuenta con mayor superficie y estaciones meteorológicas distribuidas deficientemente. En la mayoría de los casos existen, por las actividades que allí se realizan, estaciones de monitoreo agrícola que muchas veces no poseen datos continuos o completos. Debido a la falta de estos datos meteorológicos *in situ*, muchas veces se recurre a las funciones disponibles en los sistemas de información geográfica para caracterizar el área con el objeto de describir su comportamiento climático.

En cuanto a la precipitación, se puede destacar el estudio de Weiberlen y Báez (2018), quienes mencionan que en la zona estudiada han utilizado

imágenes de dos satélites para describir la precipitación en todo el país y han concluido que ambos productos son buenos para estimar la ocurrencia de eventos de precipitación de baja intensidad de dos a cinco milímetros al día y tienden a sobreestimar eventos de alta precipitación de 40 milímetros al día.

Por otra parte, la región del Chaco está dominada por el uso pecuario y con una vegetación sumamente vulnerable. Entre las regiones referidas existe una marcada diferencia en la cantidad de precipitación que se registra. Mientras en la Región Occidental predomina la sequía, en la Región Oriental la precipitación es mayor. Otra diferencia muy particular es la distribución de la población en el país, en donde hay menor densidad poblacional en la región chaqueña, por lo que gran parte del espacio es aprovechado en rubros dedicados exclusivamente a la producción agropecuaria.

Es así que Mereles *et al.* (2019) mencionan que existen empresas que prosperan al norte del territorio, dedicadas mayormente a la producción de carne de alta calidad y genética, lo que hace que el país se vea privilegiado con exportación de alta gama, pero a expensas de la modificación de los sistemas naturales. Esto se constata en otro estudio realizado por Prayogi *et al.* (2020) donde se habla de la exportación de carbón a Europa fruto de la producción a expensas de la vegetación natural del Chaco paraguayo, situación que ha causado un ritmo acelerado de deforestación en el área.

Complementariamente, Kruck (1998) menciona que los datos de precipitación anual del Chaco presentan variabilidades. Él mismo refiere que existe un aumento en la precipitación a lo largo del tiempo posiblemente ocasionado por el cambio climático cuyos efectos quizás se hayan empezado a visualizar desde esa época. Por otro lado, argumenta que este fenómeno se encuentra influenciado por un patrón de aumento cada 20 años con cambios entre períodos húmedos y secos. Asimismo, no se puede descartar las características propias del ecosistema que se ven influenciadas por fenómenos como El Niño o La Niña que son anomalías de circulación general de la atmósfera. Según el modelado de cambio climático de Bidegain *et al.* (2011), para el Paraguay el patrón de variación de la precipitación se mantuvo constante para la década del 2020, por lo que se registraron mayores precipitaciones al sur de la región oriental y una reducción al norte de la Región Occidental (Chaco Paraguayo).

En cuanto a las técnicas para el análisis y predicción de la distribución espacial de variables climáticas, la interpolación espacial representa una oportunidad de descripción de cualquier variable en el espacio como la precipitación y constituye una herramienta valiosa para predecir su distribución, que puede ser modelada con datos obtenidos *in situ* o productos del monitoreo satelital. Mckinley *et al.* (2020) han hecho una revisión de la

geoestadística en donde recalcan que las propiedades de la superficie y el subsuelo de la Tierra son especiales porque están estructuradas en el espacio y el tiempo. La geoestadística se ha desarrollado continuamente para crear modelos estocásticos que representan explícitamente y, por lo tanto, sean apropiados para modelar las propiedades espacio-temporales de una variable regionalizada. Ahí radica su importancia, ya que ayudan a describir datos faltantes en áreas de gran extensión que se desea caracterizar.

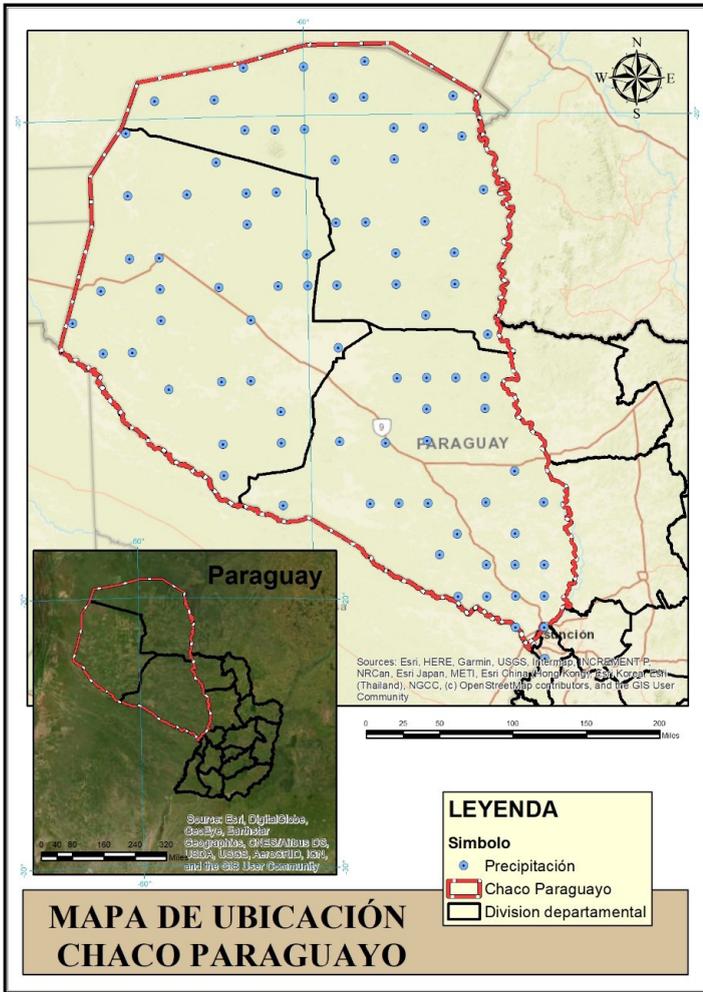
La fragilidad de los ecosistemas y la importancia económica en cuanto a la producción en la zona de estudio hacen que la descripción climática, en particular la precipitación, sea de interés. Es así que este estudio tiene como objetivo aplicar métodos de interpolación para describir la precipitación espacial del Chaco paraguayo.

## 2. Materiales y métodos

El Paraguay cuenta con dos regiones distintivas, la región occidental y la región oriental comúnmente conocida como Chaco, el cual forma parte del Gran Chaco Americano. El Chaco Paraguayo se compone por tres departamentos: Presidente Hayes, Boquerón y Alto Paraguay. La región es conocida por tener una mayor extensión territorial en comparación con la oriental, en cambio, posee una menor densidad poblacional. Según la Dirección General de Estadísticas, Encuestas y Censos (DGEEC, 2018), el territorio chaqueño ocupa una superficie de 246 925 km<sup>2</sup>.

El Chaco paraguayo se encuentra al norte del país (Figura 1), presenta una transición entre clima semiárido y húmedo, caracterizado por largos periodos, con déficit de humedad, ya que la precipitación es menor que la evaporación potencial. En promedio según Kruck (1998) en el Bajo Chaco cercano al río Paraguay se registra la mayor cantidad de precipitación anual con un valor de 1 400 milímetros, que disminuye progresivamente al norte hacia los límites fronterizos con Bolivia, alcanzando una precipitación anual de 500 milímetros aproximadamente. Esto denota una enorme diferencia en una zona de altitud, prácticamente homogénea.

La mayor cantidad de precipitación, durante el año, se registra en el verano (diciembre a marzo), considerándose como la época húmeda. La estación invernal (julio a septiembre), se caracteriza por la condición predominante de sequía. Según Yurrita (2005), la población que habita en el territorio conoce dichas variaciones, sin embargo, las condiciones han ido cambiando a lo largo de los años con épocas húmedas más cortas y sequías más prolongadas lo que hace más difícil llevar a cabo las actividades agrícolas y ganaderas además de disminuir la seguridad hídrica de sus habitantes.



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio y puntos de muestreo. Fuente: elaboración propia con datos de Global Weather for Swat y Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC).

La metodología contempla tres grandes aspectos:

1. la obtención y análisis exploratorio de los datos;
2. análisis estructural de los datos; y
3. el ajuste y selección del mejor modelo.

Para el análisis de datos se utilizó el software RStudio (Equipo RStudio, 2020), los paquetes utilizados para realizar el *kriging* fueron automap (Hiemstra y Hiemstra, 2013) y gstat (Pebesma, 2004).

En la primera etapa se obtuvieron los datos de precipitación diaria desde 1979 hasta 2014, de las estaciones meteorológicas de la región obtenida de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil [DINAC], solo siete estaciones contaban con los datos completos del área de estudio, de la página de Global Weather for SWAT (datos CFSR).

El reanálisis del Sistema de Pronóstico del Clima (CFSR) de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP) se completó durante el período de 36 años, de 1979 a 2014, se diseñó y ejecutó como un sistema global, de alta resolución, acoplado atmósfera-océano-superficie terrestre-sistema de hielo marino, para proporcionar la mejor estimación del estado de estos dominios acoplados durante este período (Dile y Srinivasan, 2014).

Es así que fue descargada una grilla de 400 puntos con datos de precipitación de la Global Weather for SWAT. De los cuales se seleccionaron 78 puntos al azar y en total fueron utilizados 84 puntos de muestreo. Para el análisis exploratorio de los datos se realizaron cálculos estadísticos, histogramas, identificación de valores atípicos y normalización de datos con el objetivo de describirlos.

En la segunda etapa se propuso realizar la interpolación mediante un *Kriging* ordinario para la caracterización de la precipitación en el Chaco paraguayo. El método *Kriging* proporciona una solución al problema de la estimación basada en un modelo de variación espacial estocástica. En su formulación original, una estimación, como tal, en un lugar era simplemente una suma lineal o promedio ponderado de los datos en su vecindario, aunque según Haining *et al.* (2010), el *Kriging* es una denominación general, ya que existen distintos tipos de modelos para describir el comportamiento de variables espaciales que se desee predecir. *Kriging* lineal es el método más robusto y conocido, aunque este puede tener funciones lineales y no lineales dependiendo de las variables en estudio.

En el *kriging* lineal la estimación en cualquier zona es una ponderación lineal de los datos que se tengan y se expresa en la Ecuación 1.

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i) \quad (1)$$

En donde

$S_0$  = la ubicación de un punto

$Z(S_0)$  = la combinación de la ponderación de los datos

$\lambda_i$  = la ponderación o peso de datos escogidos, las ponderaciones están obligadas a sumar 1 (Haining *et al.*, 2010).

La interpolación *Kriging* se basa en la definición de, primeramente, variogramas experimentales, los cuales permiten definir el patrón de la variación espacial del fenómeno en estudio. Este patrón se modela tratando

de ajustar dicha tendencia a un variograma teórico (Reyes-Cardenas *et al.*, 2019). Esto puede realizarse, usando como base los modelos gaussiano, esférico, exponencial, etcétera.

Se construyó un variograma empírico o experimental y además la nube variográfica. Se construyeron variogramas para cada modelo teórico (exponencial, esférico, matern, gaussiano y lineal), con el objeto de identificar el modelo que mejor se ajusta a los datos. Además se utilizó la función de ajuste automático de variograma teórico del paquete automap, en donde selecciona el modelo que tiene la suma de cuadrados residual más pequeña en comparación al variograma de muestra (Hiemstra y Hiemstra, 2013).

En la tercera etapa se calculó la suma cuadrática ponderada del ajuste de cada variograma y también el error cuadrático medio (RMSE). Según lo mencionado por Gundogdu y Guney (2007), el RMSE se puede utilizar para comparar el rendimiento de varios métodos de interpolación. RMSE es un tipo de desviación estándar generalizada. Aparece cada vez que busca diferencias entre subgrupos u otros efectos o relaciones entre variables. Es el margen que queda cuando ha tenido en cuenta dichas relaciones en sus datos, o cuando ha ajustado un modelo estadístico a los datos. De ahí su otro nombre, variación residual. RMSE se define como la raíz cuadrada de una diferencia cuadrática promedio entre los valores observados y predichos (Ecuación 2).

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE_i}{n}} \quad (2)$$

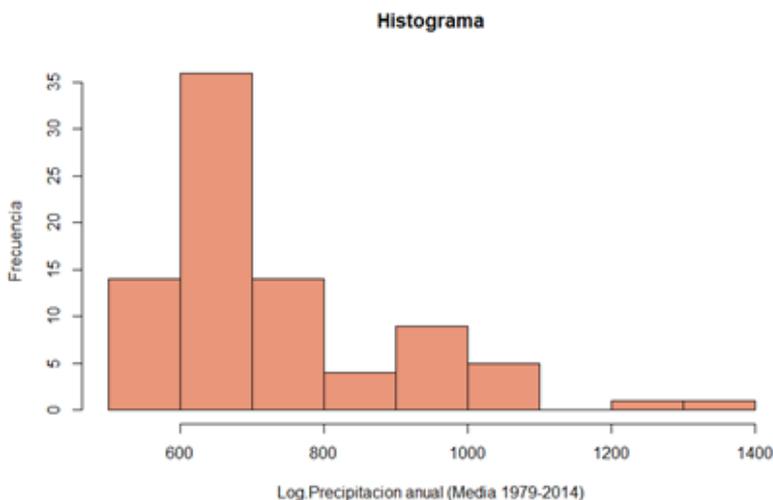
Donde *SSE* es la suma de errores (valores observados-estimados) *n* es el número de pares (errores). RMSE se utiliza con frecuencia para evaluar errores en SIG y cartografía. Se probó si las diferencias entre el valor RMSE más bajo y los demás son importantes. El método que produce el valor más pequeño de *RMSE* se considera el mejor ajuste. Por lo tanto, como último paso, se seleccionó el modelo con menor error, se ajustaron los variogramas y finalmente se realizó la interpolación de la variable estudiada. Además, se calculó el RMSE para interpolaciones con polígonos de Thiessen e Inverso Ponderado a la Distancia (IDW, *Inverse Distance Weight*, por sus siglas en inglés) que son interpoladores más simples y constituyen métodos deterministas.

### 3. Resultados y discusión

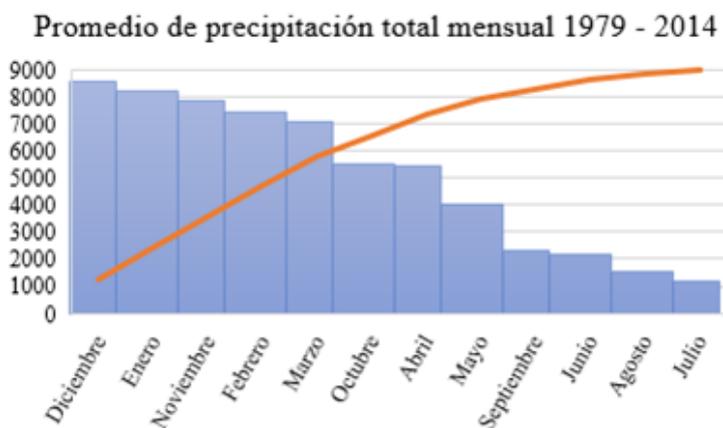
#### 3.1. Precipitación anual 1979-2014

El Chaco Paraguayo presenta una distribución espacial de la precipitación bastante homogénea en casi toda su superficie, pero con variaciones en ciertas zonas. Los datos no presentan una distribución normal (asimetría

positiva), la mayor parte de las observaciones están a la izquierda de la media, el coeficiente de sesgo o asimetría es de 1,48 y la curtosis 1,79 que se encuentran alejados de los valores centrales. La precipitación al centro y norte, desciende llegando a 500 milímetros al año, mientras que al sur aumenta hasta 1.300 milímetros al año, constituye una región bastante seca con una precipitación predominante de 600 a 700 milímetros (Figura 2). Los meses de mayor precipitación van de diciembre a mayo, y los meses de mayor sequía se extienden desde septiembre a julio (Figura 3).



**Figura 2.** Histograma de precipitación anual (1979-2014). Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.** Promedio de precipitación total mensual 1979-2014.

Fuente: adaptado de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC).

Los datos fueron normalizados para obtener una distribución normal que facilita la construcción de los variogramas, la curtosis de los datos normalizados fue 0,34 y el coeficiente de sesgo o asimetría fue 1,09, que se acercan más a valores ideales.

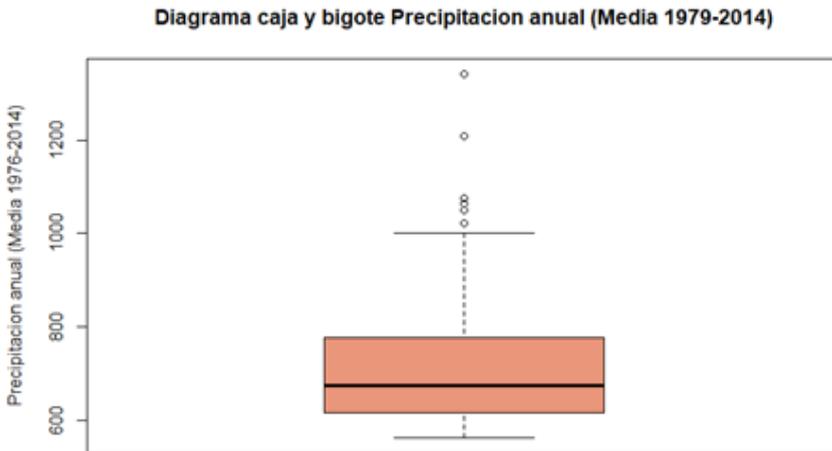
El promedio de la mínima precipitación anual registrada en el periodo de estudio fue de 562.4 milímetros y el promedio de la máxima anual registrada fue de 1342,4 milímetros para el periodo de estudio analizado que abarca el año 1979 al 2014 (Tabla 1).

**Tabla 1.** Estadística de datos (mínima, media, cuartiles y máxima)

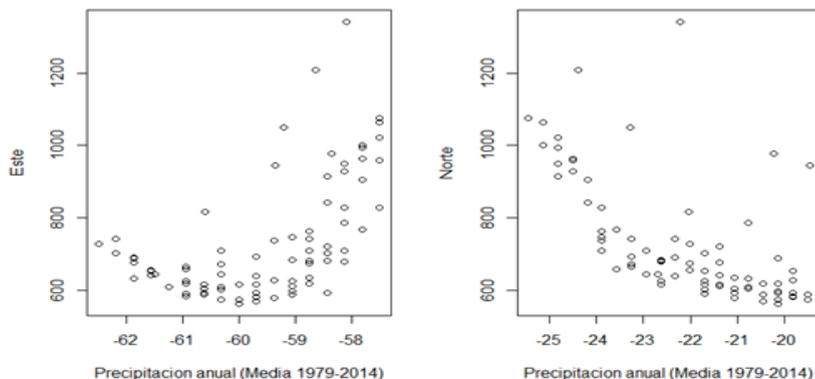
<i>Min.</i>	<i>1st Qu.</i>	<i>Median</i>	<i>Mean</i>	<i>3rd Qu.</i>	<i>Max.</i>
562.4	616.7	675.5	729.1	772.2	1342.4

**Fuente:** adaptado de Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC).

En el gráfico de caja y bigotes (Figura 4) se constata la existencia de valores atípicos en la muestra, mientras que las nubes direccionales de la Figura 5 nos permiten precisar la distribución espacial de los mismos. Los valores atípicos observados no pueden ser excluidos del estudio porque representan las condiciones típicas de una zona del área de estudio, en general no existe mucha variabilidad en gran parte de los datos.



**Figura 4.** Diagrama de caja y bigote de la precipitación anual media (1979-2014). Fuente: elaboración propia.



**Figura 5.** Nube direccional norte y este de los datos de precipitación.  
Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Análisis estructural y ajuste de variogramas

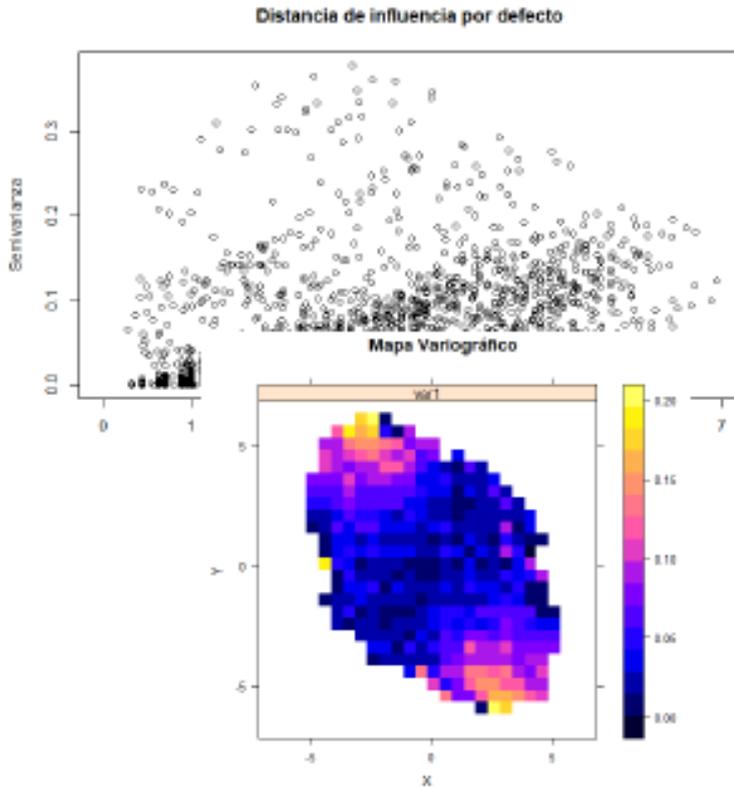
Suponiendo que la precipitación es una variable regionalizada y cuyos datos no son independientes entre sí, es decir, lo observado en un sitio provee información de los sitios vecinos.

El semivariograma juega un papel central en el método *Kriging*, ya que el más válido debe ser seleccionado para que los parámetros puedan ser estimados. Los variogramas proveen información acerca del parámetro en estudio, pero son herramientas para continuar con los cálculos geoestadísticos. Una de sus funciones principales es la estimación de valores de puntos que no han sido muestreados o sus promedios.

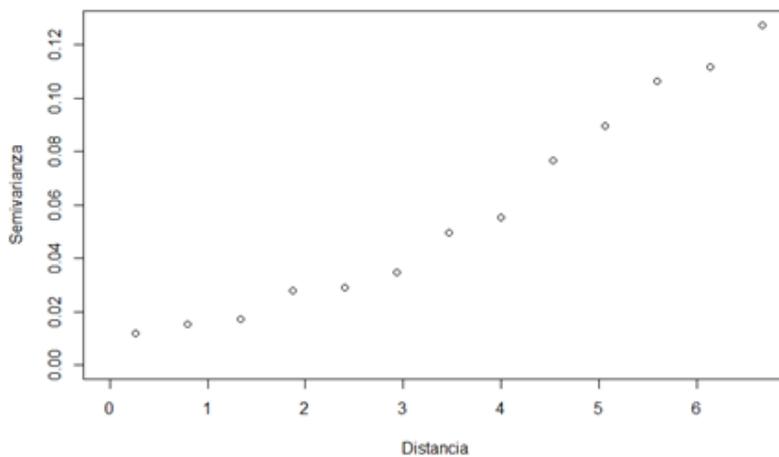
El variograma experimental indica que las variables presentan dependencia espacial, ya que la semivarianza es constante en función a la distancia. La anisotropía está marcada a los 45 grados que representan las direcciones con mayor continuidad espacial (Figura 6 y Figura 7). El variograma experimental omnidireccional con *cutoff*= 700 se observa en la Figura 7.

Los modelos teóricos analizados, como se mencionó previamente, fueron el exponencial, esférico, lineal, matern y gaussiano. En la Figura 8, se puede apreciar el análisis de envolventes de cada modelo teórico. Los datos no son productos del azar, el único modelo fuera de rango es el modelo lineal.

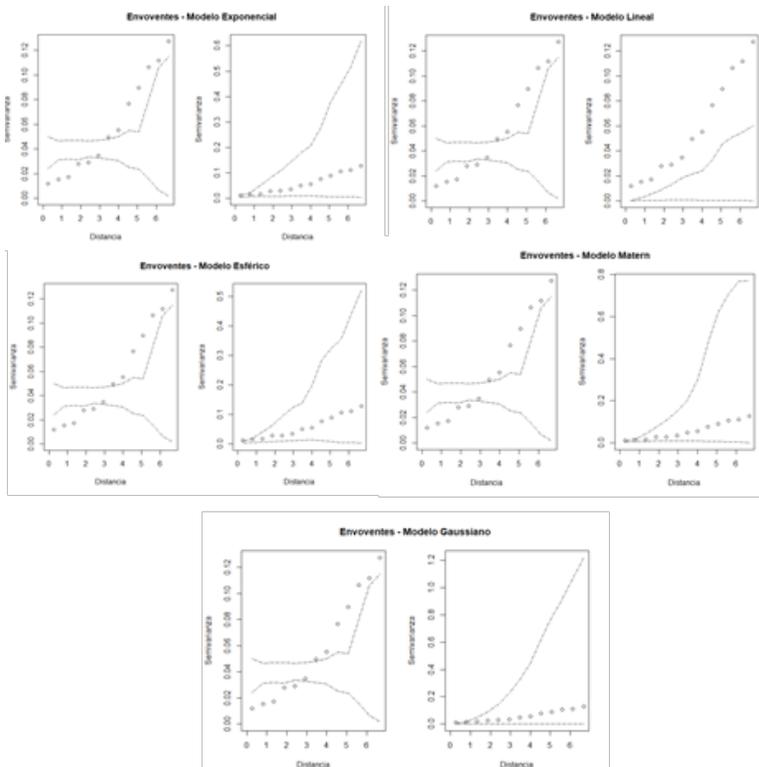
En la Figura 9 se pueden observar el variograma de cada modelo, el modelo gaussiano es el que no se ajusta a los datos y en la Figura 10 se observa un variograma con ajuste automático. Mukhopadhaya (2015), aplicó un *Kriging* ordinario para analizar precipitación de la ciudad de Túnez teniendo como base 75 observaciones, el modelo que mejor se ajustó a su estudio fue el exponencial, la diferencia radica en que la superficie de análisis es menor a la del Chaco Paraguayo y la cantidad de observaciones es mayor.



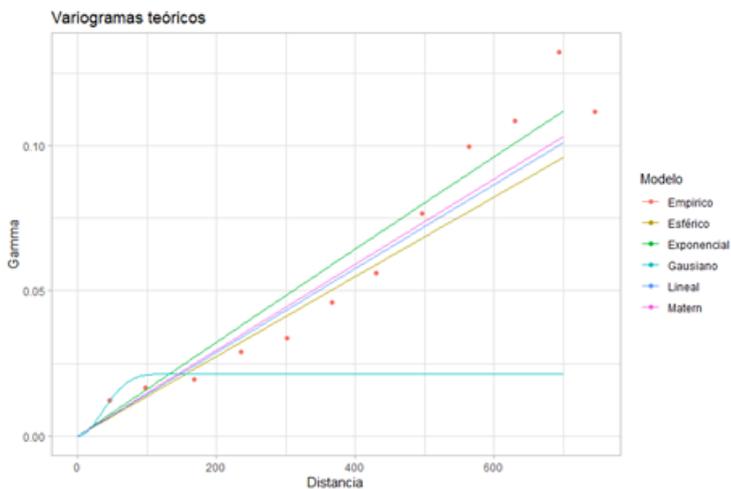
**Figura 6.** Nube y mapa variográfico de los datos de precipitación normalizados. Fuente: elaboración propia.



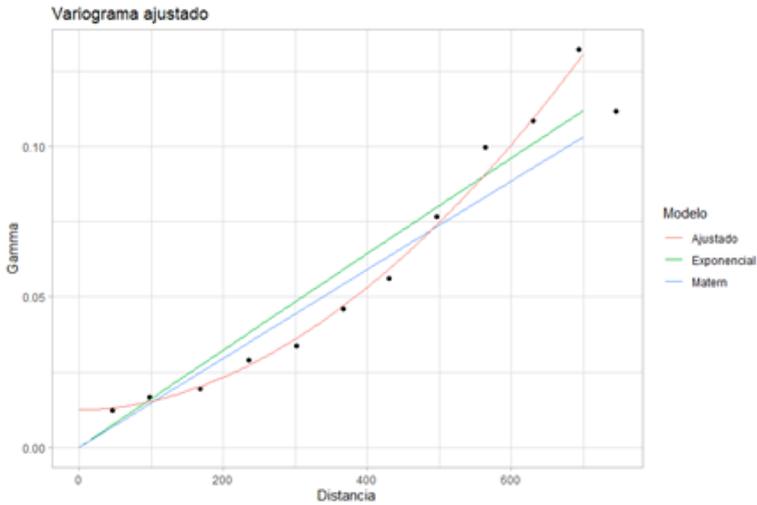
**Figura 7.** Variograma experimental omnidireccional.



**Figura 8.** Análisis de envolventes de los modelos de variogramas teóricos.  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 9.** Variogramas con modelo empírico, esférico, exponencial, gaussiano, lineal y matern. Fuente: elaboración propia.



**Figura 10.** Variograma con ajuste automático (paquete autopmap Rstudio) con base en los mejores modelos.  
Fuente: elaboración propia.

Los modelos que presentan una menor suma cuadrática ponderada con un menor error (RMSE) son el exponencial, esférico, matern y el lineal. Mientras que el modelo con ajuste automático presenta un valor levemente menor que las anteriores (Tabla 2).

**Tabla 2.** Suma cuadrática ponderada de modelos teóricos

<i>Modelo</i>	<i>Suma cuadrática ponderada</i>	<i>RMSE</i>
Exponencial	212.56	200.91
Esférico	200.54	200.91
Gaussiano	7036.60	208.31
Matern	212.56	200.91
Lineal	186.63	200.91
Ajuste automático	14.02	195.41

**Fuente:** elaboración propia.

### 3.3. Interpolaciones de precipitación

Los modelos teóricos con mejor desempeño, se citaron anteriormente; para el modelado de la precipitación se utilizó el modelo con ajuste automático. También se comparó el error cuadrático medio obtenido con las interpolaciones utilizando polígonos de Thiessen y Distancia inversa

ponderada. El modelo con menor error, es el modelo con ajuste automático (Tabla 3), sin embargo, no existe mucha diferencia con el error obtenido con el modelo exponencial, esférico, matern y lineal.

Aragón-Hernandez *et al.* (2019) evaluaron los métodos de interpolación *Kriging*, Thiessen e IDW para estimar la distribución espacial de variables meteorológicas y concluyeron que el *Kriging* ordinario es un buen estimador.

**Tabla 3.** Error cuadrático medio

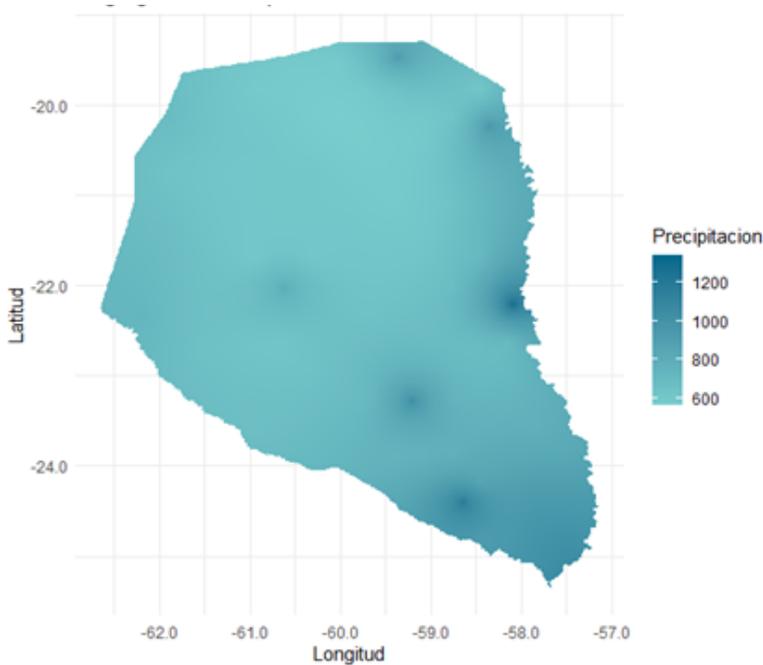
Modelo	RMSE
Ajuste automático	195.41
Thiessen	218.30
IDW	218.30

**Fuente:** elaboración propia.

Se ha visto que los mejores modelos para explicar el comportamiento de la variable de precipitación en la región del Chaco paraguayo son el modelo exponencial, modelo matern, esférico y el lineal sopesando el error cuadrático medio, sin embargo, el error es bastante grande en comparación con otros estudios por la carencia de datos y la gran superficie del área de estudio. Yan-Bing (2002), al realizar un estudio con precipitación en una región de China, bajo un periodo de 37 años con 61 estaciones meteorológicas, concluyó que los cinco modelos estudiados, entre éstos el exponencial, eran buenos para describir la precipitación, pero bajo diferentes circunstancias referentes a los meses de estudio. Entre éstos, el modelo exponencial tendía a subestimar los valores. Sin embargo, no descarta ninguno, ya que todos eran válidos para describir la precipitación del área. Por otra parte, Gundogdu y Guney (2007), probaron distintos modelos de interpolación *Kriging* para describir el comportamiento de agua subterránea y concluyeron que *Kriging* fue un método robusto en general para la descripción de las variables en estudio. Es así que a pesar que el método exponencial tiende a sobreestimar los datos de precipitación, *Kriging* continúa siendo un método viable para la estimación de datos espaciales faltantes. El mapa generado se observa en la Figura 11.

Otra tendencia en el tipo de estudio realizado es la utilización de datos auxiliares como modelos digitales de elevación para describir cómo la precipitación varía con la altitud. Esto lo han hecho autores como Goovaerts (2000), Marquinez *et al.* (2003) y Vargas *et al.* (2009).

Goovaerts (2000) afirmó que los modelos de elevación digital son buenos complementos para la interpolación de precipitación en zonas montañosas, trabajó con 36 estaciones climáticas en la región de Portugal probando tres métodos estadísticos entre ellos *Kriging*, en donde concluyó que es un mejor



**Figura 11.** Kriging de la precipitación anual (1979-2014).

Fuente: elaboración propia.

método cuando la correlación entre precipitación y elevación es moderada, es decir cuando no se tiene en cuenta tanto la elevación. En cambio, Vargas *et al.* (2009), estudiaron para un área en Chile, con solo 11 estaciones, la interpolación de precipitación complementada con modelos de elevación en un área de los Andes. Concluyendo que el *co-kriging* es un mejor modelo de estimación ya que, se puede utilizar información complementaria; igualmente resalta la robustez del método *Kriging*. Por último, Marquinez *et al.* (2003) al realizar un análisis en España con 117 estaciones tomando como referencia un periodo de 24 años de precipitación en una zona montañosa, concluye que existe una ventaja en los métodos de interpolación en donde los datos estimados no dependen precisamente de la densidad de las estaciones meteorológicas, sino que es suficiente con tener estaciones en áreas de topografía similar, aunque se encuentren relativamente separadas por una gran distancia. Con todo esto en el área de estudio, existe la ventaja de que la topografía es prácticamente uniforme, la región del Chaco paraguayo no posee grandes elevaciones y se caracteriza justamente por ser un territorio prácticamente plano sin mesetas o cerros en la mayoría de su territorio, por lo que esto representa una ventaja a la hora de realizar una interpolación sin asistencia de un modelo digital de elevación. Con lo que se cree se ha obtenido un modelo fiable.

## 4. Conclusiones

La geoestadística es una herramienta útil para predecir valores de datos espaciales en zonas carentes de información. La inexistencia de los datos climáticos por ausencia de estaciones meteorológicas es un problema muy común en muchos países, y la aplicación de los análisis geoestadísticos subsana este tipo de limitaciones de infraestructura de monitoreo.

El Chaco es una zona bastante seca y actualmente sufre una gran explotación agropecuaria que implica una fuerte presión en un ecosistema naturalmente frágil, debido a la carencia e inexistencia de datos, el análisis del clima en la zona se vuelve difícil, es por ello que no se puede caracterizar correctamente su situación pasada, actual y futura.

Es de suma importancia la instalación de estaciones meteorológicas en la zona que nos permitan obtener información actualizada y precisa de las condiciones del lugar, con el objeto de predecir eventos futuros, ya que el cambio climático afecta a ecosistemas frágiles como éste.

A través del ajuste con modelos de variogramas teóricos como el exponencial, matern, esférico, lineal, gaussiano y además interpolaciones deterministas como polígonos de thiessen y distancia inversa ponderada, se puede concluir que *Kriging* es un método válido para la caracterización de la precipitación con métodos estocásticos.

De la comparación de los valores obtenidos en el presente estudio, el modelo con ajuste automático, exponencial, matern, lineal y esférico, son los que presentaron un menor RMSE, en ese orden, por lo que se los considera adecuados para la estimación de precipitación en el Chaco paraguayo, a partir del muestreo realizado.

Finalmente, por los resultados expuestos, la presente metodología puede ser aplicada para variables regionalizadas en el ámbito de las ciencias de la Tierra, como son las variables climáticas.

## Bibliografía

- Aragón-Hernández, J. L.; Aguilar-Martínez, G. A.; Velázquez-Ríos, U.; Jiménez-Magaña, M. R. y Maya-Franco, A. (2019). Distribución espacial de variables hidrológicas. Implementación y evaluación de métodos de interpolación. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 20 (2), 1-15.
- Dirección General de Estadísticas, Encuestas y Censos (2018). *Anuario Estadístico 2018*, 346 pp.
- Díaz Cordero, G. (2012). El Cambio Climático. *Ciencia y Sociedad*, XXXVII (2), 227-240.
- Dile, Y. and Srinivasan, R. (2014). Evaluation of CFSR Climate Data for Hydrologic Prediction in Data-Scarce Watersheds: An Application in the Blue Nile River Basin. *Journal of the American Water Resources Association*, 50 (5), 1226-1241.

- Equipo RStudio (2020). *RStudio: Desarrollo integrado para R*. RStudio, PBC, Boston, MA. <http://www.rstudio.com/>.
- Goovaerts, P. (2000) Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, 228 (1-2), 113-129.
- Gundogdu, K. S. and Guney, I. (2007). Spatial analyses of groundwater levels using universal Kriging. *Journal of Earth System Science*, 116 (1), 49-55.
- Hiemstra, P. and Hiemstra M.P. (2013). Package automap. *Compare*, 105 (10).
- Haining, R.; Kerry, R. and Oliver, M. (2010) Geography, Spatial Data Analysis, and Geostatistics: An Overview. *Geographical Analysis*, 42, 7-31.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2014). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.
- Kruck, W. (1998). Proyecto Sistema Ambiental del Chaco: inventario, evaluación y recomendaciones para la protección de los espacios naturales en la Región Occidental del Paraguay, Cooperación Técnica Paraguayo Alemana, Tomo I, Paraguay, 142.
- Marquínez, J.; Lastra, J. and García, P. (2003). Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis. *Journal of Hydrology*, 270 (1-2), 1-11.
- McKinley, J. M.; Atkinson, P. M. (2020). A Special Issue on the Importance of Geostatistics in the Era of Data Science. *Mathematical Geoscience*, 52, 311–315.
- Mereles, M.; Céspedes, G.; Cartes, J.; Goerzen, R.; De Egea, J.; Rodríguez, L.; Yanosky, A.; Villalba, L.; Gustafson, A. and Cacciali, P. (2019). Biological Corridors as a Connectivity Tool in the Region of the Great American Chaco: Identification of Biodiversity Hotspots in the Ecoregions of the Paraguayan Chaco. *Research in Ecology*. <https://www.doi.org/10.30564/re.v2i1.1324>.
- Michaelides, S. C.; Tymvios, F. S. and Michaelidou, T. (2009). Spatial and temporal characteristics of the annual rainfall frequency distribution in Cyprus. *Atmospheric Research*, 94 (4), 606-615.
- Mukhopadhaya, S. (2004). Rainfall Mapping using ordinary Kriging technique: case study: Tunisia. *Journal of Basic and Applied Engineering Resolutions*, 3 (1), 1-5.
- Pebesma, E. J. (2004). Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences*, 30, 683-691.
- Prayogi, A.; Cangara, A.; Muhammad, B. and Baharuddin, A. (2020). The impacts of Paraguayan charcoal export to European markets upon deforestation of Paraguay's Chaco forest. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 575 (1).
- Reyes-Cárdenas, O.; Treviño-Garza, E. J.; Jiménez-Pérez, J.; Aguirre-Calderón, O. A.; Cuéllar-Rodríguez, L. G.; Flores-Garnica, J. G. and Cárdenas-Tristán, A. (2019). Modelización de biomasa forestal aérea mediante técnicas deterministas y estocásticas. *Madera y bosques*, 25(1).

- Vargas, J.; De la Fuente, L. y López, A. (2009). Análisis geoestadístico para describir la distribución espacial de la precipitación de una Cuenca Patagónica. *Aqua-LAC*, 1 (1), 29-41.
- Weiberlen, F. y Báez, J. (2018). Assessment of satellite-based precipitation estimates over Paraguay. *Acta Geophysica*, 66 (3), 369-379.
- Yan-Bing, T. (2002). Comparison of semivariogram models for Kriging monthly rainfall in eastern China. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 3 (5), 584-590.
- Yurrita, E. (2005). *Atlas climático del Chaco paraguayo*. Fundación para el Desarrollo Sustentable del Chaco, Paraguay, 92 pp.





# Evaluación de estimaciones satelitales de precipitación nívea en la cuenca superior del río San Juan, Argentina

## Evaluation of satellite estimates for solid precipitation in the upper San Juan River basin, Argentina

Adriana Lorena Cardús Monserrat<sup>1</sup>

Fecha de recibido: 13 de mayo de 2021

Fecha de aceptado: 15 de noviembre de 2021

### Resumen

El oasis de Tulum, Ullum y Zonda concentra más del 90% de la población de la provincia de San Juan y depende casi exclusivamente del recurso hídrico superficial del río San Juan, cuyo origen es la fusión de nieve en Cordillera. Entre 2010 y 2019, con excepción de los años 2015 y 2016, el volumen de agua que escurrió por dicho río presentó valores anuales entre 675Hm<sup>3</sup> y 1 120Hm<sup>3</sup>, categorizados como ciclos hidrológicos muy secos a secos con cantidades inferiores a los 1 200Hm<sup>3</sup> necesarios para las actividades en el oasis. Debido a la falta de un registro histórico de precipitaciones níveas en la cuenca superior del río San Juan, se recurrió a las estimaciones en base a información satelital Final IMERG (*Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM-Global Precipitation Measurement*); se compararon con las mediciones diarias de una estación meteorológica chilena cercana al límite internacional (2014-2020) y con el derrame anual del río San Juan (DJUA), considerado como índice nival por Poblete y Vera (2019). También se comparó la distribución

<sup>1</sup> Argentina. XLVII Curso Internacional de Geografía Aplicada 2020, Centro Panamericano de Estudios e Investigaciones Geográficas (CEPEIGE), Ecuador. correo electrónico: [acardus123@gmail.com](mailto:acardus123@gmail.com)

espacial de la cobertura de nieve de datos raster Final IMERG GIS con imágenes MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) en los eventos de precipitación nival del año 2020. La asociación entre los datos de precipitación observados, agrupados anualmente, con el DJUA presentó una muy fuerte correlación lineal positiva, con un nivel de significación del 95%. En base al modelo de regresión lineal se obtuvo el pronóstico para el año hidrológico 2020-2021 de 914 Hm<sup>3</sup>. Los datos diarios observados y estimados no tienen correlación; el total de precipitaciones estimadas acumuladas anualmente y el derrame del río San Juan muestran una baja correlación, sin significación estadística. Este resultado podría deberse a los datos puntuales, ya que en el análisis visual de datos raster se observó una concordancia en la distribución espacial entre las precipitaciones estimadas de GPM y la cobertura de nieve en imágenes MODIS para el período nival 2020.

Palabras clave: *precipitación nival, datos satelitales, observaciones meteorológicas, derrame del río San Juan.*

## Abstract

The Tulum, Ullum and Zonda oasis concentrates more of 90 per cent of the population in the San Juan province and depend almost exclusively of surface water resource, whose origin is snow melting at Andes Mountain. Between 2010 and 2019, with the exception of the years 2015 and 2016, the volume of water that flowed through this river presented annual values between 675Hm<sup>3</sup> and 1 120Hm<sup>3</sup>, categorized as very dry-to-dry hydrological cycles with amounts less than 1 200Hm<sup>3</sup> necessary for activities in The oasis. Due to the lack of a historical record of snow precipitation in the upper basin of the San Juan River, estimates based on GPM Final IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM - Global Precipitation Measurement) satellite information were used. These were compared with the daily measurements of a Chilean meteorological station close to the international limit (2014-2020) and with the annual water volume of the San Juan River (DJUA), considered as snow index by Poblete and Vera (2019). The spatial distribution of the snow cover of the Final IMERG GIS raster data was also compared with MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) images in the snowfall events of the year 2020. The association between the observed precipitation data, grouped annually, with the DJUA presented a very strong positive linear correlation, with a significance level of 95%. Based on the linear regression model, the forecast for the hydrological year 2020-2021 of 882 Hm<sup>3</sup> was obtained. The observed and estimated daily data have no correlation; the total estimated annual accumulated precipitation and the volume of water of the San Juan River show a low correlation, without statistical significance. This result could be due to the punctual data, since in a visual analysis of raster data a high

concordance was observed in the spatial distribution between the estimated GPM precipitation and the snow cover in MODIS images for the 2020 snow period.

*Key words: snow precipitation, satellite data, meteorological observations, volume of water in the San Juan River.*

## Introducción

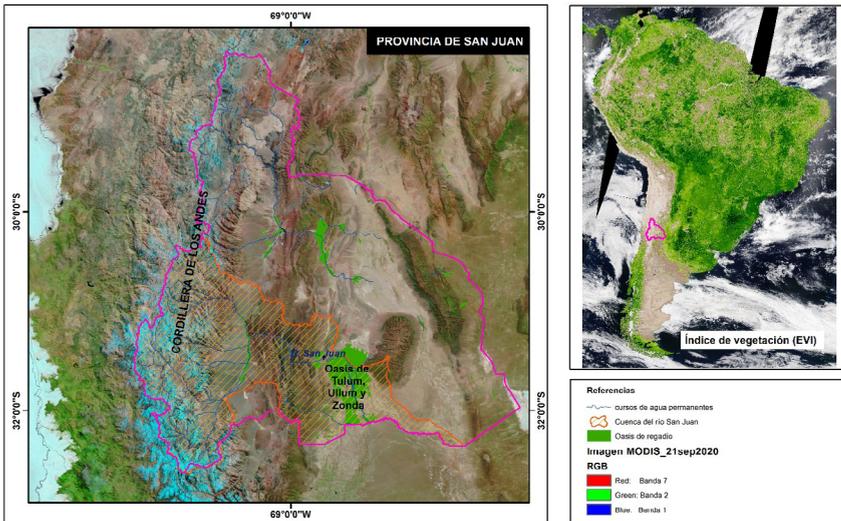
La provincia de San Juan, Argentina, se ubica en la diagonal árida de Sudamérica. Ésta se extiende sin interrupción desde las proximidades del Ecuador en el océano Pacífico (5° S) hasta el litoral Atlántico en su extremo meridional. Se caracteriza por la escasez de agua debido a una combinación de factores como la presencia de la corriente fría de Humboldt, el enfriamiento producido por la surgencia de aguas profundas y la inversión térmica del alisio, lo que inhibe las precipitaciones en el desierto costero del Pacífico. Por otra parte, en el sector patagónico argentino la aridez se atribuye a la barrera orográfica de la Cordillera de los Andes con respecto a los vientos del oeste (Bruniard, 1986). La provincia de San Juan recibe escasa humedad proveniente del océano Atlántico debido a la distancia; mientras que, en el sector occidental es la cordillera mencionada la que limita el ingreso de masas de aire húmedo provenientes del océano Pacífico.

El oasis de regadío de Tulum, Ullum y Zonda (Figura 1) se ubica en el centro sur de la provincia, caracterizado por un clima seco de desierto o árido con precipitaciones medias inferiores a 100 mm anuales (Poblete y Minetti, 1989), sin embargo presenta la mayor superficie cultivada, con 90.000 ha aproximadamente (Departamento de Hidráulica, 2007) y concentra más del 90% de la población provincial según el último censo poblacional del año 2010 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina (INDEC).

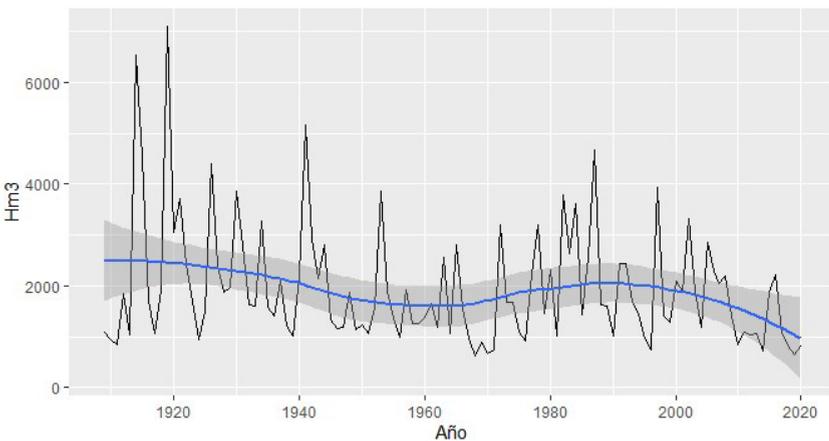
El desarrollo del mayor oasis provincial fue posible debido al aprovechamiento del recurso hídrico disponible principalmente en el río San Juan, cuyo derrame anual presenta una media de 1 966Hm<sup>3</sup> y una mediana de 1 640Hm<sup>3</sup> para el período 1909 a 2019 y drena el agua de la fusión de nieve de Cordillera de los Andes donde las precipitaciones medias son de 400 mm anuales, en forma de nieve durante el invierno a una altitud de más de 3 300 msnm.

La variabilidad interanual de las precipitaciones niveas se evidencia en los derrames anuales del río San Juan, considerado por Poblete (2019) como un índice nival. Con la excepción del ciclo hidrológico 2016-2017, desde el año 2009 se registraron valores por debajo de la media, con mínimos en los períodos 2010-2011 (854Hm<sup>3</sup>), 2014-2015 (724Hm<sup>3</sup>), 2018-2019 (825Hm<sup>3</sup>) y 2019-2020 (650Hm<sup>3</sup>) (Figura 2). El pronóstico presentado por el Departamento

de Hidráulica (Gobierno de San Juan) para el período 2020-2021 es de 815Hm<sup>3</sup>, considerado de régimen “muy seco”.



**Figura 1.** Área de estudio. Imagen satelital que muestra con color cian la acumulación de nieve en cordillera en el mes de septiembre de 2020 (final del período nival). Fuente: elaboración propia en base a imagen MODIS. <https://wvs.earthdata.nasa.gov/>



**Figura 2.** Derrame anual del río San Juan entre los años 1909 y 2020. Fuente: Departamento de Hidráulica, Gobierno de San Juan (año).

En el caso particular de Cuyo, las tendencias de los caudales de algunos ríos en el norte de Mendoza y en San Juan a lo largo del siglo XX parecen indicar menores precipitaciones en sus altas cuencas. Si esta tendencia continúa se restringiría la disponibilidad de agua de riego necesaria para mantener los niveles actuales de la actividad vitivinícola y frutihortícola en los oasis de riego (Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2015).

En el informe de la Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2015), se presentaron las proyecciones realizadas en base al modelo climático *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5) para un futuro cercano (2015-2039) y otro lejano (2075-2099) y para dos escenarios *Representative Concentration Pathways* (RCP) definidos por el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). En el RCP4.5 la temperatura global sería de por lo menos 2 °C; el RCP8.5 constituye el escenario más extremo con un incremento en la temperatura superior a 3 °C.

En dicho informe se menciona que la región Cordillerana, en la que se encuentra la provincia de San Juan, experimentaría un incremento de 1 °C en la temperatura media en el futuro cercano, independientemente del escenario; mientras que, en el clima futuro a largo plazo para un escenario RCP8.5, el aumento sería entre 3,5 °C y 7 °C.

Asimismo, se proyecta una disminución del 10% en las precipitaciones medias anuales en el oeste de la zona cordillerana (Altos Andes), aunque existe una incerteza al respecto ya que el valor que arroja el modelo se encuentra dentro del margen de error.

La escasez en las precipitaciones níveas por períodos prolongados son causantes de crisis hídricas, y afecta todos los aspectos de la relación hombre-medio en la provincia de San Juan; por lo tanto la disponibilidad de datos resulta de interés para abordar cualquier proyección y la consecuente planificación de ordenación territorial.

Debido a la situación antes mencionada se pretende analizar las diferentes fuentes de datos de las precipitaciones disponibles, ya se trate de observaciones en terreno o de estimaciones generadas con base a mediciones indirectas obtenidas de sensores remotos satelitales.

Una fuente de datos satelitales de interés por su resolución temporal (cada tres horas) y espacial (0.1° por pixel, 11 km a la latitud de 30° S) y por su cobertura global es la misión satelital *Global Precipitation Measurement* (GPM) que reúne información de una constelación de satélites. El producto recomendado para investigación, disponible tres a cuatro meses después de obtenida la información, aplica un algoritmo denominado *Integrated Multi-satellite Retrieval* (IMERG) y las estimaciones resultantes son calibradas

por datos auxiliares. Una mejora de GPM *Core Observatory* respecto de su antecesor *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) es la incorporación de un radar que detecta frecuencias con mayor sensibilidad a precipitaciones leves, así como también el uso de canales de alta frecuencia en las microondas que permiten detectar la precipitación sólida (Huffman *et al.*, 2014).

Siguiendo a Poblete y Vera (2019), “Debido a la insuficiencia de mediciones nivales que abarquen un período mayor que 100 años en los Andes Áridos, se emplea como índice para estimarlas a los registros de los derrames anuales del río San Juan (DJUA)”, se considera el derrame anual del río San Juan como un dato certero, puesto que “representa lo sucedido en la temporada nival correspondiente”, y con esta base se pretende analizar la relación con los datos satelitales y las escasas observaciones meteorológicas del área de estudio.

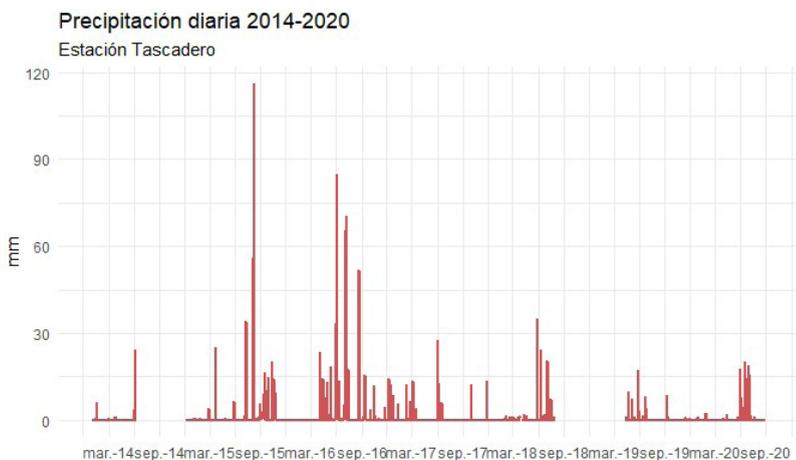
El objetivo de este trabajo es evaluar la correspondencia entre datos diarios de precipitación observados en terreno y los estimados con base a información satelital en la cuenca superior del río San Juan (Cordillera de los Andes); así como su relación con el índice nival DJUA.

## Metodología

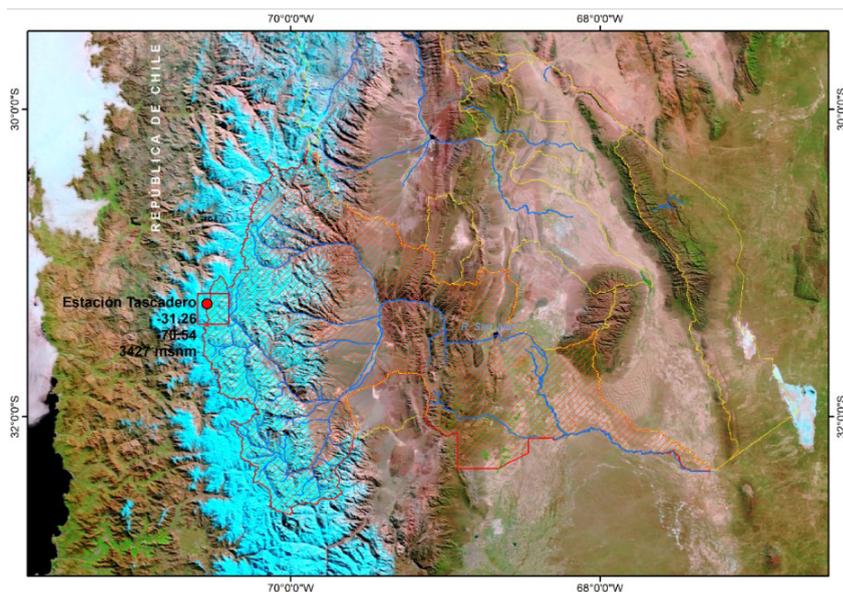
Se dispone de observaciones diarias de la variable precipitación, correspondiente a la estación Tascadero (-31.263, -70.54, 3 427 msnm) desde el 1 de enero de 2014 hasta el 31 de agosto de 2020. Los datos son provistos por el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) y presentan una completitud del 81.93 % de la serie temporal en el período analizado. El faltante de datos corresponde a los períodos de junio a diciembre de 2014 y de agosto de 2018 a abril de 2019; lo que comprende parte de la temporada nival de interés para este estudio (Figura 3).

Para la evaluación de los datos estimados de precipitación Final IMERG de GPM se delimitó un área de cuatro píxeles cercanos a la estación Tascadero entre las coordenadas: -70.4°, -31.2° y -70.6°, -31.4° y se descargó el promedio de dicha área correspondiente a precipitación acumulada por día (mm) para el período 2014-2020 (disponibles hasta el 31 de agosto de 2020) en formato .csv desde la Web <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/> (EarthDATA de la NASA) (Figura 4 y Figura 5).

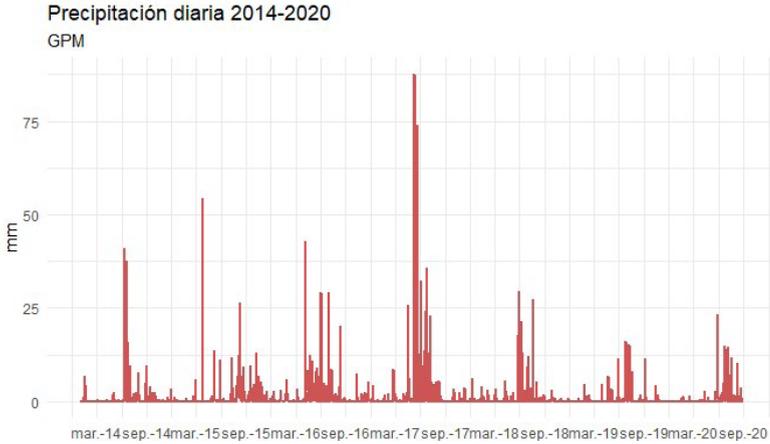
Para evaluar la correlación entre los datos de precipitaciones diarias de las estimaciones obtenidas del algoritmo Final IMERG de GPM y las observaciones medidas en la estación meteorológica Tascadero, se utilizó el test de correlación de Pearson y gráfico de dispersión. Previamente se eliminaron los registros de las fechas sin datos de la serie de Tascadero y se redujo de 2 435 a 1 995 datos.



**Figura 3.** Serie temporal de la estación Tascadero.  
Fuente: datos provistos por CEAZA. [www.ceazamet.cl](http://www.ceazamet.cl), 2019.



**Figura 4.** Ubicación de la estación Tascadero.  
Fuente: elaboración propia en base a imagen MODIS (14 de julio de 2020).  
<https://wvs.earthdata.nasa.gov/>



**Figura 5.** Serie temporal GPM.

Fuente: EarthDATA de la NASA. <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

Considerando que el derrame del río San Juan se utiliza como índice nival, se efectuó el agrupamiento de los datos de precipitación diaria y se obtuvo el total acumulado para cada año, con el fin de evaluar el grado de asociación de cada serie temporal con respecto al índice DJUA con el test de correlación de Pearson. Además se aplicó un modelo de regresión lineal para realizar un pronóstico del derrame anual del río San Juan para el período 2020-2021.

También se comparó visualmente la distribución espacial de la cobertura de nieve de datos raster Final IMERG GIS con imágenes MODIS en los eventos de precipitación nival del año 2020.

## Resultados

Una primera aproximación al conocimiento de las series temporales se realizó mediante análisis exploratorio con medidas resumen y gráfico boxplot.

Las medidas que se presentan en la Tabla 1 caracterizan la ocurrencia de precipitaciones níveas en el área de estudio. De las 1 995 mediciones en terreno, más del 75% de los días no se registraron precipitaciones; mientras que, en las estimaciones derivadas de sensores remotos sucedió lo mismo pero en la mitad de los 2 435 días analizados. El valor del 3° *cuartil* difiere en ambas bases de datos, destacándose una sobreestimación de las precipitaciones en un 25% de los días.

De la comparación de los valores máximos se destaca que GPM subestima eventos de precipitaciones extremas máximas con respecto a las observaciones de la estación meteorológica.

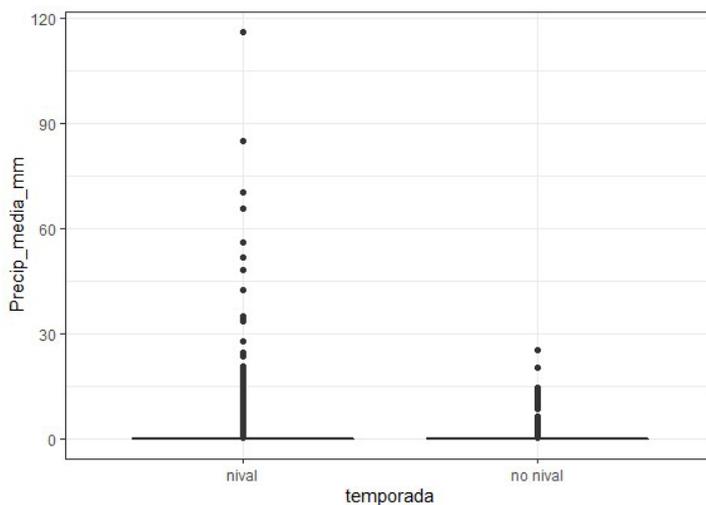
En ambos casos, el coeficiente de variación evidencia una variabilidad de los datos respecto de la media extremadamente alta, con una distribución

muy asimétrica positiva, lo que se corresponde con la característica ocasional de las nevadas.

**Tabla 1.** Medidas resumen de la serie temporal anual

Medidas	Estación Tascadero	Final IMERG GPM
Mínimo	0.0	0.000000000
1° cuartil	0.0	0.000000000
Mediana	0.0	0.003856036
3° cuartil	0.0	0.268236175
Máximo	115.9	87.437492400
Media	0.9034085	1.015371
Desvío estándar	5.332994	4.453786
Coefficiente de variación	5.90	4.38
n	1 995	2 435

Las precipitaciones níveas en el área de estudio son eventos puntuales en el tiempo, lo que se visualiza en el gráfico boxplot de la estación Tascadero, con todos los puntos por encima del rango intercuartílico (0 mm), considerados estadísticamente como valores “atípicos”, mayormente en la temporada nival; aunque también se observan “outliers” fuera de la temporada por la ocurrencia de precipitaciones níveas tempranas o tardías como las de marzo y octubre de 2015, respectivamente (Figura 6).



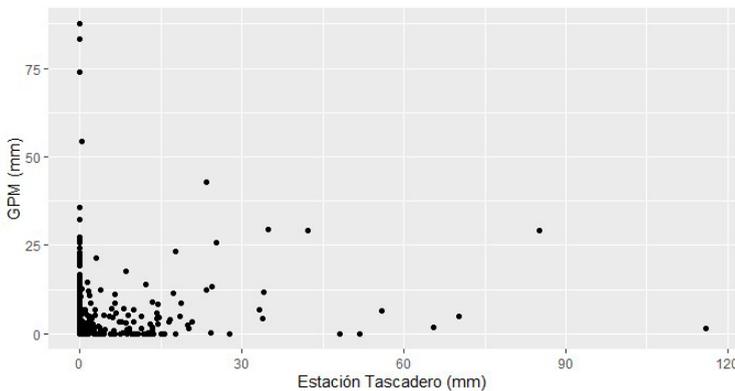
**Figura 6.** Gráfico boxplot de precipitación diaria de la estación meteorológica Tascadero.

Si se considera sólo la temporada nival, el resultado de las medidas descriptivas es similar al anual (Tabla 2). La estación Tascadero registra el 75% de los 1 062 días analizados sin precipitaciones, por lo que éstas ocurrieron en eventos muy puntuales; no obstante el valor de la media aumentó a 1.415 mm. El 75% de las estimaciones de GPM tienen un valor debajo de 0.64067 mm, con una media de 1.64293 mm.

**Tabla 2.** Medidas resumen de la serie temporal de abril a septiembre

<i>Medidas</i>	<i>Estación Tascadero</i>	<i>Final IMERG GPM</i>
Mínimo	0.000	0.00000
1º <i>cuartil</i>	0.000	0.00000
Mediana	0.000	0.02037
3º <i>cuartil</i>	0.000	0.64067
Máximo	115.900	87.43749
Media	1.415	1.64293
n	1 062	1 251

El coeficiente de correlación de Pearson ( $r= 0.2012687$ ) muestra que no existe una asociación lineal entre ambas bases de datos de precipitaciones diarias (observaciones en terreno y estimaciones por sensores remotos); lo que se verifica en el gráfico de dispersión que, además de la concentración de datos cercanos al valor 0 se observa una subestimación de valores elevados registrados en la estación meteorológica pero no detectados por los sensores y una sobreestimación en otras ocasiones. La prueba de hipótesis señala que esta falta de asociación es significativa en un 95% (Figura 7).



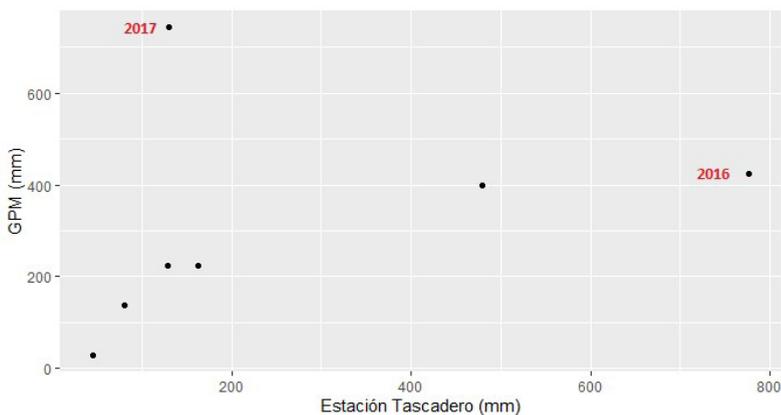
**Figura 7.** Gráfico de dispersión entre las precipitaciones diarias de las mediciones en la estación Tascadero y las estimaciones de GPM.

En la Tabla 3 se presentan los datos de precipitación acumulada anual de la estación Tascadero y de GPM (con datos faltantes en los años 2014, 2018, 2019 y 2020), así como también el derrame anual del río San Juan.

**Tabla 3.** Datos acumulados anuales

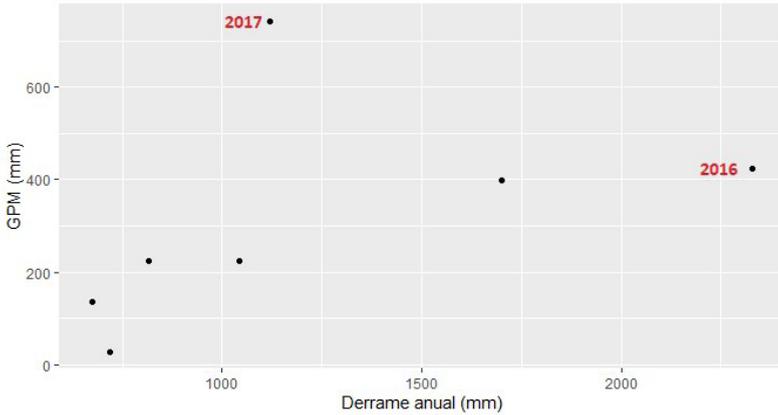
Año	Precipitación acumulada (mm)			Derrame anual del río San Juan (Hm <sup>3</sup> ) (365 días)
	Estación Tascadero	GPM	Días	
2014	45.3	28.36114	183	719
2015	479.5	397.80442	365	1 702
2016	776.7	423.68171	366	2 329
2017	129.7	742.75610	365	1 120
2018	162.2	223.79806	206	1 042
2019	80.7	137.16381	266	675
2020	128.2	223.89604	244	815

En las observaciones y estimaciones agrupadas anualmente se observa un aumento del coeficiente de correlación de Pearson ( $r= 0.3487802$ ), aunque no es estadísticamente significativo. La mayor discrepancia se observa en la cantidad total de precipitaciones de los años 2016 y 2017; en el primer caso fueron subestimadas por la mitad y en el segundo caso fueron sobrestimadas casi seis veces (Figura 8).

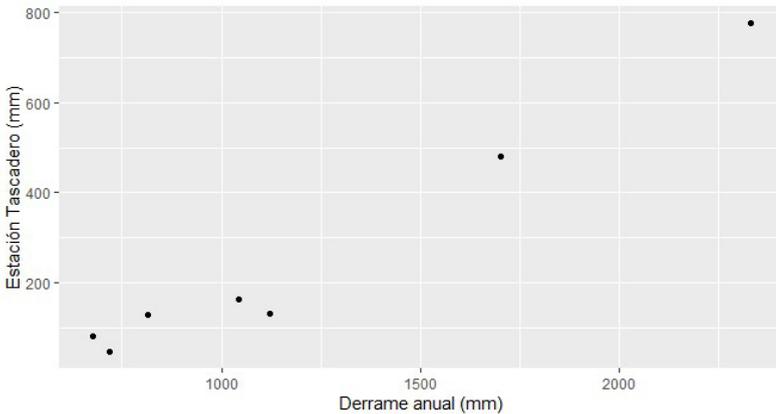


**Figura 8.** Gráfico de dispersión de las precipitaciones acumuladas anuales de las mediciones en la estación Tascadero y las estimaciones de GPM.

La correlación de las estimaciones de precipitación anual acumulada con el derrame anual del río San Juan arrojó un  $r = 0.4793928$  pero no es significativo estadísticamente, por lo que no se asegura una asociación lineal entre las precipitaciones estimadas desde sensores remotos (GPM) y el índice nival (DJUA) (Figura 9). Por otra parte, la correlación entre los totales anuales acumulados de las precipitaciones medidas en la estación Tascadero y DJUA es positiva y muy fuerte con un  $r = 0.9835188$  y un nivel de significación del 95% (Figura 10).



**Figura 9.** Gráfico de dispersión entre las estimaciones de precipitación anual acumulada de GPM y el derrame anual del río San Juan.

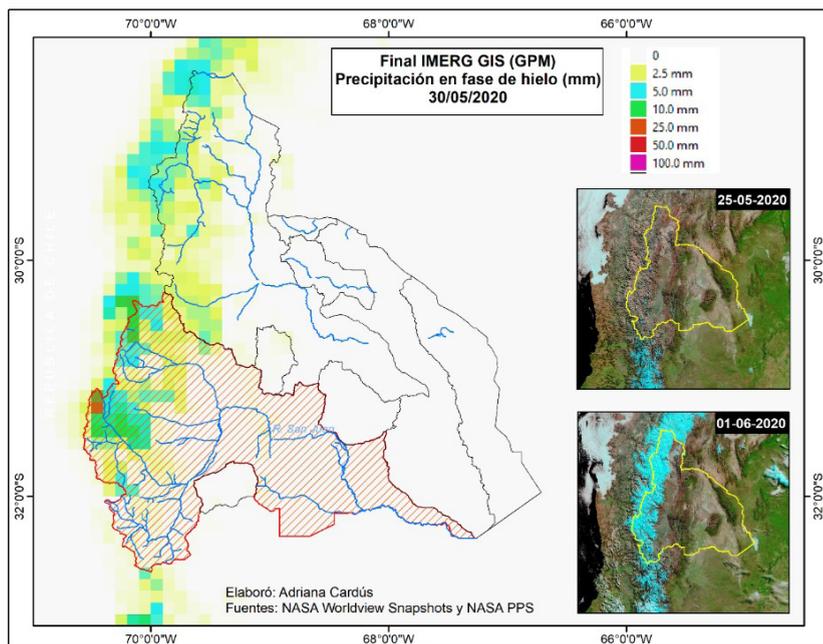


**Figura 10.** Gráfico de dispersión entre las mediciones de precipitación anual acumulada de la estación Tascadero y el derrame anual del río San Juan.

En base a esta última correlación se obtuvo el modelo de regresión lineal; los parámetros de ajuste de la recta estimados con un 95% de significación estadística son la intersección con el eje  $y= 630.6338$  y la pendiente de la recta  $= 2.2124$ . El coeficiente de determinación ( $R^2= 0.96$ ) indica que el 96% de la variación del derrame del río San Juan se puede explicar por la variación de las precipitaciones en la estación Tascadero. Por último, dado que el test de Shapiro que se aplicó a los residuos del modelo ( $W= 0.93567$ ) confirma la normalidad de los mismos, se calculó el derrame anual del río San Juan 2020-2021 obteniendo un pronóstico de  $914 \text{ Hm}^3$ .

El análisis visual de las capas raster Final IMERG GIS en formato GeoTIFF de la misión GPM disponible en el Sistema de Procesamiento de Precipitación (PPS) de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) para los eventos de precipitación nívea ocurridos el presente año muestra una concordancia con las imágenes MODIS que expone la cubierta de nieve anterior y posterior al evento considerado.

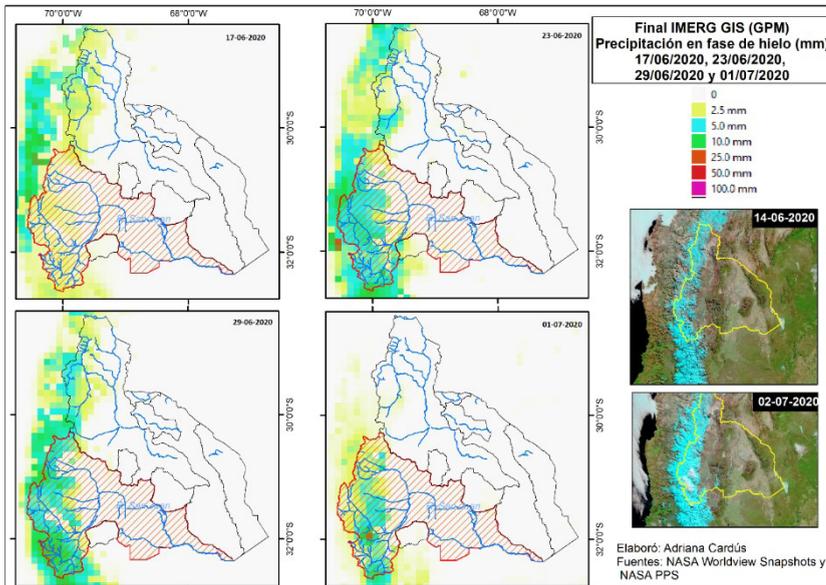
Las estimaciones GPM para el 30 de mayo de 2020 indican que las mayores precipitaciones níveas ocurrieron al norte de los  $32^\circ \text{ S}$ ; mientras que, hacia el sur hasta los  $33^\circ \text{ S}$  las precipitaciones fueron exiguas. Esto se verifica en la imagen en falso color MODIS que muestra en color cian una mayor acumulación de



**Figura 11.** Estimación de precipitaciones sólidas correspondientes al 30 de mayo de 2020. Imágenes MODIS muestran la cobertura de nieve antes y después.

nieve en el norte de la provincia y escasa cobertura de nieve al sur de los 32° S (Figura 11). Esta distribución espacial de la cobertura de nieve en la fecha indicada podría adjudicarse al ingreso de masas húmedas de origen tropical.

Otros eventos de precipitaciones níveas ocurrieron el 17, 23 y 29 de junio y el 1 de julio del 2020, siendo los tres últimos los que presentan mayor distribución en la cuenca del río San Juan. En la imagen del 2 de julio de 2020 se observa la extensión de la cobertura de nieve respecto de la imagen anterior (14 de junio de 2020) a la sucesión de nevadas mencionadas (Figura 12).



**Figura 12.** Estimación de precipitaciones sólidas correspondientes a cuatro días, entre el 17 de junio y el 1 de julio de 2020. Imágenes MODIS muestran la cobertura de nieve antes y después de las nevadas.

## Conclusiones

Debido a la carencia de una base de datos completa con más de 30 años de registros de observaciones en el área de estudio en relación a la variable precipitación sólida como se recomienda para estudios climáticos, los resultados que se exponen en el presente trabajo deben considerarse sólo como un ejercicio de aplicación en una instancia previa que impulse sucesivos estudios hidro-climáticos relacionados con la variación espacial y temporal de la cubierta de nieve en cordillera.

En base al objetivo de este trabajo, fundamentado en la necesidad de disponer de datos sistemáticos de precipitaciones níveas en la cuenca alta del río San Juan, se evaluó la correlación de Pearson entre las fuentes analizadas.

Con un valor de  $r = 0.2$  se afirma una falta de correlación significativa entre los datos diarios de precipitación observados en terreno en la estación meteorológica Tascadero y los estimados con base a información satelital en un área de  $20 \times 20$  km conformada por los cuatro pixeles cercanos a dicha estación. En cuanto a la relación entre los datos de origen satelital, considerando los valores de precipitaciones anuales acumuladas, y el derrame del río San Juan se confirma que la correlación entre GPM y DJUA, con un  $r = 0.4$ , no es significativa, sino que se debe al agrupamiento anual de los datos diarios.

Por otra parte, el análisis de correlación realizado entre las mediciones de la estación Tascadero y el DJUA muestra una muy fuerte asociación lineal positiva, con un valor de  $r = 0.98$  y un nivel de significación del 95%.

En este último caso se aplicó el modelo de regresión lineal cuyos parámetros de ajuste a la recta son estadísticamente significativos al 95%, con un  $R^2 = 0.96$ . Este modelo arrojó un pronóstico de derrame del río San Juan para el año 2020-2021 de  $914 \text{Hm}^3$ , levemente superior a los  $815 \text{Hm}^3$  pronosticados por el Departamento de Hidráulica (Gobierno de San Juan) para el mismo período.

Otra manera de evaluar la correspondencia entre datos diarios de precipitación observados en terreno y los estimados en base a información satelital en la cuenca superior del río San Juan se basó en la técnica de análisis visual.

Los eventos de precipitación nival más destacados del año 2020 corresponden a las fechas 30 de mayo, 17 de junio, 23 de junio, 29 de junio y 1 de julio, según los datos de la estación Tascadero, los que fueron registrados por los satélites y se representan en las capas raster de precipitación sólida diaria estimadas por GPM.

Al analizar visualmente la imagen MODIS del 1 de junio de 2020, se evidencia una mayor acumulación de nieve hacia el norte provincial. El raster de GPM correspondiente al día del evento nival (30 de mayo de 2020), muestra que las precipitaciones se concentraron principalmente al norte de los  $32^\circ$  de latitud sur.

En cuanto a la imagen MODIS del 2 de julio de 2020 presenta una mayor extensión de nieve acumulada en superficie respecto de la imagen anterior (14 de junio de 2020) como resultado de las nevadas sucesivas de junio y julio (17, 23, 29 de junio y 1 de julio). Éstas últimas fechas también se observan en las estimaciones raster de GPM.

A pesar de que el análisis puntual de los datos GPM en el entorno de la estación Tascadero no presentó una correlación significativa con el DJUA, el análisis visual entre las imágenes MODIS y los raster de GPM a escala provincial de los eventos nivales destacados en el año 2020 indica una buena correspondencia; por eso se propone continuar con la evaluación de los mismos a escala de cuenca o subcuenca.

## Bibliografía

- Asurza Véliz, F. A., Ramos Taipe, C. L., y Lavado Casimiro, W. S. (2018). Evaluación de los productos Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y Global Precipitation Measurement (GPM) en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huancané, Perú. *Scientia Agropecuaria*, 9 (1), 53-62.
- Bruniard, E. (1986). *Singularidades climáticas de América del Sur (Vol. 6)*. Asociación para la promoción de sistemas educativos no convencionales.
- Cantabria, C. T. I. (2020). *Guía para el análisis detallado de riesgo climático*.
- Departamento de Hidráulica, Gobierno de San Juan (2007). *Relevamiento agrícola en la provincia de San Juan, ciclo 2006-2007*. <http://www.hidraulica.sanjuan.gov.ar/datos%20y%20estadisticas/agricola.php>
- Eduardo, A. P. G., Luis, V. C. J. y Jácome Pablo, S. (2016). *Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de Cambio Climático*.
- Hoyos, D. M. B. y Consultora, B. P. R. B. I. D. (2015). *Precipitación histórica mediante serie temporal de datos TRMM*.
- (INDEC) (2010). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. República Argentina. <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-CensoProvincia-999-999-70-000-2010>
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Kidd, C. and Xie, P. (2014). NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM (IMERG). *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 4.4. Version, 4, 26*.
- (NASA) (2019). *The IMERG multi-satellite precipitation estimates reformatted as 2-byte GeoTIFF files for display in a Geographic Information System (GIS)*. <https://pps.gsfc.nasa.gov/Documents/README.GIS.pdf>
- Poblete, A. G. y Minetti, J. L. (1989). Los mesoclimas de San Juan. Primera y segunda parte. Informe Técnico, 11, 31-32.
- Poblete, A. G., Atencio, M. A., Vera, M. J. (2017). Cuantificación de la incidencia del ENSO en las nevadas de los Andes áridos de Sudamérica en el periodo 1909-2015. *Geográfica digital*, 14 (27), 1-15. <https://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo27/archivos/verapoblete27.pdf>
- Poblete, A., y Vera, M. J. (2019). Análisis climatológico dinámico de la transición entre el período nival seco 2010-2014 a uno normal 2015-2016, en los Andes Áridos. *Revista Geográfica*, (158), 107-129. <https://revistasipgh.org/index.php/regeo/article/view/205>
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (2015). Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. *Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones*.



# Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos con CMIP5 para el Perú

## Statistical Regionalization of Climate Scenarios with CMIP5 for Peru

Jorge Llamocca Huamani<sup>1</sup>

Fecha de recibido: 9 de julio de 2021

Fecha de aceptado: 7 de diciembre de 2021

### Resumen

Los Modelos de Circulación General (MCGs) actualmente tienen un rol importante como herramienta para identificar cambios importantes del sistema climático para las siguientes décadas; éstas permiten simular flujos de energía, masa y cantidad de movimiento en cada grilla tridimensional distribuida espacialmente. Sin embargo; la resolución espacial de estos modelos dinámicos son demasiados gruesos (>250km) y considerados como principal desventaja al momento de realizar estudios localizados. En ese sentido, la presente investigación prioriza la aplicación de técnicas de regionalización estadística, poniendo énfasis en áreas específicas. Uno de los principales resultados está centrado en obtener los mapas regionalizados de las proyecciones climáticas de precipitación, temperatura máxima y mínima del aire para Perú y en un contexto de los escenarios Climáticos del Quinto Reporte de Evaluación-AR5-2014 del IPCC-RCP45 & RCP85. Los mapas regionalizados se calcularon para un grupo de cuatro modelos (modelos climáticos globales del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplado-CMIP5) y que fueron seleccionados mediante la aplicación de métricas

<sup>1</sup> Perú. XLVII Curso Internacional de Geografía Aplicada 2020, Centro Panamericano de Estudios e Investigaciones Geográficas (CEPEIGE), Ecuador, correo electrónico: [jllamocca1@gmail.com](mailto:jllamocca1@gmail.com)

estadísticas. Las proyecciones bajo los dos escenarios están centradas en el periodo futuro 2041-2070, tomando como periodo climático referencial 1981-2005. Se analizaron cada uno de los cuatro modelos seleccionados permitiendo observar la distribución espacial de las variables focalizados en áreas de interés. Los resultados a nivel anual muestran que en general existe el posible aumento de la temperatura mínima del aire, con rangos que varían entre 1.5 °C a 1.8 °C bajo el RCP4.5 y 2.6 °C a 3.7 °C bajo el RCP8.5, para la temperatura máxima del aire de 1.6 °C a 1.8 °C bajo el RCP4.5 y 2.7°C a 3.9 °C bajo el RCP8.5. Estos incrementos en general estarían más centrados en la selva baja norte, centro y sur de Perú. Para la precipitación, bajo los dos escenarios RCP, varía según el área de análisis evidenciando los incrementos significativos para la costa norte y costa centro de Perú entre 20% a 10% respectivamente y estarían asociados con la dinámica del océano, principalmente del pacífico central y oriental. Para la costa sur las proyecciones muestran deficiencias entre -10% a -20%; sin embargo, para zona andina centro y sur, las proyecciones son de incremento al 20% y estarían asociadas a la teleconexión que existe entre el Pacífico Central y la zona andina de Perú. Por otro lado, las proyecciones son de reducción para la selva baja entre -12% y -20%.

*Palabras claves: cambio climático, variabilidad climática, regionalización estadística, precipitación, temperatura, Perú, CMIP5, RCPs.*

## **Abstract**

General Circulation Models (GCMs) are currently playing an important role as a tool to identify important changes in the climate system during the following decades; These allow the simulation of flows of energy, mass and momentum in each spatially distributed three-dimensional grid. Nevertheless; the spatial resolution of these dynamic models are too thick (> 250km) and considered as the main disadvantage when conducting localized studies. In this sense, this research prioritizes the application of statistical regionalization techniques, placing emphasis on specific areas. One of the main results is focused on obtaining the regionalized maps of the climate projections of precipitation, maximum and minimum air temperature for Peru and in a context of the Climate scenarios of the Fifth Assessment Report-AR5-2014 of the IPCC - RCP45 & RCP85. The regionalized maps were calculated for a group of 4 models (global climate models of the Coupled Models Intercomparison Project - CMIP5) mainly and that were selected by applying statistical metrics. The projections under each of the two scenarios are focused on the future period 2041-2070, taking 1981-2005 as the referential climate period. Each of the 4 selected models were analyzed allowing to observe the spatial distribution of the variables focused on areas of interest. The annual results show that in general there is a possible increase in the minimum air temperature, with

ranges that vary between 1.5 °C to 1.8 °C under RCP4.5 and 2.6 °C to 3.7 °C under RCP8.5. , for the maximum air temperature of 1.6 °C to 1.8 °C under RCP4.5 and 2.7 °C to 3.9 °C under RCP8.5. These increases in general would be more focused on the northern, central and southern lowland forest. For precipitation under the two scenarios RCP varies according to the area of analysis, showing significant increases for the north coast and central coast of Peru between 20% and 10% respectively and would be associated with the dynamics of the ocean, mainly the central and eastern Pacific. For the south coast the projections show deficiencies between -10% to -20%; However, for the central and southern Andean areas, the projections are for an increase to 20% and would be associated with the teleconnection that exists between the Central Pacific and the Andean area of Peru. On the other hand, the projections are for a reduction for the lowland forest between -12% to -20%.

*Key words: climate change, climate variability, statistical regionalization, precipitation, temperature, Peru, CMIP, RCPs.*

## 1. Introducción

Esta investigación tiene como premisa que el clima es un sistema dinámico, complejo y caótico, resultado de las diversas interacciones de los componentes del sistema climático, que tienen un comportamiento no lineal (Beersma *et al.*, 2003).

Actualmente existe la tendencia de elaborar información grillada y de alta resolución debido a que en los últimos años se ha tenido mayor libertad al acceso de infraestructura de computación moderna y como consecuencia los diversos centros internacionales ponen a disposición más de 60 Modelos de Circulación General Océano – Atmósfera (AOGCM) así como los resultados productos de simulaciones históricas y futuras, con resoluciones espaciales que varían entre 150 km a 250 km.

Esta investigación tiene por objetivo, de realizar el análisis de escenarios climáticos de la precipitación, temperatura máxima y mínima del aire para Perú, bajo los escenarios de Cambio Climático del Quinto Reporte de Evaluación (AR5) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Para ello se calculó los escenarios regionales de los modelos climáticos globales seleccionados del proyecto CMIP5 y se realizó una evaluación histórica con una reducción de escala a 25km<sup>2</sup> usando el método Delta, referido a la línea base climática Reanálisis ERA5-Land del periodo 1981-2005. ERA5-Land es un conjunto de datos de Reanálisis que proporciona una visión coherente de la evolución de las variables de la superficie durante varias décadas con una resolución mejorada. El Reanálisis combina referencias de modelos con observaciones de todo el mundo en un conjunto de datos globalmente completo y consistente que

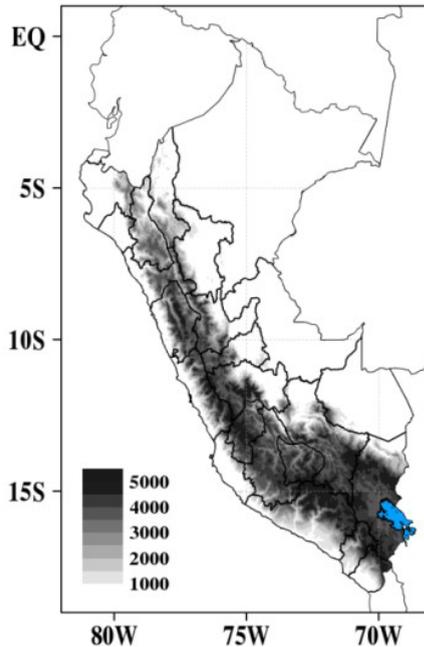
utiliza las leyes de la física remontándose a varias décadas, proporcionando una descripción precisa del clima del pasado (Muñoz-Sabater, J., 2011).

Los escenarios utilizados son RCP4.5 y RCP8.5, los cuales tienen resolución temporal mensual en cada uno de los periodos climáticos futuros; 2011-2040 2041-2070 (caso de estudio) y 2071-2100. Además, se analiza como estos modelos globales a pesar de su “gruesa resolución espacial” proyectan los cambios en la precipitación, temperatura máxima y mínima del aire en el periodo 2041-2070 según el escenario pesimista de alta emisión de gases de efecto invernadero RCP8.5 y moderada emisión RCP4.5. Los resultados más relevantes son presentados al final de la investigación y este análisis pueda contribuir a la gestión de los cambios climáticos, focalizados en reconocer iniciativas que desarrollen medidas destacadas de adaptación y mitigación del cambio climático.

## 2. Herramientas y Metodología

### 2.1. Área de estudio

El área de estudio comprende el territorio nacional dominada por la complejidad topográfica correspondiente a los andes de Perú que varía desde



**Figura 1.** Área de estudio.

los 3 000 a 5 000 msnm. Esta variable permite tener una amplia diversidad de tipos de suelo y climas donde la parametrización de un modelo global es totalmente relevante en la simulación en su proceso de aproximación a lo real (Figura 1).

## 2.2 Base datos

Los Modelos de Circulación General (GCM), son una representación numérica tridimensional de la dinámica atmosférica y son herramientas importantes para mejorar la comprensión y la previsibilidad del comportamiento climático en las diferentes escalas temporales y espaciales. Estos modelos representan en cierta medida los procesos físicos del sistema climático que comprende la atmósfera, los océanos, la criósfera, la superficie terrestre, y en la actualidad es la herramienta disponible más avanzada que existe para simular proyecciones como escenarios futuros del sistema climático global ante los aumentos en los gases efecto invernadero (IPCC, 2013).

Todos los modelos son similares porque describen el mismo sistema climático, pero las incertidumbres, omisión de procesos, simplificaciones, parametrización y aproximaciones numéricas no son similares.

Para la selección de los modelos a utilizar para los escenarios de cambio climático en Perú, se realizó el inventario de los GCM en la base de datos del proyecto CMIP5 (*portal Earth System Grid Federation-ESG*), y se descargaron los datos mensuales para la precipitación, temperatura máxima y mínima del aire. El periodo histórico de referencia corresponde a 1981-2005 y el periodo futuro para los RCPs comprende del 2041-2070 para las tres variables mencionadas anteriormente. Con este criterio, se tomaron los datos de 19 modelos (Tabla 1).

**Tabla 1.** Lista de modelos disponibles

<i>Modelo</i>	<i>Institución</i>	<i>Resolución (° de arco1)</i>
bcc-csm1-1-m	BCC	2.8125x2.7906
CCSM4	NCAR	1.25x0.9424
CESM1-CAM5	NCAR	1.25x0.9424
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE	1.875x1.8653
FIO-ESM	FIO	2.81x2.77
GFDL-CM3	NOAA-GFDL	2.5x2
GISS-E2-H	NASA-GISS	2.5x2
GISS-E2-R	NASA-GISS	2.5x2
HadGEM2-AO	NIMR/KMA	1.88x1.25
IPSL-CM5A-LR	IPSL	3.75x1.8947
IPSL-CM5A-MR	IPSL	2.5x2.5352

<i>Modelo</i>	<i>Institución</i>	<i>Resolución (° de arco1)</i>
MIROC5	MIROC	1.40625x1.4008
MIROC-ESM-CHEM	MIROC	2.8125x2.7906
MIROC-ESM	MIROC	2.8125x2.7906
MRI-CGCM3	MRI	1.125x1.12148
NorESM1-ME	NCC	2.5x1.8947
ACCESS1-0	CSIRO-BOM	~1.25°x1.875°
MPI-ESM-LR	MPI-M	~1.8°x1.8°
IPSL-CM5A-MR	IPSL	2.5x2.0

### 2.3. Data observada

Los datos del ERA5 se usaron para la calibración mediante el factor de ajuste (Pabón, 2012) y la evaluación del desempeño de los diferentes GCMs el cual permitió definir una nueva lista adecuada para Perú y la información grillada del SENAMHI-Perú denominada Pisco V2.1 (Aybar, 2020) a escala mensual de la precipitación, temperatura máxima y mínima del aire para los periodos 1981-2005.

### 3. Método de regionalización

Mediante el factor de ajuste (Pabón, 2012), se realizó el ajuste de las series de los 19 modelos para el periodo 1981-2005 a nivel espacial área que corresponde al territorio nacional para las tres variables (precipitación, temperatura máxima y mínima del aire). Esta metodología permite en gran medida reducir la diferencia entre los valores observados y los valores simulados de las siguientes ecuaciones (Ecuación 1 y Ecuación 2):

$$X_i^* = \alpha_i X_i^m \quad (1)$$

Donde:

$X_i^*$ : valor ajustado de la variable X para el año i-ésimo.

$X_i^m$ : valor simulado de la variable X para el año i-ésimo.

$\alpha_i$ : factor de ajuste.

Donde

$$\alpha_i = \frac{\overline{X_i^{obs}}}{\overline{X_i^{mod}}} \quad (2)$$

$\overline{X_i^{obs}}$ : promedio multianual de los datos observados del año i-ésimo.

$\overline{X_i^{mod}}$ : promedio multianual de los datos simulados del año i-ésimo.

Para esta metodología se tiene información de los GCMs y observados de 25 años el cual va permitir generar promedios multianuales para cada grilla intermedia establecida en esta investigación.

Los modelos de circulación global (GCMs) pasan por un método de ajuste y son evaluados aplicando las métricas estadísticas de la Tabla 2 y detallados por Sandoval (2010).

**Tabla 2.** Descripción de las principales métricas

Número	Métrica	Criterio
1	Sesgo o BIAS	Valores negativos: subestimación del sesgo del modelo
		Valores positivos: indica una sobre estimación del sesgo del modelo
		Valor Cero: Valor óptimo
2	Coeficiente de correlación	0.8-1: correlación Muy alto u Óptimo
		0.6-0.7: correlación Alto o fuerte
		0.4-0.5: correlación Bajo
		0.2-0.3: correlación Muy bajo

A continuación, se muestra una lista de los modelos que pasaron la evaluación estadística y son los que mejor desempeño muestran para todo el territorio nacional (Tabla 3).

**Tabla 3.** Lista de modelos seleccionados

ID	Modelo	Institución
M1	ACCESS1-0	CSIRO-BOM
M2	MPI-ESM-LR	MPI-M
M3	IPSL-CM5A-MR	IPSL
M4	CESM1-CAM5	NCAR

En la literatura científica existe diferentes Métodos de Regionalización que se aplican a temas de escenarios de cambio climático. Dos de los métodos más utilizados son el método Delta y el Factor de Ajuste o Corrección del Sesgo (Pabón, 2012). En el “Método Delta” básicamente lo que se obtiene es un factor de ajuste a partir de los datos simulados; este factor se aplica a las series de datos observados, y esta nueva serie pasa a ser la nueva serie futura ajustada. Según la variable a ajustar, este factor se aplica en una forma aditiva (por ejemplo, para temperatura) o multiplicativa (para precipitación).

Para mayor detalle se muestra las ecuaciones para este factor y se calcula con la Ecuación 3:

$$\alpha_i^{add} = \overline{X_i^{Futuro}} - \overline{X_i^{Base}} \quad (3)$$

$$\alpha_i^{mul} = \frac{\overline{X_i^{Futuro}}}{\overline{X_i^{Base}}}$$

Donde:

$\overline{X_i^{Futuro}}$  : Promedio multianual de los RCPs para  $i$  modelos.

$\overline{X_i^{Base}}$  : Promedio multianual de la simulación para  $i$  modelos.

## 4. Resultados y discusión

### 4.4. Escenarios climáticos futuros para el Perú

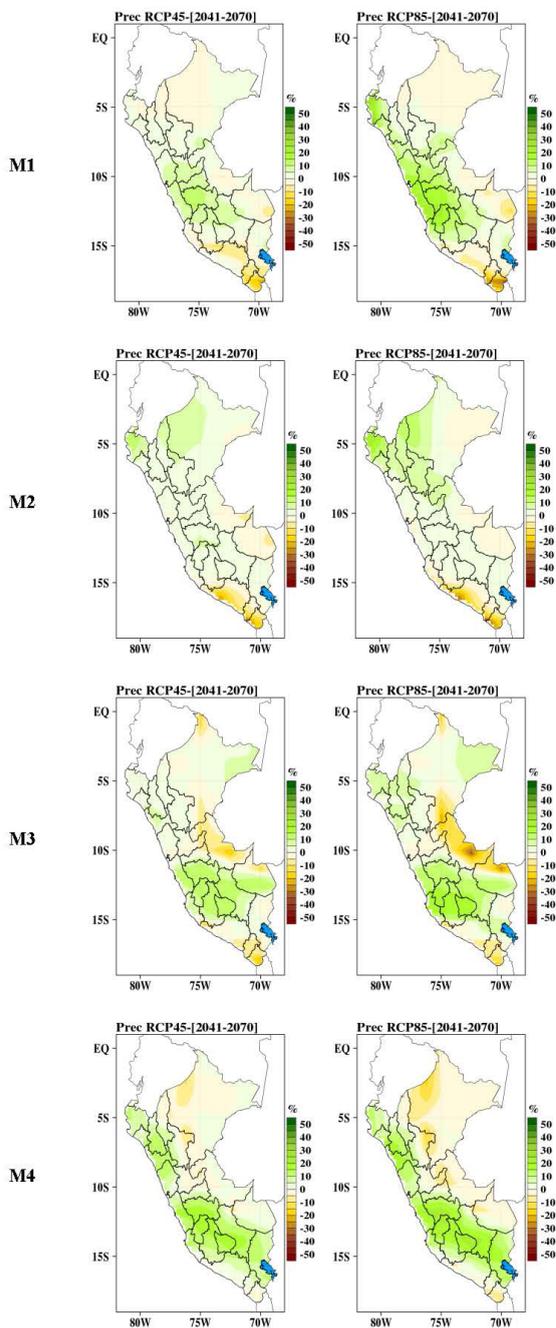
#### 4.1.1. Distribución espacial de cambios en la precipitación

En las siguientes gráficas se muestra los mapas de cambio para los dos escenarios e identificados con un ID según la Tabla 3 que simboliza el nombre del modelo seleccionado.

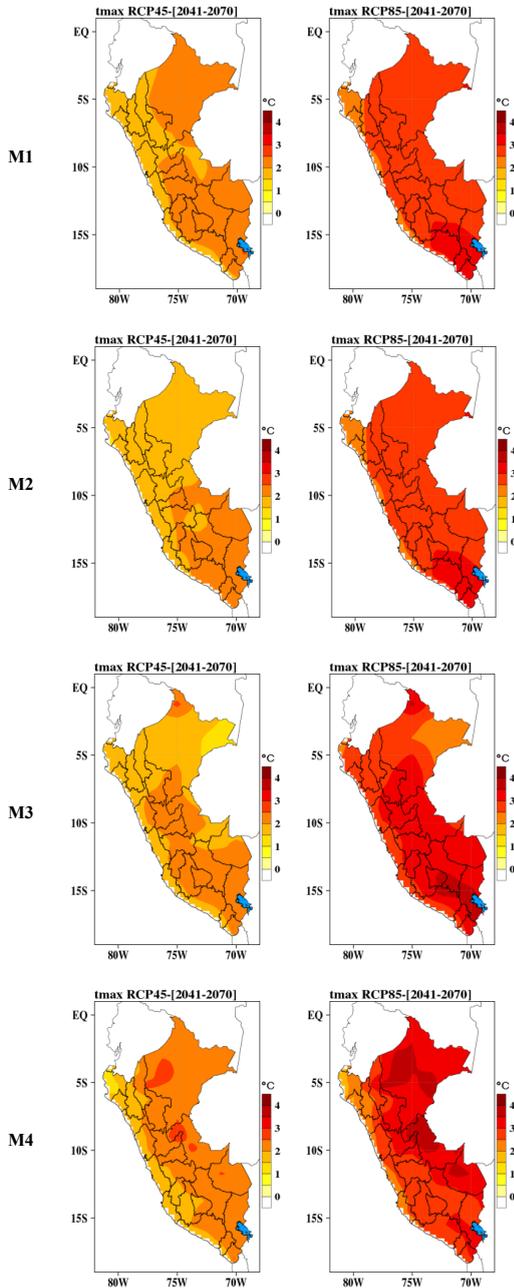
La distribución espacial para el RCP45 y RCP85 centrado al 2041-2070 a escala anual y para los cuatro modelos de selección convergen en precisar los incrementos de la precipitación en un 10% a 20% respecto a la climatología referencial 1981-2005 para gran parte de la zona costera centro y norte de Perú. En definitiva, estos incrementos estarían relacionados con los calentamientos de la temperatura superficial del mar el cual guarda una dependencia directa con el pacifico central y oriental. Las zonas de reducción (-12 a -20%) se ubican principalmente en la selva baja norte, centro y sur correspondiente a la amazonia; y por otro lado similar panorama para la costa sur con deficiencias en un -10 a -20% (Figura 2). Por otro lado, los resultados sugieren un incremento de la precipitación principalmente para parte central y sur occidental de los andes en un 20%. La distribución de la precipitación en un escenario RCP45 es menor que una distribución del RCP85, justamente porque en este último se considera una mayor concentración de los gases de invernadero y que repercute directamente en una mayor distribución espacial.

#### 4.1.2. Distribución espacial de cambios en la temperatura máxima del aire

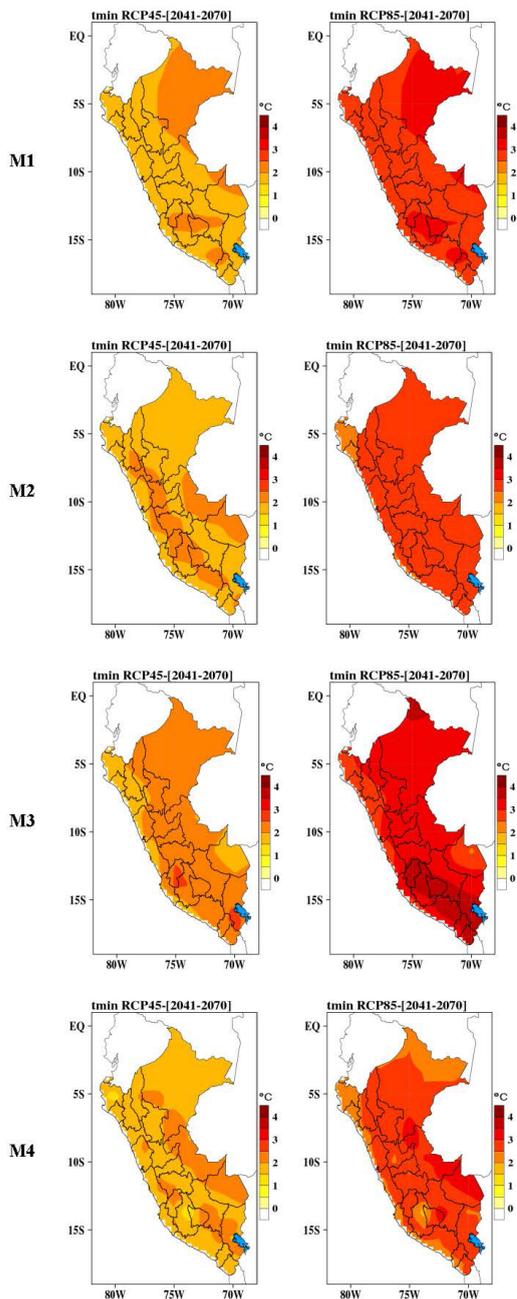
La Figura 3 muestra los cambios anuales de la temperatura máxima en el periodo 2041-2070 respecto al periodo de referencia 1981-2005 para los cuatro



**Figura 2.** Mapas de cambio para la precipitación al 2041-2070 (en referencia a 1981-2005), proyectado por los 4 modelos M1, M2, M3, M4 (Tabla 3): columna izquierda representa el RCP4.5, columna derecha representa el RCP8.5.



**Figura 3.** Mapas de cambio al 2041-2070 (con respecto a 1981-2005), proyectado por los cuatro modelos M1, M2, M3, M4 (Tabla 3) para la temperatura máxima del aire en los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5 (columna izquierda y derecha, respectivamente).



**Figura 4.** Mapas de cambio al 2041-2070 (con respecto a 1981-2005) para la temperatura mínima del aire, proyectado por los 4 modelos M1, M2, M3, M4: RCP4.5 y RCP8.5 (columna izquierda y derecha).

modelos (M1, M2, M3 y M4). Para el periodo futuro se disponen cuatro salidas por cada escenario de emisión (RCP4.5 y RCP8.5), es decir, ocho gráficos espaciales. Todos los modelos tienen un comportamiento similar y sugieren, para los dos escenarios de emisión, un calentamiento al 2070. Por otro lado, las zonas donde estarían los valores de cambio más altos abarcarían gran parte de la selva baja del Perú y parte de la sierra sur occidental. Se evidencia un mayor incremento de la temperatura máxima del aire en un escenario RCP8.5 respecto al escenario RCP4.5, donde es catalogada como el más conservador. Las zonas costeras tendrían menos impacto en comparación a la zona de la selva. Por otro lado, en el escenario RCP45 la zona sur del Perú, principalmente la parte occidental se evidencia un mayor calentamiento respecto a las otras zonas en los rangos de +1 °C y +2 °C (Figura 3).

#### 4.1.3. Distribución espacial de cambios en la temperatura mínima del aire

Este escenario si presenta un aumento considerable para los próximos años inmediatos, se puede decir que el clima será continuo o muy similar al actual, sin embargo; para que esto suceda, se tendrían que dejar de emitir gases efecto invernadero a la atmósfera por parte de todo el mundo tomando como válida la premisa que el calentamiento es producto de la actividad del ser humano, aunque también se podría producir por una baja en la radiación entrante a la tierra por cambios en la actividad del sol.

Las proyecciones de cambios para la temperatura mínima del aire al 2070, considerando los promedios multianuales del 2041-2070 respecto al periodo de referencia 1981-2005 para el escenario RCP4.5 y RCP8.5 en general, se puede indicar que la temperatura mínima del aire para Perú se proyecta a una tendencia positiva. La Figura 4 muestra los cambios anuales correspondientes a la temperatura mínima y se observa que los modelos proyectan un incremento para el periodo 2041-2070 para los dos RCPs, y que esta tasa de incremento es más grande en el RCP8.5. Las salidas de los cuatro modelos son muy similares en el incremento y muestran una distribución espacial similar a la temperatura máxima.

El rango de todas las salidas para el final del periodo es del orden de +1.5 °C a 2 °C, tomando en cuenta los dos escenarios de emisión, +1.5 °C para RCP 4.5 y +2 °C a +3 °C para RCP 8.5. Las salidas de los modelos M3 para el escenario RCP8.5 es la que muestra valores más altos respecto a los otros tres modelos (Figura 4).

## Conclusiones

- La investigación ofrece proyecciones calibradas de precipitación, temperatura máxima y mínima del aire en base a los datos de Pisco v2.1

y proyectados al año 2070 (un promedio centrado del período 2041-2070), por medio de la metodología de la regionalización estadística donde se realizar los balances climáticos en base a los escenarios de cambio climático para Perú, en consecuencia, permite conocer con más certeza la situación futura del recurso hídrico y empezar a gestionar dicho recurso de manera eficiente y sostenible.

- Las proyecciones al 2070 muestran que los dos escenarios RCPs presentan un aumento de temperatura, esta tendencia es debido a que el forzamiento radiativo y las concentraciones de gases de efecto invernadero tienen una trayectoria parecida hasta mediados de siglo.
- La importancia de conocer los escenarios de cambio climático para Perú es muy significativa y urgente para orientar con datos científicos la toma de decisiones como país en materia de adaptación y mitigación. La mayoría de los escenarios estiman disminución del -20% de la precipitación anual para finales de siglo, principalmente en la selva baja y se proyectan aumentos para la zona costera (centro, norte) en un 20%, donde la señal de humedecimiento es más clara por el efecto oceánico.
- El promedio anual prevé un escenario positivo en rangos de 2.0 °C y 3.8 °C para la temperatura máxima y para la temperatura mínima en un rango de 1.7 °C y 3.0 °C.
- Se prevén impactos climáticos importantes por el aumento de temperatura y disminución de precipitación en las zonas de la selva baja y la costa sur oriental. Asimismo, las sequías podrían ser más prolongadas y el periodo de lluvias puede ser alterada, generando tormentas locales severas.

## Referencias

- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., Felipe, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 770-785.
- Muñoz, J., Dutra, & Thépaut, J. N. (2021). ERA5-Land: A state of the art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data Discussions*.
- Pabón, J. (2012). Tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 260-280.
- Sandoval, P. A. B. (2010). *Forecast of average monthly flows in the basins of the Baker and Pascua rivers*. Doctoral dissertation [University of Chile].
- Stocker, F., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., & Alexander, L. V. (2013). *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change-Abstract for decision-makers; Changements climatiques 2013. Les elements scientifiques. Contribution du groupe de travail I au cinquieme rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du CLIMAT-Resume a l'intention des decideurs*.





# Evaluación de la vulnerabilidad socioecológica: estudio de caso en la Parroquia San Juan Cuenca, del río Chimborazo, Ecuador

Evaluation of social-ecological vulnerability: a case study in  
the San Juan Parish, Chimborazo River Basin, Ecuador

Carlos Rolando Rosero Erazo<sup>1</sup>  
Andrés Agustín Beltrán Dávalos<sup>2</sup>  
Dayana Alvarez<sup>3</sup>

Fecha de recibido: 29 de junio de 2021  
Fecha de aceptado: 6 de diciembre de 2021

## Resumen

Los aspectos socioecológicos determinados por un conjunto de variables capturan la vulnerabilidad relativa y actúan como herramientas visuales para identificar aquellas zonas susceptibles a cambios socioambientales. Estos índices son de fácil uso e interpretación, además de ofrecer una orientación para la toma de decisiones políticas dentro de la jurisdicción local, en aspectos tanto económicos como cuestiones de conservación y monitoreo de los ecosistemas. Las investigaciones más específicas, por otro lado, pueden generar planes para la reducción de riesgos en relación con

<sup>1</sup> Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias. Riobamba, Ecuador, correo electrónico: [carlos.rosero1733@gmail.com](mailto:carlos.rosero1733@gmail.com)

<sup>2</sup> Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias. Riobamba, Ecuador, correo electrónico:

<sup>3</sup> Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias. Riobamba, Ecuador, correo electrónico:

las adversidades presentes en la zona. Este caso de estudio en particular, relaciona la vulnerabilidad socioecológica con respecto a la sequía como una amenaza, por lo tanto, este artículo busca inquirir, a través de la identificación de aspectos SES, la representación de cada variable, escala, dinámicas e interacciones producidas. El uso del análisis de componentes principales (PCA) como medio de agregación espacial e índices de vulnerabilidad normalizada contribuyeron a la comparativa de distribución espacial de datos, así mismo, se logró identificar características de agregación, más no de dispersión. La vulnerabilidad resultante, en consecuencia, indica la variabilidad de tres componentes únicos y estadísticamente independientes que proporcionan más información en cuanto al índice normalizado, el mismo que fue realizado mediante la suma de todas las variables o criterios SES. Esta herramienta proporciona información relativa de la vulnerabilidad socioecológica, siendo un resultado que subyace a los impactos socioecológicos formados por condiciones ambientales cambiantes en el tiempo, como el clima y características intrínsecas de la colectividad. La presente investigación tiene lugar en la Unidad Hidrográfica nivel 7 del río Chimborazo con 124 km<sup>2</sup> de extensión, la que se delimitó según el *Manual de procedimientos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas: Caso Ecuador* (SUR UICN, 2009). Éste trabajo se realizó en un periodo de tres años desde el 1 de abril del 2017 al 31 de diciembre del 2020, para la obtención de datos de mayor fidelidad.

Palabras clave: *vulnerabilidad, PCA, aspectos socioecológicos, SES, dinámicas.*

## **Abstract**

The socio-ecological aspects determined by a set of variables capture a relative vulnerability and act as visual tools to identify those areas susceptible to socio-environmental changes. These indices are easy to use and interpret, and also provide guidance to local policy makers on economic aspects and on issues related to the impact of ecosystem conservation and monitoring. The more specific investigations can generate plans for risk reduction in relation to the adversities present in the area, in this case study they are related to drought. This article investigates the identification of SES aspects from the conceptualization of each variable, scale, dynamics and interactions produced by each SES aspect. The use of principal component analysis as a means of spatial aggregation and also a normalized vulnerability index analysis helped in comparing the spatial distribution of data, in addition, helping to identify characteristics of aggregation rather than dispersion. The resulting vulnerability indicates the variability of three unique and statistically independent components that provide more information than the normalized index that was made by adding together all the SES variables or criteria.

This tool provides relative information on socio-ecological vulnerability and is also an underlying result of socio-ecological impacts formed by changing environmental conditions over time, such as climate and intrinsic characteristics of societies. The present investigation takes place in the Hydrographic Unit level 7 of the river Chimborazo with 124 km<sup>2</sup> of extension, which was delimited according to the *Manual of Procedures of Delimitation and coding of Hydrographic Units: Case Ecuador* (SUR UICN, 2009). This work was carried out in a period of 3 years from April 1, 2017 to December 31, 2020, to obtain data of greater fidelity.

Key words: *vulnerability, PCA, frameworks social-ecological, SIG, dynamics.*

## Introducción

Los estudios de vulnerabilidad socioecológica presentan un enfoque multidisciplinario dirigido a los grupos sociales más vulnerables abarcando ciertas metodologías desde la perspectiva social y ambiental de toda América Latina (Kasperson *et al.*, 2012). Los indicadores que apuntan hacia la pobreza o exclusión de las comunidades, si bien forman parte de la sensibilidad de estas, no se adaptan al término de vulnerabilidad, dado que investigaciones y proyectos encaminados a fortalecer la resiliencia se han vuelto escasos ante el estereotipo de identificar los grupos potencialmente vulnerables y según (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], por sus siglas en inglés, 2014) la vulnerabilidad es una tendencia a ser afectado negativamente por la sensibilidad y falta de respuesta a adaptación, debido a esto, desde el enfoque al cambio climático, que persiste durante largos períodos a causa de procesos internos naturales o forzamientos externos como cambios antropógenos persistentes en la atmósfera o del uso del suelo; se debe adaptar los sistemas humanos a los daños y proyecciones climáticas.

Uno de los objetivos para estudios de esta índole es el direccionamiento a mejorar la capacidad de adaptación de las comunidades, siendo esta el eje de un sistema conjunto con visión a mejorar su condición y medrar sus competencias para hacer frente al estrés externo (Brooks, 2003).

De acuerdo con los medios socioecológicos, el término se entiende como una interacción dinámicas entre características sociales (S) y sistemas ecológicos (E), la usada por (Scholz & Binder, 2018) que establece tres interacciones: 1)  $E \Rightarrow S$ , donde el sistema ecológico influye sobre el social; 2)  $S \Leftarrow E$ , las actividades humanas afectan el sistema ecológico o los servicios del Ecosistema; 3)  $S \Leftrightarrow E$ , mantiene una reciprocidad entre el sistema social y el sistema ecológico, incluido los circuitos de retroalimentación y los procesos de aprendizaje en el sistema social en respuesta a los cambios en el sistema ecológico. Del mismo, a partir de las siguientes preguntas

se construye la premisa de la vulnerabilidad socioecológica: ¿cómo se conceptualizará la dinámica de los sistemas sociales y ecológicos?; ¿cómo se conceptualizará la interacción y la dinámica entre los sistemas sociales y ecológicos?; ¿en qué medida se trata a los sistemas sociales y ecológicos con respecto a la profundidad analítica?; ¿cómo seleccionar el marco apropiado para seleccionar un tema apropiado para el tema de investigación específico? (Turner y Carpenter, 1999) (Folke *et al.*, 2005) (Scholz, 2014).

Los sistemas socioecológicos (SES) se encuentran planteados en sistemas multinivel que brindan servicios esenciales para la sociedad, los mismos que se basan en el suministro de alimentos, energía y agua (Berkes y Folke, 2000). Las dinámicas, por otro lado, son los factores socioecológicos cambiantes con el tiempo, por ejemplo, ¿cómo y en qué medida cambian las estructuras sociales? o ¿cómo y en qué medida el aprendizaje en el sistema social juega un papel, o qué patrones de crecimiento o cambio ocurren dentro del sistema ecológico? (Binder *et al.*, 2013).

La literatura en torno al sistema socioecológico proporciona un marco útil para el desarrollo de mapas de vulnerabilidad al integrar los componentes socioeconómicos y biofísicos, haciendo de ésta una evaluación integral de la vulnerabilidad (Abson *et al.*, 2012). Muchos estudios de vulnerabilidad se vinculan a fenómenos naturales y posteriormente a la perspectiva social para poder mitigar futuros acontecimientos con medidas preventivas, aun así, se debe considerar que la exposición a dichos riesgos es irregular, así como su capacidad de respuesta y adaptación, incluyendo el tiempo y formas de acción (Berrouet *et al.*, 2018). En base a esto, uno de los conceptos más aceptados de vulnerabilidad social es el conjunto de atributos de un individuo o comunidad y que determina su capacidad para prever, resistir, soportar y reponerse al impacto de un evento brusco (Kok *et al.*, 2016).

Cuando se identifican varios aspectos de vulnerabilidad con algunas variables socioecológica se puede producir mapas de vulnerabilidad, los que actúan como poderosas herramientas visuales para identificar aquellas áreas más susceptibles a futuros cambios ambientales, y así lograr que dentro de las intervenciones políticas puedan abordarse los desafíos de esta problemática y reducir riesgos futuros (Abson *et al.*, 2012).

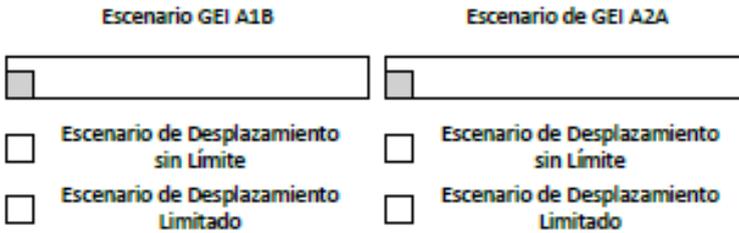
La vulnerabilidad es un fenómeno altamente complejo, donde los factores biofísicos y socioeconómicos afectan la exposición y sensibilidad (Adger, 2006). La combinación de múltiples indicadores de vulnerabilidad en índices de vulnerabilidad agregados debe superar la imposibilidad de comparación de las unidades en las que se pueden medir indicadores individuales (Adger, 2006). Un índice de vulnerabilidad basado en la normalización puede regresar puntuaciones similares en dos lugares donde esta es motivada por muy diferentes procesos (por ejemplo, pérdida de bosques o sequía). Probablemente ocurran múltiples tipos de vulnerabilidad simultáneamente

dentro de un sistema socioecológico y en respuesta a esto se puede argumentar que para brindar una investigación relevante para el uso en políticas locales, se debería cuantificar la vulnerabilidad en relación con un solo problema (Preston *et al.*, 2011).

En estudios de vulnerabilidad generalmente se profundiza en factores como: Exposición, Sensibilidad y la Capacidad de adaptación, siendo en primera instancia la presentación un factor que produce vulnerabilidad, de tal manera que si no hay planteamiento de un fenómeno particular, no existe riesgo (INE y PNUD, 2012). Esta Exposición al Cambio Climático puede darse por procesos internos naturales o fuerzas externas como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropogénicos persistentes (IPCC, 2013). Por otro lado, la Sensibilidad es el grado en que un sistema es forzado por variables antropogénicas e intrínsecas (Furniss *et al.*, 2013). Entre los estresores considerados de tipo antrópico y natural en el Ecuador, se encuentran: el cambio de uso de suelo, fragmentación, red vial, deforestación, minería, incendios, inundaciones, extracción de madera, erosión, movimiento en masas, especies invasoras y pendientes (Moncada *et al.*, 2000; Lewis *et al.*, 2004). La capacidad de adaptación incluidos los factores socioeconómicos institucionales, gobernanza y manejo se definen como aptitud, o el potencial de un sistema para tolerar, recuperarse o ajustarse exitosamente a cambios climáticos y antrópicos (IPCC, 2014); el análisis de la capacidad de adaptación se denominan amortiguadores y estos ayudan a la conservación de la biodiversidad, entre estos amortiguadores se reconocen las áreas protegidas, las que están relacionadas con acciones de conservación y son estimadas como una de las mejores opciones para la protección de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos (Naughton-treves *et al.*, 2005).

De acuerdo a estudios del Ministerio del Ambiente en colaboración con la GIZ y la Universidad Católica de Quito, se prevé una disminución de especies en la Reserva de Producción Faunística de Chimborazo entre 27,94 y 40,2 por ciento, en los cuatro escenarios de desplazamiento de especies analizados y encaminados a líneas evolutivas, denominados como Escenarios de Gases de Efecto Invernadero (GEI) A1B y A2A (Figura 1), este trabajo se enfoca en el estudio de 667 especies entre angiospermas, helechos, anfibios, reptiles y aves distribuidas en el territorio ecuatoriano (Cuesta *et al.*, 2015), los escenarios en los que se fundamenta la investigación de distribución de especies están basados en proyecciones de variables bioclimáticas y fisiográficas, con una proyección desde el año 2030 al 2060, los escenarios GEI de la línea evolutiva A1B se enfocan en un escenario equilibrado de uso de energías fósiles y alternativas, mientras que el escenario de GEI o línea evolutiva A2 involucra el crecimiento de población más elevado en los próximos años en comparación con el escenario A1B, cabe recalcar que la línea evolutiva (A2)

prevé un incremento en el CO<sub>2</sub> y sería el único escenario GEI donde la curva de emisiones se mantiene en crecimiento (IPCC, 2007) (Valdivia *et al.*, 005).



**Figura 1.** Escenarios de potenciales respuestas de acuerdo a niveles de desplazamiento.

Las potenciales respuestas de las especies de acuerdo a niveles de desplazamiento **sin límite** permiten que las especies colonicen el territorio con un clima idóneo, mientras que una capacidad de desplazamiento **limitada** se entiende que las especies solo podrán sobrevivir en sitios donde las condiciones climáticas se mantengan adecuadas (Cuesta *et al.*, 2015).

La Reserva de Producción Faunística de Chimborazo está representada con un 89,8 por ciento del área, debido a la presencia del páramo arenoso del Chimborazo (MAE, 2015), otra variable fundamental es la geología, ya que se ubica en una zona geológica de origen cuaternario representada por un estratovolcán llamado Chimborazo, la misma que presenta piroclastos primarios y retrabajados (cangahua); mientras que las faldas cercanas al cráter poseen domos constituidos por flujos de lava, andesítica y piroclastos, este tipo de formación cuaternaria presenta características erosionadas (Egües *et al.*, 2017).

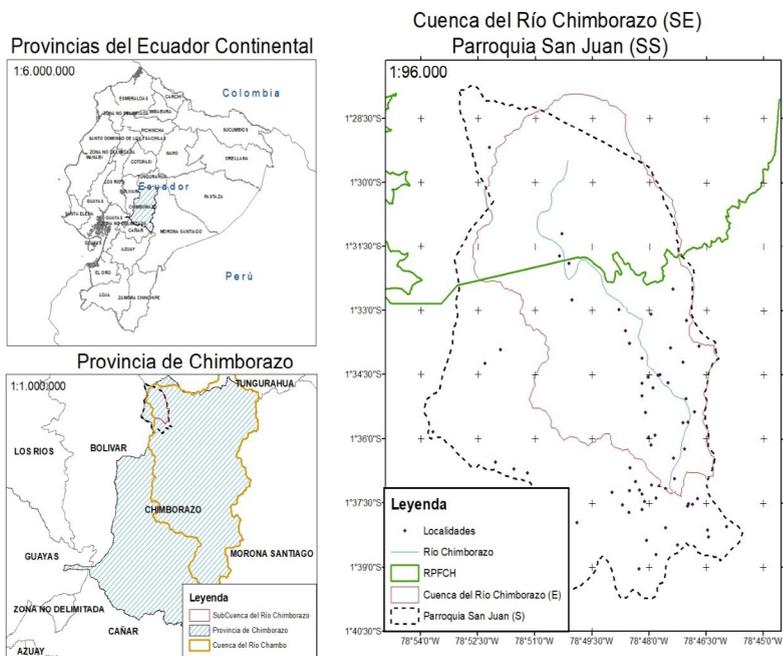
Los Análisis de Componentes Principales (PCA) son una serie de herramientas de exploración de datos estadísticos, se basa en una ordenación de variables correlacionadas con diferentes atributos similares; en este caso, puntos en el espacio, y el conjunto de variables no correlacionadas que capturan la variabilidad en los datos subyacentes. Los PCA se pueden utilizar para identificar patrones dentro de datos multivariantes, por lo que se denomina un estudio no paramétrico y es independiente de cualquier hipótesis sobre distribución de probabilidad (Abdi y Williams, 2010).

Con la presente investigación se realizó un análisis de la Vulnerabilidad Socioecológica mediante la identificación y caracterización de aspectos socioecológicos, efectuando la conceptualización de cada criterio SES, identificación de la Escala, y ubicando las dinámicas e interacciones que pueda contener cada criterio SES. Los criterios SES pueden ser descritos también

como componentes de Exposición, Sensibilidad y Capacidad de Adaptación, mismas que se consideran en investigaciones realizadas por el IPCC. El análisis de índices de vulnerabilidad y el Análisis de Componentes Principales establece lineamientos estadísticos más robustos para la caracterización de diferentes vulnerabilidades y su distribución en la zona.

## Metodología

Los criterios de los sistemas utilizados en la comparación, se relacionan con el contexto en el que se estudia los Sistemas Socio Ecológicos, describiendo las fuentes de información de donde provienen los análisis, es decir, el origen teórico de los criterios usados para la presente investigación.



**Figura 2.** Ubicación de los sistemas: Cuenca del Río Chimborazo y Reserva de Producción Faunística Chimborazo (RPFCH).

## Aspectos Socioecológicos

### Selección de Criterios Socioecológicos

Los criterios usados, el propósito del desarrollo y las escalas; proporcionó una medida de evaluación de la vulnerabilidad socioecológica, una

estructura indicada y necesaria para permitir la retroalimentación en la toma de decisiones políticas dentro de la jurisdicción local, respecto a calidad ambiental y gestión para la reducción del impacto generado por adversidades naturales (Kristensen, 2004).

Debido a la asociación de Parroquia como un sistema social con políticas autónomas establecidas bajo legislación ecuatoriana, la relación tomada por parte del sistema ecológico se fundamenta en la Cuenca Hidrológica del río Chimborazo, tomando en cuenta las condiciones físicas y climatológicas propias del lugar, en este nivel de caracterización se observan las interacciones y dinámicas manifestadas (Tabla 1).

**Tabla 1.** Criterios estructurales para el análisis de sistemas

<i>Criterios</i>	<i>Preguntas</i>	<i>Código de la pregunta</i>
<i>Sistema Social</i>		
Nombre del Sistema Social	¿Con que término se hace referencia al sistema social?	QSS 1.1
Escala del Sistema Social	¿Qué escalas incluye el sistema? (individuo, grupo, organización o sociedad)	QSS 2.2
Conceptualización del Sistema Social y su dinámica	¿Cómo se conceptualiza el sistema social?	QSS 3.1
	¿Cómo se consideran las dinámicas internas en el sistema social?	QSS 3.2
	¿Cómo se consideran las interacciones entre los niveles del sistema social?	QSS 3.3
<i>Sistema Ecológico</i>		
Nombre del Sistema Ecológico	¿Con qué termino se hace referencia al sistema ecológico?	QSE 1.1
Escala del Sistema Ecológico / Escala Espacial	¿En qué escalas espaciales se ha aplicado el criterio, por ejemplo escala Global, Regional, Nacional, Local?	QSE 2.1
Conceptualización del Sistema Ecológico y su dinámica	¿Cómo se conceptualiza el sistema ecológico?	QSE 3.1
	¿Se consideran diferentes niveles jerárquicos o el tipo de interacción?	QSE 3.2
	¿Cómo son las dinámicas dentro del sistema ecológico?	QSE 3.3

<i>Criterios</i>	<i>Preguntas</i>	<i>Código de la pregunta</i>
<i>Sistema Social</i>		
<i>Sistema Socioecológico</i>		
Conceptualización de las interacciones dentro del SES y sus dinámicas	¿Cómo se conceptualiza la interacción entre los sistemas sociales y ecológicos?	QSSE 1.1
	¿Cómo se conceptualizan las dinámicas entre el sistema social y el ecológico?	QSSE 1.2
Grado en que el Sistema Social y el Sistema Ecológico son tratados por igual.	¿Se tratan los sistemas sociales y ecológicos con la misma profundidad?	QSSE 2.1
Análisis – Orientación vs Acción – Orientación	¿Están los criterios de análisis y acciones orientados?	QSSE 3.1

**Fuente:** Binder *et al.*, 2013.

Las preguntas QSS1 nombrarán al sistema social como Parroquia San Juan, siendo una forma de delimitación asociada a la legislación ecuatoriana como política administrativa de “3er Nivel”; QSE1 se nombra al sistema ecológico como cuenca del río Chimborazo, siendo cuenca hidrográfica según su funcionamiento, un colector que recibe precipitación y convierte parte de esta en escurrimiento, es decir que su transformación depende de las condiciones climáticas y las características físicas propias del lugar (Gaspari *et al.*, 2012), de esta forma la unidad ecológica se fundamenta desde el enfoque hidrológico.

### **Vulnerabilidad**

Combinando conjuntos de indicadores independientes e índices de Vulnerabilidad agregados, se puede brindar una visión general de la Vulnerabilidad Socio Ecológica (Füsselm, 2009), en el caso de datos de sequía vegetativa, estos cubren un período de 29 años. La elección de indicadores de vulnerabilidad eficientes es determinante para la confiabilidad de cualquier índice, sin embargo, existen problemas relacionados con la escala espacial para factores sociales, los que influyen para la definición de las zonas de vulnerabilidad socioecológica; para ello se realizó un análisis de la información utilizada, hallada en fuentes fidedignas, evitando la presencia de sesgos, siendo la principal adversidad evaluada, la sequía.

Se atienden dos aspectos fundamentales de vulnerabilidad en la presente investigación. Primero, los indicadores ambientales, que de cierta forma son

considerados una presión sobre los recursos biofísicos o tienen una presión sobre el bienestar de poblaciones, es decir, la sequía vegetativa presente en la zona. Y segundo, indicadores socioeconómicos de vulnerabilidad basado en los criterios socioecológicos como se detalla en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Aplicación de Criterios Estructurales para el análisis de sistemas en la cuenca del río Chimborazo

<i>Sistema Social</i>	
Nombre del Sistema Social	Parroquia San Juan
Escala del Sistema Social	Local / (Tabla 4)
Conceptualización del Sistema Social y su dinámica	Parroquia San Juan (Constitución del Ecuador, 2008) / (Tabla 4)
<i>Sistema Ecológico</i>	
Nombre del Sistema Ecológico	Cuenca del río Chimborazo (Gaspari <i>et al.</i> , 2012) /
Escala del Sistema Ecológico	Local / (Tabla 5)
Conceptualización del Sistema Ecológico y su dinámica	Sistema Hidrológico Chimborazo (Gaspari <i>et al.</i> , 2012) / (Tabla 5)
<i>Sistema Social Ecológico</i>	
Conceptualización de las interacciones dentro del SES y sus dinámicas	Ver Criterios SES del SSE (Tabla 6)
Grado en que el Sistema Social y el Sistema Ecológico son tratados por igual	Ver Criterios SES del SSE (Tabla 6)
Análisis – Orientación vs Acción – Orientación	Ver Criterios SES del SSE (Tabla 6)

## **PCA**

Todos los PCA se llevaron a cabo utilizando el programa PAST 4.01 (Hammer *et al.*, 2001). Se aplicaron pruebas de correlación por pares para reducción de métricas a subconjuntos, mediante el uso de una matriz de correlación para los análisis de PCA, ya que esto estandariza los datos y evita posibles sesgos derivados de la inclusión de datos con diferentes escales y rangos. La elección de PC se basó en parte en el juicio subjetivo y la interpretabilidad de los componentes (Srivastava, 2002).

## **Normalización**

Fue necesario el uso de la herramienta ArcGIS 10.3 y ENVI 3.2 para el análisis de los componentes principales de los datos obtenidos en los criterios de los sistemas socioecológicos.

Las 16 variables se normalizaron espacialmente a una escala de 0 a 1 usando la ecuación:

$$d \frac{1}{4} (c_{\text{cmin}}) / (c_{\text{max}} - c_{\text{min}}) \quad (1)$$

Donde  $d$  es el valor original y  $c_{\text{min}}$  y  $c_{\text{max}}$  los valores mínimos y máximos de datos, respectivamente; finalmente las variables normalizadas se sumaron y los resultados se normalizaron de nuevo para proporcionar un índice de vulnerabilidad final con un rango de 0 a 1 y así permitir la comparación directa con el PCA.

**Tabla 3.** Índices normalizados de Vulnerabilidad

Valores	Vulnerabilidad de aspectos espacialmente discretos
0.8-1	Muy alta
0.6-0.8	Alta
0.4-0.6	Media
0.2-0.4	Baja
0-0.2	Muy baja

**Fuente:** elaboración propia.

Por último, se define una auto relación espacial para establecer el nivel en que tanto objetos como actividades mantengan una unidad geográfica similar a otros, es decir, se definen las concentraciones o dispersiones de los valores de una variable (Goodchild, 2007). En la presente investigación se aplicó la autocorrelación espacial de las superficies de Moran (1950), donde los valores van entre +1 y -1, siendo los valores positivos (+1) los que indican una correlación positiva o con perfecta concentración, mientras que, valores negativos (-1) indican una correlación negativa, donde existe una perfecta dispersión de los datos; y el valor intermedio que es 0, indica patrones espaciales aleatorios.

## Resultados

Se seleccionaron 13 criterios socioecológicos para la presente investigación. y se procedió a la descripción mediante el marco DPSIR, el que en primera instancia describe el fundamento teórico para cada criterio, el año de

representatividad y la fuente de datos (Cuadro 4). Estos criterios pueden considerarse variables espacialmente discretas en el momento de generar los PCA y el índice de Vulnerabilidad.

**Tabla 4.** Criterios Socioecológicos

<i>Criterios</i>	<i>Descripción</i>	<i>Año de representatividad</i>	<i>Fuente de datos</i>
VHI	Índice de sequía vegetativa indica el estado de salud de la vegetación	1991-2016	Rosero, Beltrán, y Cuadrado, 2020
MNDWI	Índice de estrés hidrológico, representa el déficit de agua en la CRC, Nivel de impacto entre períodos (1991-2007 y 2007 al 2016)	1991-2016	Rosero <i>et al.</i> , 2020
Numero de Curva CN	Variable hidrológica que determina la cantidad de escorrentía superficial presente en una cuenca hidrográfica	2019	Rosero <i>et al.</i> , 2019
Turbiedad de agua (TA)	Indicativo de probabilidad de contaminación microbiológica por compuestos tóxicos e indica mayor dificultad de desinfección efectiva de agua	2018	Berrones y Moreta, 2018
DBO5	Demanda biológica de oxígeno	2018	Berrones y Moreta, 2018
DQO	Demanda química de oxígeno	2018	Berrones y Moreta, 2018
Coliformes Fecales (CF)	Indicador de calidad de agua	2018	Berrones y Moreta, 2018
Vías de acceso (VA)	Estado de las vías	2013	IGM
Educación (ED)	Ubicación de centros educativos	2014	Ministerio de Educación
Desnutrición crónica, severa y leve (DC, DS, DL)	Salud en niños de 0 a 5 años de edad	2018	Ministerio de Salud

<i>Criterios</i>	<i>Descripción</i>	<i>Año de representatividad</i>	<i>Fuente de datos</i>
Conocimiento del cambio de recursos (CCR)	Conocimiento intrínseco en base a encuestas sobre cambios de la cobertura de suelo, usos de suelo, quema y afectación sobre sus medios de vida	2019	Encuesta
Valor del Recurso (VR)	Valor intrínseco dado por las comunidades con respecto al recurso	2019	Encuesta
Área Protegida (AP)	Existencia de una Reserva de Producción Faunística Chimborazo	2015	Ministerio del Ambiente

**Fuente:** elaboración propia.

### **Descripción de los criterios socioecológicos**

VHI o **Índice de Salud de la Vegetación** (VHI, por sus siglas en inglés) evalúa el evento de sequía orientado a las zonas agrícolas en tiempo y espacio (Rojas, Li y Cumami, 2015). Este al ser un índice el que enfoca características físicas de la CRC se tomó como referencia al momento de identificar la adversidad presente en diferentes tiempos de análisis.

El **Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado** (MNDWI, por sus siglas en inglés) es un índice utilizado con mucha frecuencia para el control del riego en tiempo real mejorando significativamente las actividades agrícolas (Xu, 2006).

**Tabla 5.** Criterios SES (Sistemas Estructurales) para el SS (Sistema Social)

<i>Criterios de SES</i>	<i>QSS 3.1 Conceptualización</i>	<i>QSS 2.2 Escala</i>	<i>QSS 3.2 Dinámicas</i>	<i>QSS 3.3 Interacciones</i>
VHI	La conceptualización se enfoca en el sistema social como el impulsor de cambios en la cobertura de suelo a través del tiempo, y este como generador de la variabilidad de estrés vegetativo	Incluye todos los niveles jerárquicos	Dinámicas sociales no son conceptualizadas	Micro

<i>Criterios de SES</i>	<i>QSS 3.1 Conceptualización</i>	<i>QSS 2.2 Escala</i>	<i>QSS 3.2 Dinámicas</i>	<i>QSS 3.3 Interacciones</i>
MNDWI	La conceptualización social se enfoca en el sistema social como el impulsor de cambios en la cobertura de suelo a través del tiempo, y este como generador de la variabilidad del estrés hídrico	Social y ecológico	Dinámicas sociales no son conceptualizadas	Micro
CN	Este parámetro hidrológico se conceptualiza desde el enfoque social como una variable de cambio social a partir del cambio de cobertura de suelo	Social y Ecológico	Las dinámicas se enfocan desde las actividades humanas que causan un cierto nivel de impacto, medios de vida sobre características ecológicas	Micro
TA	Este parámetro es impactado debido al desvío del cauce natural	Interesados locales	Dinámicas sociales no son conceptualizadas	Micro
DBO5	Demanda de oxígeno valora el grado de carga de aguas residuales presentes en el medio	Interesados locales	Dinámicas sociales no son conceptualizadas	Micro
DQO	Demanda química de oxígeno es una medición indirecta de las cantidades de materia orgánica que se tomó en una muestra	Interesados locales	Dinámicas sociales no son conceptualizadas	Micro
CF	Una amenaza de carácter social, enfocada a la contaminación de aguas. Las presiones demográficas sin el suficiente abastecimiento de alcantarillado sanitario y las malas prácticas agropecuarias generan impactos sociales graves	Interesados locales	La dinámica se centra en la contaminación ambiental	Micro
VA	Enfoque físico con valor socio-económico, la accesibilidad es un factor importante para la producción	Tomadores de Decisión	La dinámica se centra en la accesibilidad (cercanía o lejanía) a recursos o medios de vida presentes en la zona de estudio	Macro-<->Micro

<i>Crterios de SES</i>	<i>QSS 3.1 Conceptualización</i>	<i>QSS 2.2 Escala</i>	<i>QSS 3.2 Dinámicas</i>	<i>QSS 3.3 Interacciones</i>
ED	Se conceptualiza como un valor físico o de espacio donde se desarrolla de forma íntegra la sociedad	Tomadores de Decisión	La dinámica se centra en los procesos de aprendizaje y la accesibilidad con enfoque de cercanía o lejanía del recurso	Micro
DC, DS, DL	Se conceptualiza desde el enfoque social como una de las principales amenazas para el desarrollo y supervivencia de las sociedades	Tomadores de Decisión	La dinámica está impulsada por malas prácticas agropecuarias y la falta de recursos para la mejora en calidad de agua	Macro-<->Micro
CCR	Se conceptualiza desde el enfoque social como un valor intrínseco fundamentado en conocimientos sociales desarrollados a través del tiempo	Interesados Locales	La dinámica se centra en los procesos de aprendizaje	Micro
VR	Se conceptualiza desde el enfoque social como un valor intrínseco fundamentado en la valorización que se da a los recursos asociados a las formas de vida	Interesados Locales	La dinámica se centra en los procesos de aprendizaje	Micro
AP	Se conceptualiza desde el enfoque social como una medida de conservación de los recursos asociada a la toma de decisiones a partir de la generación de conocimientos socioambientales	Social Ecológico	Los impulsores de la dinámica son los procesos de recolección de conocimientos técnicos para la generación de medidas de conservación y adaptación	Micro

**Tabla 6.** Criterios SES (Sistemas Estructurales) para el SE (Sistema Ecológico)

<i>Crterios de SES</i>	<i>QSE 3.1 Conceptualización</i>	<i>QSE 2.1 Escala</i>	<i>QSE 3.2 Dinámicas</i>	<i>QSE 3.3 Interacciones</i>
VHI	Se conceptualiza como una amenaza de carácter natural, una sequía evaluada a través del tiempo	LOCAL	La dinámica se centra en la conservación y manejo de agua	Micro

<i>Criterios de SES</i>	<i>QSE 3.1 Conceptualización</i>	<i>QSE 2.1 Escala</i>	<i>QSE 3.2 Dinámicas</i>	<i>QSE 3.3 Interacciones</i>
MNDWI	Se conceptualiza como una amenaza de carácter natural, el déficit hídrico por falta de precipitación o debido al cambio de cobertura de suelo	LOCAL	La dinámica se centra en la medición del estado de la sequía vegetativa en el entorno	Micro
CN	Se conceptualiza como los niveles de escorrentía superficial asociada a la cobertura de suelo actual	LOCAL	La dinámica no se conceptualiza	Micro
TA	Se conceptualiza como la cantidad de partículas suspendidas en el cauce natural	LOCAL	La dinámica es socioecológica, se centra en las presiones humanas sobre el ecosistema	Micro
DBO5	Demanda de Oxígeno valora el grado de carga de aguas residuales presentes en el medio	LOCAL	La dinámica se centra en las características hidrológicas	Micro
DQO	Demanda química de oxígeno es una medición indirecta de las cantidades de materia orgánica que se tomó en una muestra	LOCAL	La dinámica se centra en la identificación de especies importantes en la RPFCH	Micro
CF	Es conceptualizada como una medida de contaminación ambiental generada por malas prácticas ambientales	LOCAL	La dinámica no se aborda en detalle	Micro
VA	La conceptualización desde el punto de vista de accesibilidad, más tiene un enfoque de recurso físico de importancia para el desarrollo socioeconómico	LOCAL	Dinámicas ecológicas no son conceptualizadas	Macro-<->Micro
ED	La conceptualización desde el punto de vista de accesibilidad al recurso educativo	LOCAL	Dinámicas ecológicas no son conceptualizadas	Micro
DC, DS, DL	La conceptualización en estos factores más tiene un sentido de sensibilidad del sistema macro	LOCAL	Dinámicas ecológicas no son conceptualizadas	Macro-<->Micro

<i>Criterios de SES</i>	<i>QSE 3.1 Conceptualización</i>	<i>QSE 2.1 Escala</i>	<i>QSE 3.2 Dinámicas</i>	<i>QSE 3.3 Interacciones</i>
CCR	La conceptualización en el factor de conocimiento del recurso más tiene un sentido de capacidad de adaptación localizada en la CRC	LOCAL	Dinámicas ecológicas no son conceptualizadas	Micro
VR	La conceptualización en el factor de valoración del recurso tiene más sentido desde el enfoque de capacidad de adaptación localizada en la CRC	LOCAL	Dinámicas ecológicas no son conceptualizadas	Micro
AP	Se conceptualiza como un recurso tangible e intangible para la generación de políticas de manejo. Tiene un enfoque de capacidad de adaptación	LOCAL	La dinámica ecológica es basada en la calidad de los ecosistemas presentes en la zona	Micro

**Tabla 7.** Criterios SES (Sistemas Estructurales) para el SSE (Sistema Socio-Ecológico)

<i>Criterios de SES</i>	<i>Conceptualización de la Interacción SE</i>	<i>QSSE 1.1</i>	<i>QSSE 1.2</i>	<i>QSSE 2.1</i>	<i>QSSE 3.1</i>
VHI	Las presiones humanas generadas por malas prácticas ambientales generan un impacto en la salud vegetativa en la CRC	Producto de la dinámica entre condiciones meteorológicas y cambio de cobertura de Suelo	S<->E	E>S	Análisis orientado
MNDWI	Las presiones humanas generadas por malas prácticas ambientales generan un impacto en el déficit hídrico en la CRC	Producto de la dinámica entre condiciones meteorológicas y cambio de cobertura de suelo	S<->E	E>S	Análisis orientado
CN	Las presiones humanas generadas por malas prácticas ambientales generan un impacto en el balance hídrico y mayor lavado de nutrientes en el suelo dentro de la CRC	Producto de la dinámica entre condiciones meteorológicas y cambio de cobertura de suelo	S<->E	E>S	Análisis orientado
TA	Las presiones humanas generan alteraciones en el flujo del cauce natural	No Conceptualizada	S->E	S ≈ E Antropocéntrico	Análisis orientado

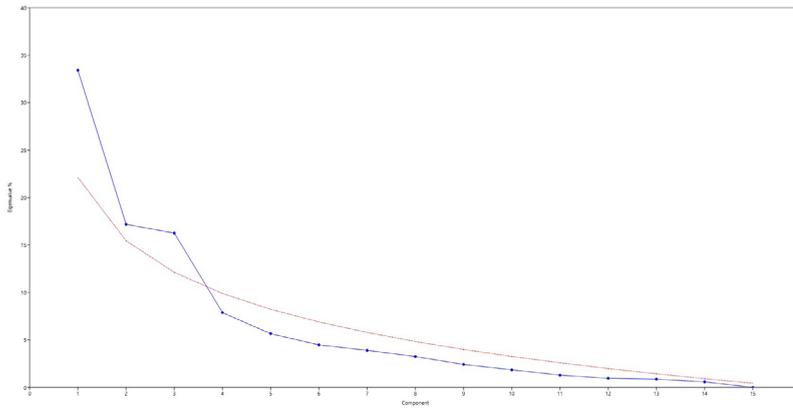
<i>Criterios de SES</i>	<i>Conceptualización de la Interacción SE</i>	<i>QSSE 1.1</i>	<i>QSSE 1.2</i>	<i>QSSE 2.1</i>	<i>QSSE 3.1</i>
DBO5	Las presiones humanas tienen una interacción con el flujo y contaminación del cauce natural	No Conceptualizada	S->E	S = E Antropocéntrico	Análisis orientado
DQO	Las presiones humanas tienen una interacción con el flujo y contaminación del cauce natural	No Conceptualizada	S->E	S = E Antropocéntrico	Análisis orientado
CF	La contaminación por coliformes fecales tiene un impacto en el recurso agua en la CRC	No Conceptualizada	S->E	S>E Antropocéntrico	Análisis orientado
VA	Las vías de acceso impactan a los recursos expuestos por la intervención de medios de vida en la zona, por otro lado, se conceptualiza como un indicador impulsor de la economía local	No Conceptualizada	S->E	S>E Antropocéntrico	Acción orientada
ED	Los establecimientos educativos fortalecen los conocimientos y el valor que se le da a los recursos, el acceso a los establecimientos educativos ayuda al fortalecimiento del conocimiento y valoración socioecológica	No Conceptualizada	S->E	S>E Antropocéntrico	Acción orientada
DC, DS, DL	La desnutrición se conceptualiza como la interacción del recurso agrícola y su aporte en la seguridad alimentaria	No Conceptualizada	S->E	S>E Antropocéntrico	Análisis orientado
CCR	El conocimiento de los impactos generados sobre el Recurso es una fuente intrínseca de conservación de los recursos naturales	No Conceptualizada	S->E	S>E Antropocéntrico	Análisis orientado
VR	La valoración de los impactos sobre el recurso es una fuente intrínseca de conservación de los recursos naturales	No Conceptualizada	S->E	S>E Antropocéntrico	Análisis orientado

Crterios de SES	Conceptualización de la Interacción SE	QSSE 1.1	QSSE 1.2	QSSE 2.1	QSSE 3.1
AP	El área protegida es una fuente de conocimiento y buenas prácticas para la conservación de los recursos naturales	Aspecto dinámico entre conocimiento social y ecológico. Conservación socioecológica	S<->E	E<->S Eco-céntrico	Acción orientada

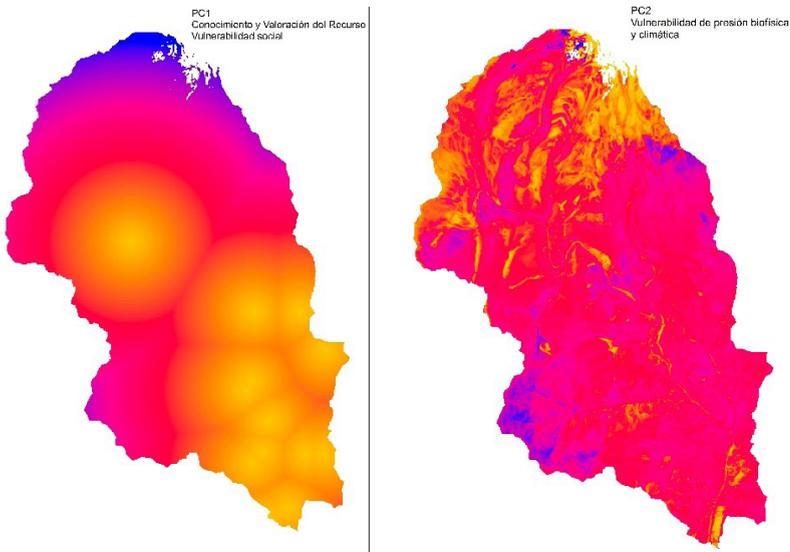
Fueron tres los componentes principales identificados por el PCA para el análisis de la CRC, juntos representaron un 66% de la variación en las 13 variables originales, el cuarto componente principal solo el 7.8% adicional de la variabilidad total de datos, mientras que, la carga de factores está dominada por educación, vías, desnutrición crónica, desnutrición leve, MNDWI, VHI (Tabla 6). El componente principal se encuentra cargado con el conocimiento del cambio del recurso, la valoración dada al recurso, la reserva de producción faunística Chimborazo y el número de curva o escorrentía superficial. El PC2 está cargado por la educación, las vías de acceso el MNDWI y el VHI. El PC3 se cargó con desnutrición leve, desnutrición crónica y coliformes fecales encontrados en la zona (Tabla 6).

**Tabla 8.** Componentes principales retenidos para el análisis espacial de la vulnerabilidad socioecológica

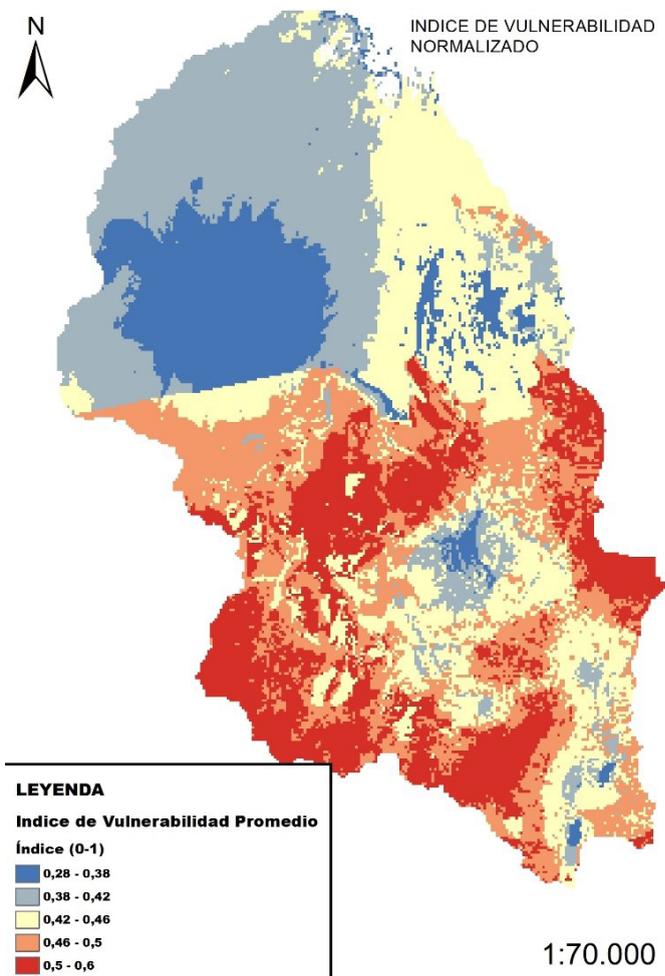
	PC 1	PC 1	PC 3
MNDWI	0.16241	0.41642	-0.014471
VHI	0.09204	0.47418	0.026547
TA	-0.38082	0.1065	0.20981
DBO5	-0.38758	0.17598	-0.10084
DQO	-0.3829	0.17519	-0.11282
CF	-0.30665	-0.034249	0.35388
ED	0.15182	0.50338	0.06001
VIA	-0.030669	0.41501	0.21088
DS	0.11758	-0.11458	0.19404
DC	0.11489	-0.060512	0.56782
DL	0.17505	-0.069746	0.53111
CCR	0.25325	-0.010498	0.2243
VR	0.36044	-0.15068	-0.20799
RPFCH	0.32406	0.23951	-0.13168
CN	0.22034	0.010692	-0.076172



**Figura 3.** Aspectos espacialmente discretos de Vulnerabilidad socioecológica.



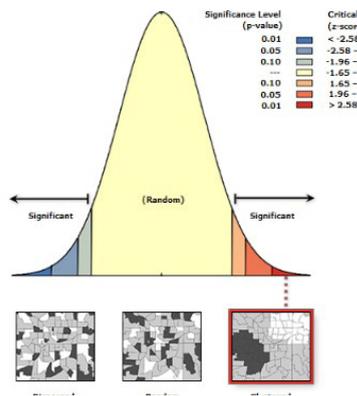
La Figura 3 indica que hay diferencias regionales en las fuentes de Vulnerabilidad socioecológica. El conocimiento y la valoración dada hacia los recursos que tienen dominan la Vulnerabilidad Socioecológica (PC1), mientras que las presiones que afectan el clima en un espacio físico, son altas en la Cuenca Baja del río Chimborazo, la vulnerabilidad en alimentación y



calidad de agua se ven incrementadas de igual forma en la Cuenca Baja del río Chimborazo a pesar de estar en una zona potencialmente agropecuaria. El índice normalizado de Vulnerabilidad proporciona espacios menos heterogéneos como se observa en la Figura 4b, dado el puntaje z de 16.35, hay una probabilidad de menos del 1% de que este patrón agrupado podría ser el resultado de una probabilidad aleatoria, es decir, que podemos observar patrones de distribución agregados, del mismo modo podemos distinguir los patrones de distribución en los PC 1, 2 y 3 donde la distribución de igual forma presenta sitios agregados, ya que el índice de Morans es más alto, por otro lado, se tiene una media de índices de vulnerabilidad en toda la Cuenca del río Chimborazo relacionados con vulnerabilidades medias que van de 0.28 a 0.60 (Figura 3).

a)

	PC1	PC2	PC3
Moran's Index:	0,921149	Moran's Index: 0,440621	Moran's Index: 0,934155
Expected Index:	-0,002033	Expected Index: -0,002033	-0,002033
Variance:	0,001076	Variance: 0,001066	0,001075
z-score:	28,140518	z-score: 13,558712	z-score: 28,556592
p-value:	0,000000	p-value: 0,000000	p-value: 0,000000



b)

Índice de Vulnerabilidad	
Moran's Index:	0,527013
Expected Index:	-0,002033
Variance:	0,001047
z-score:	16,352403
p-value:	0,000000

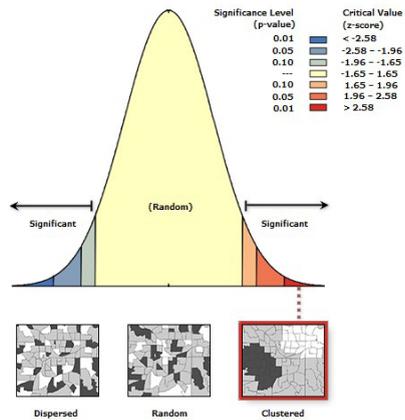


Figura 4. Distribución espacial índice de Morans.

## Discusión

Todas las figuras de vulnerabilidad reflejan conjunto de datos y métodos que sustentan el análisis, los que van a ser la base para la elección de indicadores o variables, donde la escala en la que se esté trabajando nos ofrecerá un contexto, ya sea similar o dispar al que se observa en la presente investigación. Para este caso en particular se trató de trabajar con las variables a escala local detallados bajo el criterio de Sistemas Estructurales para los Sistemas Ecológicos y Sociales, respectivamente (Binder *et al.*, 2013) (Abson *et al.*, 2012). Los indicadores o criterios SES fueron elegidos a través de investigación exploratoria, donde se determinó por la disponibilidad limitada de geoinformación. Cabe recalcar que existen criterios SES importantes de vulnerabilidad socioecológica como valores intrínsecos propios de las sociedades como el conocimiento y el valor que se le asigne a los cambios de los recursos naturales presentes en la zona, además, desde el punto de vista ecológico la identificación de adversidades como la sequía es una limitante importante para la consideración de estas vulnerabilidades, debido a que nos brinda características importantes por su mutualidad con sus medios de vida; por otro lado, está la contaminación ambiental generada en el recurso hídrico presente en la cuenca baja del río Chimborazo, representada, según el concepto de índice de Vulnerabilidad como una Cuenca del río Chimborazo con impacto medio, en vista de presiones generadas por los criterios SES.

Es necesario tomar en cuenta las desventajas de la PCA, una de estas es la imposibilidad de establecer ponderaciones con respecto a la importancia de los indicadores e índices resultantes, ya que, cada indicador o criterio SES se lo trata con la misma importancia para la generación de la figura Vulnerabilidad, y en virtud de esto, el aspecto de Vulnerabilidad considera un aspecto relativo más no absoluto, por ejemplo, para las sociedades puede ser más apremiante la disminución de la contaminación hídrica que el propio factor de vulnerabilidad impulsado por las sequías. Los formuladores de decisiones a través del análisis de PCA e Índices Normalizados pueden ser una herramienta eficaz para el desarrollo y la identificación de zonas con alta vulnerabilidad; en particular, esta investigación determina que mediante el enfoque de PCA para el mapeo de vulnerabilidades no se deforma el término de criterios socioecológicos; sino más bien permite analizar que los resultados presentados se derivan de múltiples variables llamadas criterios SES, que pueden ser clasificados como exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación como se propone en varios estudios de esta índole, es necesario enfatizar que este mapeo proporciona información sumamente útil para los tomadores de decisiones.

Los PCA deben considerarse un punto de partida para estudios de vulnerabilidad socioecológica, ya que su aplicación va a contribuir a

decisiones políticas acertadas, sin embargo, se hallan aún problemas sin resolver como el uso de indicadores que reflejen una misma escala local; es preciso destacar que es fundamental el estudio de otras amenazas provocadas por el ser humano como la quema de pajonal para el incremento de la frontera agrícola, las transiciones paisajísticas con plantaciones forestales y el impacto generado por estas actividades antrópicas.

## Conclusión

En la presente investigación se utilizó el análisis de componentes principales basada en un conjunto de variables recolectadas en campo. El análisis de Componentes Principales de la vulnerabilidad socioecológica a partir de la creación de un Sistema Estructural (SES) tanto para los sistemas sociales y ecológicos se fundamenta en un análisis previo a nivel de conceptualización de criterios en el sistema socioecológico, escala, dinámica e interacciones para lograr comprender las relaciones existentes en cada variable analizada.

La Vulnerabilidad es espacialmente discreta, con algunas zonas caracterizadas con distintos tipos de la misma. Como se observa en la presente investigación mediante el método de PCA e Índices de Vulnerabilidad por su amplio y consolidado conjunto de indicadores de vulnerabilidad individual y uso de variables fáciles de visualizar, nuestro análisis sugiere que hay una necesidad de considerar la escala al usar PCA para generar vulnerabilidades dispersas, dado que se puede observar que para cada uno de los análisis de patrones espaciales se componen de distribuciones espaciales agregadas más no dispersas.

## Bibliografía

- Abdi, H. y Williams, L. (2010). *Principal component analysis*. John Wiley y Sons, Inc., 433-459. DOI: <https://doi.org/10.1002/wics.101>
- Abson, D. J., Dougill, A. J. y Stringer, L. C. (2012). Using Principal Component Analysis for information-rich socio-ecological vulnerability mapping in Southern Africa. *Applied Geography*. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.08.004>
- Adger, W. N. (2006). *Vulnerability*. *Global Environmental Change*, 16, 268-281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- Berkes, F. y Folke, C. (2000). *Linking social an ecological system: management practices and social mechanisms for building resilience*. University of Manitoba, Ed.: Canada. <https://www.cambridge.org/vi/academic/subjects/life-sciences/ecology-and-conservation/linking-social-and-ecological-systems-management-practices-and-social-mechanisms-building-resilience?format=PB>
- Berrones, J. y Moreta, J. (2018). *Evaluación de la huella hídrica de la microcuenca del río Chimborazo en el fortalecimiento de su gestión y política comunitaria*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

- Berrouet, L. M., Machado, J. and Villegas-Palacio, C. (2018). *Vulnerability of socio-ecological systems: A conceptual Framework. Ecological Indicators*.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.051>
- Binder, C. R., Hinkel, J., Bots, P. W. G. and Pahl-wostl, C. (2013). *Comparison of Frameworks for Analyzing Social-ecological Systems. Resilience Alliance*.  
DOI: <https://doi.org/10.5751/ES-05551-180426>
- Brooks, N. (2003). *A conceptual framework Vulnerability , risk and adaptation: A conceptual framework*. Tyndall Centre for Climate Change Research, (November). <https://pdfs.semanticscholar.org/01b2/0f52b177e3e441ad37ec6324ef43d78e42c4.pdf>
- Constitución del Ecuador. Constitución de la República del Ecuador*, Pub. L. No. Artículo 242, 1 (2008). Quito-Ecuador: Organización Territorial del Estado.  
[https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4\\_ecu\\_const.pdf](https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf)
- Cuesta, F., Merino-Viteri, A., Muriel, P., Baquero, F., Freire, J., Torres, O. and Peralvo, M. (2015). *Escenarios de impacto del Cambio Climático sobre la biodiversidad en el Ecuador Continental*. Quito-Ecuador.  
[http://maetransparente.ambiente.gob.ec/documentacion/Biodiversidad/IT/Escenarios\\_CC\\_Bio\\_SNAP\\_Ecuador\\_2015.pdf](http://maetransparente.ambiente.gob.ec/documentacion/Biodiversidad/IT/Escenarios_CC_Bio_SNAP_Ecuador_2015.pdf)
- Egües, A., Gaona, M. y Albán, A. (2017). Mapa Geológico de la República del Ecuador 2017. Quito-Ecuador. <https://drive.google.com/file/d/1qYhMc4PKBg38Y-2dOm-RogOH8i5JMcu/view>
- Folke, C., Hahn, T., Olsson, P. and Norberg, J. (2005). *Adaptive Governance of Social-Ecological Systems. Ecosystems*, (May 2014).  
<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144511>
- Furniss, M., Roby, K., Cenderelli, D., Chatel, J., Clifton, C., Clingenpeel, A., Weinhold, M. (2013). *Assessing the Vulnerability of Watersheds to Climate Change. EEUU*.  
[https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw\\_gtr884.pdf](https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_gtr884.pdf)
- Füsselm, H.-M. (2009). *Development and Climate Change*. Germany.  
[https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/9193/WDR2010\\_0004.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/9193/WDR2010_0004.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Gaspari, F. J., Rodríguez, A., Senisterra, G. E., Denegri, G., Delgado, M. & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Revistas UNLP*. [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/25777/Documento\\_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/25777/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Goodchild, M. F. (2007). A spatial analytical perspective on geographical information systems. *International Journal of Geographical Information System*, 37-41.  
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02693798708927820>
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T. and Ryan, P. D. (2001). *Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis*, 4(1), 1-9.
- INE and PNUD. (2012). *Guía metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad ante cambio climático*. elaborado por Instituto Nacional de Ecología, México.  
[http://climasaludal.org/resources/images/public/avirtuales/cuarta\\_conferencia/140923\\_guia\\_metodologica.pdf](http://climasaludal.org/resources/images/public/avirtuales/cuarta_conferencia/140923_guia_metodologica.pdf)

- IPCC (2007). Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza. Retrieved from [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4\\_syr\\_sp.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf)
- IPCC (2013). Climate Change 2013 The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Edited by. Cambridge. Retrieved from [http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5\\_Frontmatter\\_FINAL.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_Frontmatter_FINAL.pdf)
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf)
- Kasperson, J. X., Kasperson, R. E., Turner, B. L., Hsieh, W. and Schiller, A. (2012). *Vulnerability to global environmental change. In The Social Contours of Risk: Volume II: Risk Analysis, Corporations and the Globalization of Risk.* DOI: <https://doi.org/10.4324/9781849772549>
- Kok, M., Lüdeke, M., Lucas, P., Sterzel, T., Walther, C., Janssen, P. and de Soysa, I. (2016). A new method for analysing socio-ecological patterns of vulnerability. *Regional Environmental Change.* <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0746-1>
- Kristensen, P. (2004). The DPSIR Framework. Workshop on a Comprehensive / Detailed Assessment of the Vulnerability of Water Resources to Environmental Change in Africa Using River Basin Approach, 10. <https://www.ifremer.fr/dce/content/download/69291/913220/.../DPSIR.pdf>
- Lewis, S. L., Malhi, Y. and Phillips, O. L. (2004). Fingerprinting the impacts of global change on tropical forests. *The Royal Society, (February)*, 437-462. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1432>
- MAE (2015). *Análisis de vulnerabilidad ante riesgos naturales hidrometeorológicos en las áreas protegidas del Ecuador continental.* Quito. <http://maetransparente.ambiente.gob.ec/documentacion/Biodiversidad/IT/Riesgos Final.pdf>
- Moncada, M., Vázquez, M., López, A. and Hernández, P. (2000). *EcoCiencia-REGAL Ecuador NCSA Perfil temático en biodiversidad.* Quito-Ecuador.
- Naughton-treves, L., Holland, M. B. and Brandon, K. (2005). The Role of Protected Areas in Conserving Biodiversity and Sustaining Local Livelihoods. *Annual Reviews*, 37. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.164507>
- Preston, B., Yuen, E. and Westaway, R. (2011). *Putting vulnerability to climate change on the map: A review of approaches, benefits, and risks* *Putting vulnerability to climate change on the map: a review of approaches, benefits, and risks.* *Sustain Sci*, (July). <https://doi.org/10.1007/s11625-011-0129-1>
- Rojas, O., Li, Y. and Cumami, R. (2015). Entendiendo el impacto de sequía provocada por El Niño en el área agrícola mundial: una evaluación utilizando el Índice de Estrés Agrícola de la FAO (ASI). Roma: FAO. <http://www.fao.org/3/a-i4251s.pdf>

- Rosero, C., Beltrán, A. and Cuadrado, J. (2020). Evaluación de la sequía vegetativa mediante sensores remotos: Estudio de caso en la Cuenca del Río Chimborazo-Ecuador. *Polo del Conocimiento*, 5(06), 228-259. <https://doi.org/10.23857/pc.v5i6.1477>
- Rosero, C., Beltrán, A. y Santillán, M. (2019). Actualización de la cobertura de suelo mediante teledetección para la estimación del umbral de escorrentía en la Cuenca del Río Chimborazo threshold in the Chimborazo River Basin. *Ciencia Digital*, 3, 39-59. <http://cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/CienciaDigital/article/view/517>
- Scholz, R. W. (2014). Environmental Literacy in Science and Society From Knowledge to Decisions, (January 2011). DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511921520>
- Scholz, R. W. & Binder, C. (2018). *The Paradigm of Human-Environment Systems*, (January 2003). [https://www.researchgate.net/publication/239548218\\_The\\_Paradigm\\_of\\_Human-Environment\\_Systems/link/5c1518274585157ac1c42e62/download](https://www.researchgate.net/publication/239548218_The_Paradigm_of_Human-Environment_Systems/link/5c1518274585157ac1c42e62/download)
- SENAGUA. (2009). Delimitación y codificación de Unidades Hidrográficas del Ecuador Escala 1:250000. Quito-Ecuador. <https://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/delimitacion-codificacion-Ecuador.pdf>
- Srivastava, M. (2002). *Methods of Multivariate Statistics*. Wiley-Interscience. <http://www.utstat.toronto.edu/~srivasta/solns.pdf>
- SUR UICN (2009). *Manual de Procedimientos de Delimitación y codificación de Unidades Hidrográficas: Caso Ecuador*. Quito, Ecuador. [https://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/Manual\\_de\\_procedimientos.pdf](https://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/Manual_de_procedimientos.pdf)
- Turner, M. G. and Carpenter, S. R. (1999). *Tips and Traps in Interdisciplinary Research. Ecosystems*, (May 2014). DOI: <https://doi.org/10.1007/PL00010895>
- Valdivia, C., Wittmaack, M. & Ceéda, J. (2005). *Modelos Climáticos, Escenarios de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y Escenarios Climáticos*, Chile. [https://www.parc.ca/mcri/pdfs/WP\\_2\\_b.pdf](https://www.parc.ca/mcri/pdfs/WP_2_b.pdf)
- Xu, H. (2006). Modification of Normalized Difference Water Index ( NDWI ) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, (March), 10. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>



# RESEÑAS







**Valera, Francisco José y Anguix, Álvaro (2021). *Un lugar de La Mancha. La patria de Don Quijote al descubierto*. Albacete: Uno editorial, 164 pp. ISBN (impreso): 978-84-18659-44-7**

Antonio F. Rodríguez Pascual  
Centro Nacional de Información Geográfica  
(CNIG), España

“En un lugar de la Mancha de cuyo nombre no quiero acordarme, no hace mucho tiempo que vivía un hidalgo de los de lanza en astillero, adarga antigua, rocín flaco y galgo corredor...”. Así comienza *El Ingenioso Hidalgo Don Quijote de la Mancha*, la novela universal de Miguel de Cervantes, con una enigmática frase de significado desconocido que ha hecho correr ríos de tinta y ha dado lugar a las más variadas hipótesis.

Muchos han sido los estudiosos que han tratado de resolver, con mayor o menor solvencia, el problema de determinar la identificación del pueblo natal del hidalgo manchego, buscando todo tipo de indicios en el texto cervantino. Por citar algunos de los análisis más aceptados, podemos nombrar (Parra, 2009), (Parra, 2015) y (Girón y Ríos, 2008), entre otros, que sitúan el lugar en Villanueva de los Infantes (Ciudad Real), y la recopilación de soluciones propuestas en Barbero (2015).

Los estudios realizados hasta ahora, al menos los que conocemos, suelen basarse fundamentalmente en ejercicios de análisis territorial en los que se toma una velocidad media para los desplazamientos de Rocinante; se calcula la distancia de cada salida con lugar de destino bien descrito y se ubica el famoso lugar aunando todos los datos disponibles. Sin embargo, a menudo se descarta alguno de esos antecedentes por no encajar con el resto, con el expediente de tacharlo de error, y no se presta atención suficiente a los aspectos del texto que no encajan con la solución elegida. En general, los datos que se han manejado hasta ahora son confusos y contradictorios, por ello Jesús Sánchez (Sánchez, 2016) sostiene que no existe un único lugar y que Cervantes utilizó intencionadamente múltiples referencias incompatibles entre sí para representar un lugar genérico y abstracto que representase a toda la región.

Después de tan intrincada polvareda de opiniones encontradas, se ha publicado recientemente este ensayo, prolijo, convincente y muy bien argumentado que nos parece que viene por fin a resolver el enigma más famoso de la historia de la literatura y está llamado a ser el estudio definitivo sobre la cuestión.

Un primer punto a su favor es que no solo identifica la localidad natal del "caballero de la triste figura", sino que además, proporciona una explicación creíble y bien fundamentada del motivo que movía a Miguel de Cervantes a no desear recordar su nombre, cosa que hasta ahora ningún autor ha explicado, que nosotros sepamos.

Los autores desgranar en esta obra una larga lista de argumentos que sostienen y apoyan su tesis, algunos necesarios y la mayoría suficientes, hasta un total de 14 justificaciones de todo tipo: pistas literarias incluidas en el texto mediante alusiones que, una vez señaladas, parecen evidentes; menciones que apuntan inequívocamente a que se trata de un lugar manchego; un detallado y riguroso estudio de distancias recorridas y tiempos empleados en cada salida del caballero, basado en cartografía y documentación de la época y que tiene en cuenta todas las circunstancias de cada desplazamiento de los personajes; las características orográficas y topográficas del lugar de marras descritas en el texto; cultivos mencionados en la obra y la referencia fundamental del *Catastro de la Ensenada* (siglo XVIII); un gran número de otros detalles significativos, e incluso, un jeroglífico escondido en la primera letra capitular.

Se descartan, también de manera razonada, algunas pistas equívocas y confusas, y se sitúan dos de las ventas que aparecen en la novela mediante un detallado análisis del texto.

Especial mención merecen las consideraciones de carácter geográfico, que basándose en las características geográficas de La Mancha y de las posibles ubicaciones del famoso lugar, como orografía, hidrografía, cultivos, configuración, etc., aportan el grueso de las evidencias que llevan a la conclusión de que el pueblo del hidalgo es el que se propone.

En suma, el número y variedad de razonamientos y datos acumulados alrededor de una misma solución del enigma, resultan a la postre convincentes y abrumadores. Todos ellos están sólidamente fundamentados y nos parece que la explicación más sencilla y natural para justificar tal número de coincidencias, aplicando el principio de parsimonia o navaja de Ockham, una idea esencial en el método científico moderno, es que la solución al problema cervantino sea la propuesta.

Hay que decir que no resulta forzado admitir que Cervantes conocía los caminos y rutas de La Mancha como la palma de su mano, ya que fue durante varios años fue comisario de provisiones para la Armada Invencible

y recaudador de impuestos atrasados (tercias y alcabalas), lo que le obligó a recorrer Andalucía y la Mancha numerosas veces. Por otro lado, el Manco de Lepanto critica en *El Quijote...* lo artificioso e increíble de los desplazamientos de los personajes de las novelas de caballerías, así que no es descabellado asumir la hipótesis de que los datos que consigna sobre recorridos, tiempos y demás circunstancias se ajustan a la realidad escrupulosamente.

¿Por qué puede ser posible que se haya solucionado ahora el dichoso problema, transcurridos 416 años desde su formulación? Nos parece que varias circunstancias especiales han coincidido para hacerlo posible.

En primer lugar, los autores reúnen los conocimientos y la experiencia oportunos de dos mundos conceptuales habitualmente disjuntos y hasta antagónicos para algunos: el de las ciencias y las letras, la técnica y las humanidades. José Valera es manchego, abogado en ejercicio o, mejor dicho, letrado, y un enamorado de la obra cervantina, que ha leído y releído multitud de veces hasta casi sabérsela de memoria. Además, conoce bien el terreno, porque ha viajado por toda su extensión repetidamente como representante comercial. En cuanto a Álvaro Anguix, también manchego, es topógrafo de formación y experto en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Presidente de la Asociación gvSIG, ha sido durante cerca de 20 años uno de los líderes de gvSIG, uno de los proyectos más exitosos a nivel mundial de desarrollo de un software SIG de código abierto, por lo que, además de ser una persona muy leída, conoce en profundidad tanto los aspectos más técnicos de la cartografía como todo lo referente al análisis e interpretación de la geografía de una región o lugar.

En segundo lugar, se ha manejado una amplia variedad de fuentes digitales de datos geográficos actuales y de la época, analizados por primera vez de manera conjunta, desde el *Catastro de la Ensenada* (1749) y el *Itinerario español o guía de caminos para ir de Madrid a todas las ciudades de España* de Joseph Mathias Escrivano (1757), hasta la cartografía de la Dirección General del Catastro y el Instituto Geográfico Nacional españoles, pasando por una amplia variedad de fuentes geográficas relevantes. Disponer de todas ellas fácilmente ha sido posible gracias a la tendencia generalizada de divulgación de información pública en forma de datos digitales abiertos.

En tercer lugar, los autores han tenido el acierto de abordar el problema desde todos los puntos de vista posibles, la tenacidad y la ilusión suficientes para seguir todas las pistas hasta el final, y la habilidad de ordenar toda la información en un ensayo entretenido, claro y lógico, que abunda en detalles y anécdotas quijotescas interesantes.

Y por último, también han tenido una pizca de fortuna y la suerte de estar espoleados por una larga lista de trabajos y disquisiciones sobre la cuestión, todos de interés y mérito, que probablemente les han servido de inspiración y acicate.

Para finalizar, hay que decir que la obra está muy bien redactada, resulta amena y su desarrollo se hace interesante; incluye un buen número de citas, detalles y fragmentos de *El Quijote...*, por lo que sirve también como obra divulgativa de la obra maestra de Cervantes e incita a su consulta y lectura completa.

En suma, un ensayo inteligente y perspicaz, sólidamente argumentado por esta pareja de ingeniosos manchegos y sin ningún punto débil reseñable, que tiene un mérito enorme y viene a resolver de manera brillante el mayor enigma literario que han visto los siglos. En él se realiza un pormenorizado estudio de las características geográficas descritas por Cervantes al hablar de la patria chica de su protagonista: cultivos de la zona, hidrografía, relieve, conexión por caminos y calzadas romanas, nombres geográficos de la zona, etc., hasta completar un análisis geográfico que viene a demostrar que la Geografía es aplicable prácticamente en cualquier campo y sirve realmente para conocer nuestro entorno, tanto hoy como en el pasado.

Al fin sabemos cuál era el nombre del famoso lugar de La Mancha y porqué a Don Miguel no le resultaba grato recordarlo. Por fin se ha resuelto un acertijo, después de más de cuatro siglos de cavilaciones y polémicas, una marca que bien podría incluirse en el *Libro Guinness de los récords*. Vale.

## Referencias

- Barbero, A. (2015). *Don Quijote en un lugar "científico" de La Mancha. Artículos medio irónicos*. Sevilla: Punto Rojo Libros SL.
- Girón, J. y Ríos, M. J. (2008). ¿De dónde era probablemente D. Quijote? Un enfoque estadístico. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 102 (1), 251-263. [https://www.villanuevadelosinfantes.es/images/cultura/ciudad\\_literaria/lugar\\_mancha/de\\_donde\\_era.pdf](https://www.villanuevadelosinfantes.es/images/cultura/ciudad_literaria/lugar_mancha/de_donde_era.pdf)
- Parra, F. et al. (2009). *El lugar de la Mancha es...: el Quijote como un sistema de distancias/tiempos*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Parra, F. (2015). *El lugar de la Mancha. Un irónico Cervantes a la luz de la crítica científica*. Madrid: Editorial Biblioteca Nueva.
- Sánchez, J. (2016). *¿Existe el lugar de la Mancha? O la imposibilidad del método científico para identificar la patria de don Quijote. Cuestiones geográficas y metodológicas*. Sevilla: Punto Rojo Libros SL.

# Revista Geográfica

## Directrices para autores

Se invita a los autores a comprobar que su envío cumpla con todos los elementos que se muestran a continuación. Aquellos que no cumplan con estas directrices, no podrán ser considerados para su publicación.

- Los Artículos y Reseñas deberán ser originales y no publicados o propuestos para tal fin en otra revista o en cualquier medio de difusión.
- El Artículo deberá ser producto de investigaciones originales e inéditas, empíricas o teóricas, que comuniquen explícitamente progresos en las *áreas del conocimiento geográfico* en que se desarrollan.
- Los Artículos y Reseñas se enviarán a través del Open Journal System (OJS) (<https://revistasipgh.org/>). El enlace al sitio de la *Revista Geográfica* es <https://revistasipgh.org/index.php/regeo>.

Es necesario que el autor este registrado de forma correcta y que disponga de nombre de usuario y contraseña. Puede consultar el tutorial para su registro como autor en [https://www.youtube.com/watch?v=ARY6GMCz\\_9I](https://www.youtube.com/watch?v=ARY6GMCz_9I)

- El texto deber cumplir con los criterios de propiedad intelectual antiplagio.
- Para asegurar la evaluación doble ciega de los envíos, el archivo se debe enviar sin datos que permitan la identificación de los autores (no incluir nombre ni afiliación)

Los datos de autoría y colaboradores se enviarán en la misma plataforma (OJS), en **documento Word por separado** con los siguientes campos:

- Nombres y Apellidos.
  - Afiliación institucional.
  - País.
  - Contacto (correo electrónico).
  - Identificador ORCID (en caso de contar con él).
  - Resumen biográfico.
  - Indicar si se trata del contacto principal para la correspondencia editorial.
- Los criterios de aceptación se basarán en la calidad, originalidad, relevancia e importancia que el estudio aportaría a los lectores de la Revista en las **Ciencias**

**Geográficas** en general. Los Artículos o Reseñas aceptados se publicarán, a través del portal de la Revista, en el número que corresponda.

### Proceso de evaluación por pares

Producto del proceso de evaluación doble ciego, por pares, existen cuatro dictámenes posibles:

- **Aceptado.** El trabajo será publicado condicionado a modificaciones de forma señaladas oportunamente por el equipo de publicaciones del IPGH.
- **Publicable** con modificaciones. El trabajo podrá ser publicado en atención a las observaciones contenidas en la evaluación de los revisores. Si los autores deciden omitir una observación, deberán justificarlo en un documento complementario al texto. Una vez recibidos los artículos corregidos, tendrán una segunda lectura por parte de los mismos evaluadores o del Equipo Editorial de la Revista, tras la cual se recomendará o no la publicación. Los autores dispondrán de treinta días para responder a las evaluaciones señaladas.
- **Reevaluable.** La evaluación señala que no cumple con los requerimientos necesarios para dictaminarse alguna de las dos situaciones anteriormente señaladas. Los autores deberán implementar las correcciones mayores sugeridas y proceder con una nueva versión para una segunda ronda de evaluación, en los plazos para ello estipulados (treinta días desde la notificación).
- **No publicable.** El manuscrito no cumple con los criterios establecidos por la Revista y/o de la evaluación por pares, según formato de doble ciego.

En caso de discrepancia en el resultado de las evaluaciones de los pares evaluadores, el artículo será enviado a un tercer árbitro, cuya evaluación dirimirá esta situación.

En el segundo y tercer caso, los autores deberán considerar las observaciones de los evaluadores y del editor de la Revista antes de que los artículos sean aceptados definitivamente para su publicación. Ello puede suponer la realización de algunas correcciones, tanto formales como de contenido. Los autores deberán enviar, junto con el artículo corregido, un mensaje dirigido al editor justificando cada corrección solicitada u omitida, adjuntando una tabla con el siguiente formato sugerido:

<i>Corrección solicitada</i>	<i>Corregido</i>		<i>Justificación</i>
	<i>Si</i>	<i>No</i>	

En caso de que los autores prescindan de las indicaciones realizadas por los evaluadores y/o no justifiquen adecuadamente la no incorporación de los cambios sugeridos, el artículo podría ser rechazado.

Tras finalizar la evaluación de los revisores, el Equipo Editorial decidirá sobre su aprobación final.

### **Instrucciones para el texto**

Los archivos de texto de Artículos o Reseñas, deberán presentarse en formato Word tamaño carta con 2.5 centímetros de margen en todos los sentidos y con letra Arial 12 puntos.

Los Artículos y Reseñas podrán ser publicados en cualquiera de los idiomas oficiales del IPGH: Castellano, inglés, portugués o francés.

Los envíos deben cumplir con los criterios de uso idiomático y ortografía comúnmente aceptados para trabajos científicos.

Los **Artículos** deberán tener una extensión máxima de 20 páginas, incluyendo figuras, mapas, gráficos, tablas, citas y bibliografía.

La *Revista Geográfica* se adscribe, en lo posible, a la normativa APA para la publicación de artículos científicos (*APA Journal Article Reporting Standards – JARS*) (<https://apastyle.apa.org/jars>)

Estructura de los Artículos, en lo posible deberían tener la siguiente estructura:

- Título del trabajo en el idioma original, debe ser conciso y sencillo indicando con claridad el respectivo contenido.
- Título del trabajo en el segundo idioma (en inglés para artículos en español, portugués o francés). Para artículos en inglés se indicará el título en castellano.
- Resumen (100-300 palabras). El cual debería incluir de manera sucinta el estado del problema que se está presentando, objetivos, método de estudio, participantes, el área territorial de estudio, hallazgos y las conclusiones.
- Palabras clave (se recomiendan 5 de ellas) en el idioma en que esté redactado el artículo: Para la adecuada selección de las palabras claves se recomienda emplear el Tesoro de la UNESCO - Ciencias de la Tierra.
- Resumen en el segundo idioma, en inglés para artículos en español, portugués o francés (100-300 palabras). Para artículos en inglés se incluirá el resumen en español.
- Palabras claves en el segundo idioma (en inglés para artículos en español, portugués o francés).
- Texto del artículo, con las tablas, figuras, mapas u otros.
- El cuerpo del texto seguirá preferentemente la siguiente estructura:
  - Introducción, donde se debe considerar la descripción del problema, revisión de la bibliografía relevante, hipótesis o supuestos, metas y objetivos.
  - Metodología (datos y métodos).
  - Resultados.
  - Discusión.
  - Bibliografía en formato APA.

- Las figuras, fotografías, mapas, gráficas, cuadros y tablas deberán ubicarse dentro del texto.
- Las imágenes, fotografías y mapas se deben enviar también, por separado en formato JPG, PNG o TIFF, con una resolución mínima de 300 dpi/ppp (o superior de acuerdo con el tamaño de la figura) sin compresión y preferentemente a color (a menos que se trate de una representación que originalmente sea en blanco y negro o escala de grises).
- Para la publicación de la versión digital se mantendrán las imágenes a color.
- Para la versión impresa podrían modificarse a escala de grises, siempre que no afecte la correcta comunicación de la información, en particular los mapas.
- Las citas y referencias bibliográficas se harán según las Normas APA. Se debe incluir enlace DOI o enlace web en todos los casos que sea posible.
- Se recomienda el uso de gestores de referencias bibliográficas, como Zotero o Mendeley.

Las **Reseñas** tendrán una extensión máxima de 8 000 caracteres con espacios incluidos, y deben incluir la siguiente información:

- Título de la obra.
- Nombre y apellidos de los autores del libro (dirección o coordinación, en su caso).
- Año, ciudad y editorial.
- Cantidad de páginas.
- ISBN edición impresa o ISBN edición digital, según corresponda.
- Nombre del autor de la reseña e institución.
- Texto de la reseña

### **Derechos de autor**

En relación con los Derechos de autor, la *Revista Geográfica* se rige por los Estatutos del IPGH y según lo que se establece en el Capítulo V “Derechos de autor y reconocimiento de autoría” del Reglamento de Publicaciones del Instituto.

En lo específico, sobre la publicación de artículos originales en las revistas del IPGH no se reconocerá compensación económica alguna por derechos de autor.

Asimismo, el autor reconoce que al ser aceptado su artículo para ser incluido en cualquier publicación periódica que edita el Instituto, cede los derechos patrimoniales de autor a favor del IPGH y lo autoriza para realizar la publicación de acuerdo con los criterios editoriales y características de impresión vigentes en ese momento

La *Revista Geográfica* se adhiere al licenciamiento Creative Commons en la modalidad Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional, lo que implica que los usuarios pueden compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar — remezclar, transformar y crear a partir del material.

El IPGH, como licenciador no puede revocar estas libertades mientras se cumpla con los términos de la licencia.

En este sentido, los usuarios, deben cumplir las condiciones siguientes:

- Reconocimiento — Debe reconocer adecuadamente la autoría, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de una manera que sugiera que tiene el apoyo del licenciador o lo recibe por el uso que hace.
- NoComercial — No puede utilizar el material para una finalidad comercial.
- CompartirIgual — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, deberá difundir sus contribuciones bajo la misma licencia que el original.
- No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que legalmente restrinjan realizar aquello que la licencia permite.

El envío de una propuesta para publicación significa que los autores conocen y se adhieren a las condiciones de la **Revista Geográfica** expresados en estas directrices.

Dudas o comentarios, favor de dirigirse a:

M. Sc. Johana Marcela Norori Solís

Editora

Universidad Nacional Autónoma de Honduras

correos electrónicos:

[revista.geografica@ipgh.org](mailto:revista.geografica@ipgh.org) o [publicaciones@ipgh.org](mailto:publicaciones@ipgh.org)

<https://revistasipgh.org/index.php/regeo>



INSTITUTO PANAMERICANO DE  
**GEOGRAFÍA E HISTORIA**



# Revista **Geográfica**

## CONVOCATORIA

La Comisión de Geografía del  
Instituto Panamericano de Geografía e Historia,

Hace un cordial llamado a investigadores y académicos de la comunidad geográfica a postular artículos para ser publicados en los próximos dos números de la *Revista Geográfica*:

- Número 165 (fecha límite de recepción: 31 de marzo de 2022)
- Número 166 (fecha límite de recepción: 31 de agosto de 2022)

Los trabajos deberán ser ingresados en el sistema de gestión editorial OJS (Open Journal System) a través de su registro en:  
<https://revistasipgh.org/index.php/regeo/about/submissions>

La *Revista Geográfica*, creada desde 1941, tiene actualmente una periodicidad semestral y recibe de manera permanente artículos de investigación, sirviendo como medio de expresión técnico y científico en el área de Geografía y ciencias afines.

<https://revistasipgh.org>

---

Para más información puedes escribir a los correos:  
[revista.geografica@ipgh.org](mailto:revista.geografica@ipgh.org) | [publicaciones@ipgh.org](mailto:publicaciones@ipgh.org)



Edición del  
Instituto Panamericano de Geografía e Historia  
realizada en su Departamento de Publicaciones  
Ex Arzobispado núm. 29, Col. Observatorio  
11860, Ciudad de México, México  
Tels.: 5277-5791 / 5277-5888 / 5515-1910  
[publicaciones@ipgh.org](mailto:publicaciones@ipgh.org)  
2022

**ESTADOS MIEMBROS  
DEL  
INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA**

**EL IPGH, SUS FUNCIONES Y SU ORGANIZACIÓN**

**Argentina**

**Belice**

**Bolivia**

**Brasil**

**Chile**

**Colombia**

**Costa Rica**

**Ecuador**

**El Salvador**

**Estados  
Unidos  
de América**

**Guatemala**

**Haití**

**Honduras**

**México**

**Nicaragua**

**Panamá**

**Paraguay**

**Perú**

**República  
Dominicana**

**Uruguay**

**Venezuela**

El Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) fue fundado el 7 de febrero 1928 por resolución aprobada en la Sexta Conferencia Internacional Americana que se llevó a efecto en La Habana, Cuba. En 1930, el Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos construyó para el uso del IPGH, el edificio de la calle Ex Arzobispado 29, Tacubaya, en la Ciudad de México.

En 1949, se firmó un convenio entre el Insituto y el Consejo de la Organización de los Estados Americanos y se constituyó en el primer organismo especializado de ella.

El *Estatuto Orgánico* del IPGH cita en su Capítulo II, artículo 2, su Misión:

1. Fomentar, coordinar y difundir los estudios pertenecientes a sus áreas de interés, las cuales son Cartografía, Geografía, Historia, Geofísica y las ciencias afines en beneficio de América;
2. Apoyar la iniciativa, innovación y generación de conocimiento en sus áreas de interés, a través de estudios, capacitaciones y trabajos de sus Comisiones;
3. Promover la cooperación interdisciplinaria entre los institutos de América y organizaciones internacionales afines.

Solamente los Estados Americanos pueden ser miembros del IPGH. Existe también la categoría de Observador Permanente, actualmente se encuentran bajo esta condición: España, Francia, Israel, Jamaica y República de Corea.

El IPGH se compone de los siguientes órganos panamericanos:

1. Asamblea General;
2. Autoridades;
3. Secretaría General; y
4. Comisiones.

Además, cada Estado Miembro designa y crea oficialmente una Sección Nacional, órgano establecido para el cumplimiento de la misión, visión y estrategia científica del IPGH en el ámbito nacional, contando para ello con el apoyo financiero de su gobierno.

**Efectos del cambio climático en la precipitación local del Parque Nacional Radal Siete Tazas, República de Chile, empleando un método de downscaling estadístico**

Juan José Garcés Gálvez

**Vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán, Colombia, a los incrementos de temperatura en un escenario de cambio climático**

Cristian D. Moreno, Juan D. Palma, Jenny M. Trilleras y José A. Salamanca

**Gradiente de vulnerabilidad socioambiental en el Partido de Quilmes, Provincia de Buenos Aires, Argentina**

Pablo Lacabana

**Análisis de la distribución espacial de la precipitación anual (1979-2014) aplicando métodos de interpolación en la Región Occidental del Paraguay**

Monserrat Victoria García-Calabrese, María Teresa Paniagua y Elena Chicaiza

**Evaluación de estimaciones satelitales de precipitación nívea en la cuenca superior del río San Juan, Argentina**

Adriana Lorena Cardús Monserrat

**Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos con CMIP5 para el Perú**

Jorge Llamocca Huamani

**Evaluación de la vulnerabilidad socioecológica: estudio de caso en la Parroquia San Juan Cuenca, del río Chimborazo, Ecuador**

Carlos Rolando Rosero Erazo, Andrés Agustín Beltrán Dávalos y Dayana Alvarez

***Un lugar de La Mancha. La patria de Don Quijote al descubierto***

Antonio F. Rodríguez Pascual

**ISSN 2663-399X**