

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

Análisis de tendencias históricas y proyecciones futuras de precipitación y temperatura en las microcuencas de las fuentes de captación de agua para consumo humano de la Asada Cipreses, cuenca alta del río Reventazón, Costa Rica

Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado como requisito para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE

en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Guido Iván Chaparro Fariña

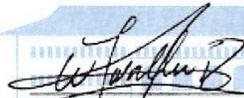
Turrialba, Costa Rica

2024

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

FIRMANTES:



William Jefferson Watler Reyes
William Watler Reyes, Ph.D.
Codirector de tesis



Christian Birkel, Ph.D.
Codirector de tesis



Dorian Carvajal Vanegas, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.
Decana, Escuela de Posgrado



Guido Iván Chaparro Fariña
Candidato

Dedicatoria

A Dios y a la Virgen María, por darme fortaleza, salud y tantas bendiciones.

A mis padres, Graciela Fariña y Guido Chaparro, quienes sin duda fueron el ejemplo más grande de lucha, esfuerzo y perseverancia de mi vida, y siempre me dieron su apoyo y confianza.

A mi adorada hija, Sol Agostina, que llegó como una luz en mi vida y desde el día uno me demostró que vale la pena cada sacrificio realizado en nombre de ella y mi familia.

A mi esposa, Paula Paniagua, por ser más que un ejemplo y compañera de vida para mí, una mujer valiente a quien admiro mucho y agradezco por cada momento para dedicarse a mí como también a nuestra hija.

A mis hermanas Nubia y Silvina, quienes fueron indispensables en cada etapa de mi vida. Sin duda, son el mayor ejemplo de sacrificio para cumplir todas las metas que se proponen.

A mi abuelo Silvio, quien en vida me inculcó siempre el estudio, el trabajo y la honradez.

Agradecimientos

Al Dr. Muhammad Ibrahim, a quien tengo un aprecio enorme y, con su gestión, me dio la oportunidad de estudiar en el Catie. Gracias por el apoyo y el interés en el bienestar de mi familia.

A mi consejero principal, profesor y amigo: William Watler, por la dedicación y apoyo constante en cada tiempo compartido y a quien debo cada aprendizaje.

A mi segundo consejero de tesis: Christian Birkel, y al miembro de mi comité, el profesor Dorian Carvajal, por la confianza, la dedicación, paciencia y las enseñanzas en este proceso de formación.

A la profe, Ph. D. Laura Benegas, por darme la confianza necesaria para enfrentar este desafío.

A la Asada Cipreses, especialmente a Sonia Aguilar Monge y a Carlos Garro Aguilar, por su constante atención y apoyo en cada aspecto de este proyecto.

A mis compañeros y amigos: Rene, Josseling y Danny, por su amistad, apoyo y acompañamiento incondicional todo el tiempo.

A la gente de posgrado, quienes siempre me brindaron una mano.

Al Catie, por darme la oportunidad de formarme como profesional y de vivir una experiencia única dentro de la institución.

A quienes conocí en el Catie, como Carlos Araya, Salvador Monge y Cristina Vidal, quienes se convirtieron en una familia para mí.

A mis compañeros de promoción, quienes, indudablemente, van a formar parte de mi vida, de momentos inolvidables.

Índice

1. Introducción.....	1
2. Metodología.....	2
2.1 Descripción del área de estudio	2
2.1.1 Ubicación.....	2
2.1.2 Descripción biofísica	3
2.1.2.1 Suelos	3
2.1.2.2 Pendiente en porcentaje	4
2.1.2.3 Clima.....	4
2.2 Proceso metodológico	4
2.2.1 Análisis de tendencias temporales.....	5
2.3.1.1 Corrección de sesgo de datos históricos	6
2.3.1.2 Corrección de sesgo de datos futuros.....	6
2.3.1.3 Comparación de series históricas y futuras	7
2.3.2 Balance climático (BC) mensual histórico y futuro	7
2.3.3 Índice de Precipitación Estandarizada (SPI).....	8
2.3.4 Análisis espacial del consumo de agua doméstico y otros usos	8
2.3.5 Zonificación de amenaza a la calidad de agua por potencial de deslizamientos	8
2.3.6 Zonificación de amenaza a la calidad de agua (sedimentos).....	9
2.3.7 Zonificación de amenaza a la calidad de agua (contaminación difusa)	10
3. Resultados.....	12
3.1- Analisis de tendencias temporales	12
3.1.2 Temperatura maxima.....	12
3.1.3 Temperatura mínima	14
3.1.4 Precipitación.....	16
3.1.5 Balance climático	18
3.1.6 Índice de precipitación estandarizado (SPI).....	19
3.1.7 Mapa de consumo de agua doméstico y otros usos.....	19
3.1.8 Zonificación del amenaza a la calidad de agua por potencial de deslizamientos	20
3.1.9 Zonificación de amenaza a la calidad de agua (sedimentos).....	22
3.1.10 Zonificación de amenaza a la calidad de agua (contaminación).....	24
4. Discusión	26
5- Conclusión.....	30
6- Bibliografía.....	31

Índice de cuadros

Cuadro 1. Valores del SPI.	8
Cuadro 2. Comparación del comportamiento histórico de la variable de temperatura máxima (°C) con respecto a los escenarios futuros.	12
Cuadro 3. Comparación del comportamiento histórico de la variable de temperatura mínima (°C) con respecto a los escenarios futuros.	14
Cuadro 4. Comparación del comportamiento histórico de la variable de precipitación(mm) con respecto a los escenarios futuros.....	16

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de las microcuencas que comprenden las fuentes de captación de agua para consumo humano de la ASADA Cipreses, parte alta de la cuenca del río Reventazón, Costa Rica.....	3
Figura 2. Características biofísicas del paisaje de la zona de estudio: a) Uso de suelo; b) Pendiente en porcentaje y c) Zonas climáticas	4
Figura 3. Esquema del proceso metodológico.....	5
Figura 4. Flujograma de cálculo del índice de contaminación difusa (ICNP).....	11
Figura 5. Comparación del comportamiento histórico de la temperatura máxima (°C) frente a los escenarios futuros.....	13
Figura 6. Comparación del comportamiento histórico de la variable de temperatura mínima (°C) con respecto a los escenarios futuros.....	15
Figura 7. Comparación del comportamiento histórico de la variable de precipitación (mm) con respecto a los escenarios futuros.....	17
Figura 8. Balance climático mensual del área de estudio.....	18
Figura 9. Boxplot de resultados mensuales del SPI en el área de estudio.....	19
Figura 10. Mapa de consumo de las microcuencas de la ASADA Cipreses.....	20
Figura 11. Mapa Zonificación de amenazas: susceptibilidad a deslizamientos.....	21
Figura 12. Susceptibilidad a deslizamientos.....	22
Figura 13. Mapa de Zonificación de amenazas a la calidad de agua (sedimentos).....	23
Figura 14. Clasificación de sedimentos.....	24
Figura 15. Mapa de Zonificación de amenazas a la calidad de agua (contaminación difusa índice ICNP).....	25
Figura 16. Distribución de la vulnerabilidad de la contaminación difusa (índice ICNP).....	26

Lista de acrónimos

Asada	Asociación Administradora de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
DEM	Modelo digital de elevación (<i>Digital Elevation Model</i>)
EQM	Modelo de mapeo cuantílico
ICNP	Índice de contaminación no puntual (<i>Pollution Non-Point Index</i>)
RUSLE	Ecuación universal de pérdida de suelo (<i>Revised Universal Soil Loss Equation</i>)
SDR	Sediment Delivery Ratio
SPI	Índice de precipitación estandarizada (<i>Standardized Precipitation Index</i>)
SSP	<i>Shared Socioeconomic Pathways</i>

Análisis de tendencias históricas y proyecciones futuras de precipitación y temperatura en las microcuencas de las fuentes de captación de agua para consumo humano de la Asada Cipreses, cuenca alta del río Reventazón, Costa Rica

Guido Iván Chaparro Fariña¹

¹ Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Catie); Turrialba, Costa Rica
Guido.chaparro@catie.ac.cr

Resumen:

En esta investigación, se analizó las tendencias de precipitación y temperatura en las microcuencas que constituyen las fuentes de captación de agua para consumo humano de la Asada Cipreses, en la cuenca alta del río Reventazón, Costa Rica, un área ecológica y socioeconómica clave, pero vulnerable a fenómenos extremos de lluvias intensas y deslizamientos. El objetivo de la investigación fue analizar las series de datos históricos y futuros de precipitación y temperatura, estimar la diferencia espacio-temporal del balance climático mensual histórico y futuro de la Asada Cipreses, evaluar el índice de precipitación estandarizada y zonificar las principales amenazas en las microcuencas: susceptibilidad a deslizamiento y contaminación difusa (índice ICNP).

Se analizaron datos históricos (1990-2019) de WorldClim 2.1 y se corrigieron sesgos en RStudio 4.3.0. Los modelos MIROC6 y HadGEM3-GC31-LL, con escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 (2021-2040), se utilizaron para generar proyecciones con píxeles de 12.5 m de resolución. Se aplicó la ecuación universal de pérdida de suelo (RUSLE) para el riesgo de sedimentación y el índice ICNP para contaminación difusa, y se generaron los mapas con QGIS 10.3. Los resultados muestran aumento de las temperaturas y una variabilidad de las precipitaciones, un incremento de la probabilidad de sequías e inundaciones. Aunque el balance hídrico mensual es positivo, se prevé una menor disponibilidad de agua, lo que aumenta la vulnerabilidad hídrica. Las áreas con mayor susceptibilidad de deslizamientos coinciden con pendientes y cercanías a cuerpos de agua. La contaminación difusa, asociada al uso agrícola y deforestación, representa un desafío en condiciones de lluvias intensas. La Asada Cipreses puede mitigar estos riesgos mediante la conservación de suelos, control de sedimentos y educación ambiental, promoviendo prácticas sostenibles para proteger las fuentes de captación de agua para consumo humano.

Palabras clave: Cambio climático, SPI, balance climático, sedimento, contaminación difusa (índice ICNP)

Analysis of historical trends and future projections of precipitation and temperature in the micro-basins of the sources of water catchment for human consumption of Asada Cipreses, upper basin of the Reventazón River, Costa Rica

Guido Iván Chaparro Fariña ¹

¹ Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza- Catie; Turrialba, Costa Rica
Guido.chaparro@catie.ac.cr

Abstract:

The research analyzed precipitation and temperature trends in the micro-basins that constitute the sources of water catchment for human consumption of Asada Cipreses, in the upper basin of the Reventazón River, Costa Rica. A key ecological and socioeconomic area, but vulnerable to extreme phenomena of intense rainfall and landslides. The purpose of the research has been to analyze the historical and future data series of precipitation and temperature, estimate the spatio-temporal difference of the historical and future monthly climatic balance of Asada Cipreses, evaluate the Standardized Precipitation Index and zone the main threats in the micro-basins: susceptibility to landslides and diffuse pollution (ICNP index).

Historical data (1990-2019) from WorldClim 2.1 were analyzed and biases were corrected in Rstudio 4.3.0. The MIROC6 and HadGEM3-GC31-LL models, in SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios (2021-2040), were used to generate projections at 12.5 m resolution. The study applied the Universal Soil Loss Equation (RUSLE) for sedimentation risk and the ICNP index for diffuse pollution, generating maps in QGIS 10.3. The results show an increase in temperatures and variability of precipitation, an increase in the probability of droughts and floods. Although the monthly water balance is positive, a lower availability of water is expected, which increases water vulnerability. The areas with the highest susceptibility to landslides coincide with slopes and proximity to bodies of water. Diffuse pollution, associated with agricultural use and deforestation, represents a challenge in conditions of intense rainfall. Asada Cipreses can mitigate these risks through soil conservation, sediment control and environmental education, promoting sustainable practices to protect water sources.

Keywords: Climate change, SPI, climate balance, sediment, diffuse contamination (ICNP index).

1. Introducción

Los efectos del cambio climático en los ecosistemas son diversos y abarcan una amplia gama de impactos, incluidas aquellas alteraciones en la disponibilidad hídrica de los ríos hasta modificaciones en la biodiversidad y el aumento en la propagación de enfermedades transmitidas por vectores (Chiabai *et al.*, 2018). Además, el cambio climático constituye uno de los principales desafíos que enfrenta la humanidad en la actualidad (Barrera-Hernández *et al.*, 2020).

Es fundamental destacar la problemática del cambio climático a nivel global con el fin de promover una comprensión clara y coherente entre los países, facilitando el diseño y la implementación de planes y políticas para la gestión ambiental (Bastidas Pacheco & Hernández, 2019). Entre las repercusiones más severas de la variabilidad climática se encuentran las sequías prolongadas, el incremento de la temperatura promedio, el aumento en la frecuencia de fenómenos climáticos, elevación del nivel del mar y la pérdida de biodiversidad, cuyas consecuencias suelen ser evidentes para la sociedad humana (Arce, 2013).

Los cambios en los elementos climáticos como la temperatura y la precipitación, ocurridos en los últimos años, han sido objeto de una variedad de estudios que se han centrado en aspectos como su seguimiento, aparición, frecuencia, duración, prevención, predicción e impacto (Jarma Orozco *et al.*, 2012).

Asimismo, la sequía ha impulsado avances tecnológicos al promover la investigación científica para optimizar el uso eficiente del agua. Aunque las soluciones tecnológicas son útiles para mitigar los daños durante la sequía, el aspecto crucial es cómo se administra, utiliza y regula el agua. Esta gestión es el aspecto más importante, ya que no solo está relacionado con la construcción de infraestructura, sino con el manejo adecuado de los recursos naturales. En este contexto, las consecuencias a los fenómenos extremos no deben considerarse desastres naturales, sino más bien resultados causados por acciones humanas (Ortega-Gaucin & Velasco, 2013).

Debido a su ubicación, geografía, geología, geomorfología y clima, Costa Rica es un país especialmente vulnerable a los fenómenos atmosféricos. Estos ejercen una influencia significativa en la dinámica socioeconómica del país, a menudo exacerbada por un crecimiento urbano desordenado y la falta de planificación territorial adecuada (Campos y Quesada, 2017).

El presente estudio se basa en el análisis de las tendencias históricas y proyecciones futuras de precipitación y temperatura en las microcuencas de la Asada Cipreses. La propuesta permite comprender las condiciones climáticas y sus impactos en las microcuencas que comprenden las fuentes de captación de agua, de manera que permita mejorar su manejo y gestión hídrica, proporcionando una información válida para la planificación de estrategias adaptativas ante los escenarios climáticos futuros (Almarza, 2005).

La investigación se realizó en las microcuencas que comprenden hidrográficamente las fuentes de captación de agua para consumo de agua de la Asada Cipreses, ubicadas en la parte alta de la cuenca del río Reventazón. Se trata de un área fundamental en los ámbitos tanto ecológico como socioeconómico para Costa Rica (Chaves Quirós, 2020). Sin embargo, es vulnerable a fenómenos extremos, como lluvias intensas y deslizamientos, los cuales representan un riesgo considerable de contaminación a las fuentes de agua que abastecen a las comunidades (Vargas & Lee, 2017).

Sobre este contexto descrito en los párrafos anteriores, el objetivo del estudio fue examinar las series de datos históricos y futuros de precipitación y temperatura, mediante los siguientes objetivos específicos:

caracterizar los datos de precipitación y temperatura históricos y futuros, estimar la diferencia espacio-temporal del balance climático mensual histórico y evaluar el índice de precipitación estandarizada (SPI, por sus siglas en inglés) y zonificar las amenazas de susceptibilidad a deslizamientos y de contaminación futura (índice ICNP), así como sus impactos en las fuentes de captación de agua a nivel de microcuencas.

Las microcuencas de la Asada Cipreses enfrenta desafíos significativos debido a la variabilidad climática y los posibles efectos del cambio climático, como el cambio de uso del suelo en las partes altas de las microcuencas. Las condiciones actuales de precipitación y temperatura, junto con las proyecciones futuras, sugieren un escenario en el que los eventos extremos, como sequías e inundaciones, podrían intensificarse, lo cual aumentaría la presión sobre los recursos hídricos y el entorno natural de la zona.

La evaluación de tendencias históricas y futuras de clima en las microcuencas se ha enfocado en estudiar las condiciones de temperatura y precipitación (1990-2019) mediante datos de alta resolución espacial y el uso de índices como el de precipitación estandarizado (SPI). Estas herramientas permiten identificar patrones de sequía y humedad que impactan tanto la disponibilidad de agua como la sostenibilidad de las fuentes hídricas. Adicionalmente, se han implementado modelos para proyectar escenarios climáticos futuros, como MIROC6 y HadGEM3-GC31-LL bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, que contribuyen a entender los posibles cambios en la temperatura y precipitación en el horizonte (2021-2040).

También resultó esencial evaluar los riesgos físicos, como las amenazas en grados de susceptibilidad a deslizamientos y la erosión laminar, que pueden afectar la calidad del agua debido a la sedimentación en cuerpos hídricos y a la contaminación difusa derivada de actividades agrícolas y la pérdida de cobertura forestal. Con la aplicación de modelos como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE) y el índice de contaminación no puntual (ICNP), se pueden identificar áreas críticas y priorizar acciones de conservación. Dichos desafíos subrayan la necesidad de precisar estrategias de gestión integradas, donde la Asada Cipreses, como entidad administradora de los recursos hídricos, juegue un papel clave en promover prácticas de manejo sostenible del suelo, control de sedimentos y educación ambiental. De esta manera, se fortalecería la resiliencia de las comunidades locales y protegerían las fuentes de agua frente a las crecientes demandas hídricas y climáticas. Contar con un registro de los datos anteriores es fundamental para una toma de decisiones informadas en cuanto a la gestión de las fuentes de captación de agua para consumo humano bajo el enfoque de cuencas hidrográficas, la planificación a futuro y la adaptación al cambio climático (Gutiérrez Villalpando *et al.*, 2019).

2. Metodología

2.1 Descripción del área de estudio

2.1.1 Ubicación

El área de estudio comprende las microcuencas hidrográficas que abarcan las fuentes de captación de agua de la Asada Cipreses y sus usuarios, ubicadas en la parte alta de la cuenca del río Reventazón, en la subvertiente norte de la vertiente del Caribe costarricense. La parte alta de la cuenca del río Reventazón comprende, desde su límite superior (Cartago) hasta el sitio de presa Guayabo, un área de 1530.90 km², ubicada entre los meridianos 83° 33' y los 84° 02' de longitud oeste, y entre los paralelos 09° 33' y 10° 02' de latitud norte. Abarca los cantones de Alvarado, Oreamuno y Paraíso.

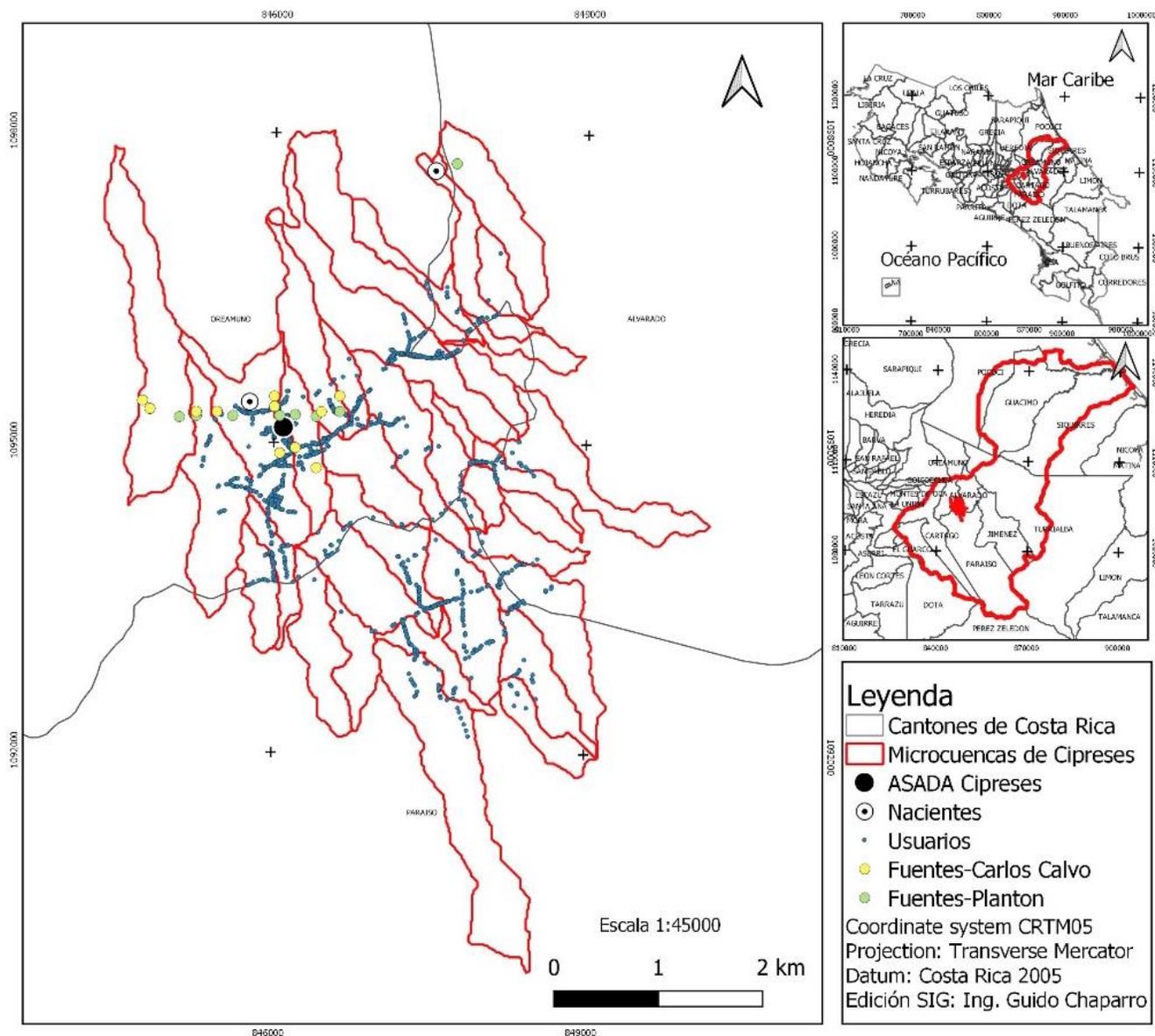


Figura 1. Ubicación de las microcuencas que comprenden las fuentes de captación de agua para consumo humano de la Asada Cipreses, parte alta de la cuenca del río Reventazón, Costa Rica

2.1.2 Descripción biofísica

2.1.2.1 Suelos

El uso del suelo en el área de estudio refleja una combinación de actividades forestales y tierras no intervenidas. Las zonas de bosque maduro, que representan un total de 1.51 hectáreas, corresponden a áreas con mínima intervención humana, caracterizadas por árboles viejos y ecosistemas bien establecidos. Estas áreas son esenciales para la conservación de la biodiversidad y el equilibrio ecológico. Por su parte, el bosque secundario, el cual cubre 64.41 hectáreas, está en proceso de regeneración después de haber sido alterado, lo que muestra una dinámica de recuperación natural.

La mayor parte del área, con 1774.95 hectáreas, está clasificada como otras tierras, que no están cubiertas por bosque ni por plantaciones forestales. Estas áreas pueden ser utilizadas para diversas actividades

agropecuarias o habitacionales. Finalmente, las plantaciones forestales, que ocupan una mínima fracción de 0.02 hectáreas y proporcionan madera u otros productos esenciales para la economía local, están destinadas a la reforestación con fines comerciales o de conservación (Sinac, 2022).

2.1.2.2 Pendiente

En cuanto a la pendiente del terreno, el área de estudio se caracteriza principalmente por zonas fuertemente onduladas, con pendientes entre el 30 % y el 60 %, cubriendo una extensión de 1501.96 hectáreas. Estas áreas, debido a su inclinación, presentan riesgos de erosión y deslizamientos, lo que limita las actividades agrícolas y de construcción. Las áreas de pendiente moderada, que comprenden el 15 % al 30 % de inclinación, cubren 337.63 hectáreas. Si bien estas zonas pueden ser utilizadas para ciertos tipos de cultivos o infraestructura, requieren de técnicas de manejo de suelo adecuadas para evitar la degradación del terreno. Finalmente, las áreas con pendiente suave, que van del 2 % al 15 %, ocupan solo 1488 hectáreas y son las más aptas para actividades agropecuarias intensivas, debido a la facilidad de manejo del terreno y el bajo riesgo de erosión (Sinac, 2022).

2.1.2.3 Clima

El clima se caracteriza por ser tropical húmedo, enmarcado dentro del régimen de precipitación del Caribe. Se trata de una región lluviosa todo el año, con un ligero descenso en los meses de febrero, marzo y octubre. Cuenta con dos rasgos esenciales que definen a este clima: temperaturas superiores los 22 °C y precipitación mensual promedio por debajo de los 75 mm. Sin embargo, la región presenta contrastes en cuanto a las lluvias, debido a la interacción de elementos climáticos y factores geográficos propios. El relieve montañoso, las extensas llanuras y la influencia del lago de Nicaragua al noroeste dan lugar a una serie de pequeñas subregiones climáticas con características distintivas (Solano & Villalobos, 2001).

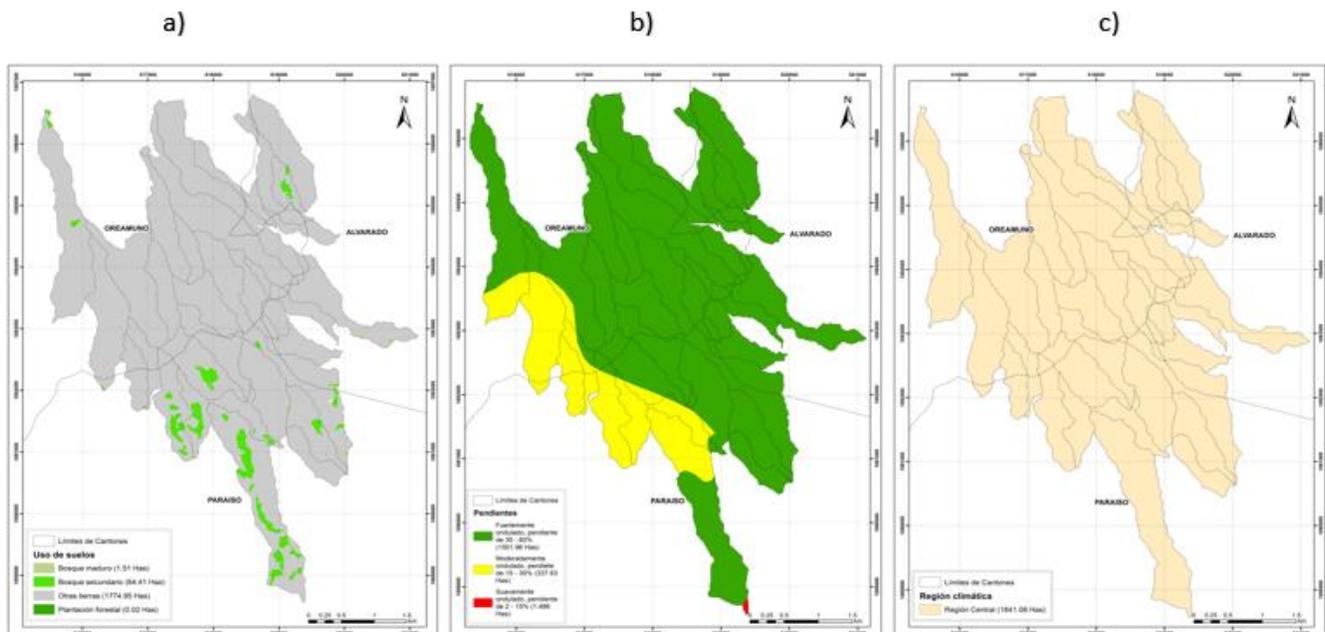


Figura 2. Características biofísicas del paisaje de la zona de estudio: a) Uso de suelo, b) Pendiente en porcentaje y c) Zonas climáticas

2.2 Proceso metodológico

A continuación, se describe el proceso metodológico (Figura 3) de acuerdo con los objetivos específicos de la investigación: primeramente, la caracterización de los datos de precipitación y temperatura históricos y futuros mediante el análisis de las tendencias temporales; seguidamente, la estimación de la diferencia espacio-temporal del balance climático mensual histórico y futuro; seguidamente, la estimación del índice de precipitación estandarizada. Se realizó el análisis espacial del consumo de agua, la zonificación de deslizamientos, la zonificación de amenazas a la calidad del agua por sedimentación y la zonificación de contaminación difusa.

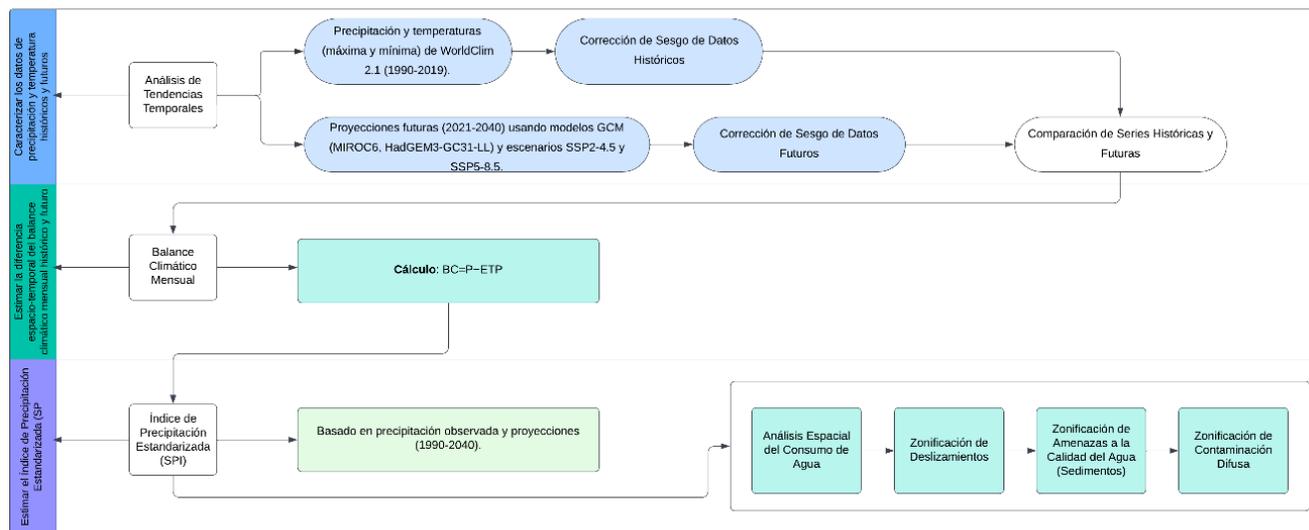


Figura 3. Esquema del proceso metodológico

2.2.1 Análisis de tendencias temporales

Para la caracterización del clima histórico y futuro para las condiciones del área de estudio, correspondiente a las microcuencas de las fuentes de captación de agua de la Asada Cipreses, se emplearon datos de precipitación (mm) y de temperaturas máximas (°C) y mínimas (°C). Los datos se extrajeron de la base de datos de WorlClim 2.1 (Fick & Hijmans, 2017).

Como clima histórico, se utilizó una serie temporal mensual de datos que abarca el periodo 1990-2019. En cuanto al clima futuro, se utilizaron series mensuales de datos ajustados estadísticamente para reducir la resolución espacial de los datos históricos. Los ajustes se realizaron corrigiendo el sesgo, para lo cual, se aplicó un modelo de mapeo cuantílico (EQM) utilizando la técnica QUANT en RStudio, que ajusta los datos simulados a los cuantiles empíricos de los datos observados. Asimismo, se emplean datos derivados del proyecto de Inter Comparación de Modelos Climáticos (CMIP6) a partir de dos Modelos de Circulación General (GCMs "MIROC6" y "HadGEM3-GC31-LL"). Ambos modelos han sido recomendados para la proyección del clima futuro en Costa Rica (Hidalgo *et al.*, 2021). Posteriormente, se ensamblaron los resultados de ambos modelos a través del cálculo de la media aritmética, lo cual generó un único resultado futuro de proyección climática para fines comparativos.

Los datos futuros proyectados abarcaron el periodo 2021-2040 bajo dos escenarios de concentración climáticos de gases de efecto invernadero: SSP2-4.5 (escenario intermedio) y SSP5-8.5 (escenario de altas emisiones). Con el objetivo de analizar las variaciones espaciales en las microcuencas para ambos conjuntos de datos, se aplicó el proceso de *downscaling* para generar datos históricos y futuros a una

resolución espacial de 12.5 m. El método utilizado es un remuestreo (*resampling*) basado en un modelo digital de elevación proveniente de ALOS Palsar, el cual ofrece una resolución de 12.5 m.

2.3.1.1 Corrección de sesgo de datos históricos

Los datos históricos y futuros, posteriores al remuestreo (resampleados), fueron corregidos por sesgo para reducir los errores sistemáticos derivados de la regionalización aplicada para el área de las microcuencas. En el caso específico de los datos históricos de precipitación, se utilizó la base de datos diarios de CHIRPS en cuadrículas de 5 km¹. Para la corrección de sesgo, se empleó el método de corrección lineal de sesgo basado en estaciones meteorológicas distribuidas en Costa Rica (Arciniega-Esparza & Birkel, 2020).

Para los datos de temperaturas máxima y mínima, se generó una serie de datos regionalizados que considera las tasas de disminución de ambas variables de temperaturas en función de la elevación sobre el nivel del mar. Las tasas de caída seleccionadas para temperatura máxima y mínima fueron de 0.005°C/m y 0.0056°C/m, respectivamente. La elección de estos umbrales se basó en el estudio Li *et al.*, (2015), quienes evaluaron patrones de tasa de caída de temperatura usando más de 500 estaciones meteorológicas en altitudes de 2 m hasta los 4200 m sobre el nivel del mar. Los valores de temperatura corregidos se generaron a partir de la siguiente ecuación:

$$Temp_{obs} = Temp_{0\ msn} - (\Delta temp * elev)$$

Donde $Temp_{obs}$ corresponde al valor de temperatura máxima y mínima local, $Temp_{0\ msn}$ es al valor de la temperatura máxima y mínima a nivel del mar, $\Delta temp$ es la tasa de caída de la temperatura y $elev$ es la elevación del terreno en metros.

Para la corrección del sesgo en las variables de precipitación y temperatura observada y simulada en el periodo histórico, se utilizó un modelo de mapeo cuantílico (EQM). El ajuste se realizó a través de la técnica QUANT, un algoritmo no paramétrico que aplica una función de transformación empírica no paramétrica (Enayati *et al.*, 2020). La función `fitQmapQUANT` del paquete `Qmap` disponible en R 4.3.0 fue utilizada para estimar la función de distribución empírica de los datos observados y simulados defendiendo los cuantiles correspondientes. Los cuantiles de los datos simulados se calcularon utilizando los cuantiles empíricos, mientras que los cuantiles de los datos observados se calcularon como la media de las observaciones (Gudmundsson, 2022). Una vez ajustado el modelo, se aplicó a la corrección cuantifica los datos simulados mediante la función `doQmapQUANT`, que transforma los valores simulados con base en la función de transformación, obtenida con `fitQmapQUANT`. Para los valores fuera de los cuantiles estimados de los datos simulados, la transformación se estimó mediante interpolación tricúbica monótonica (`type="tricube"`) lo que, asegura una interpolación suave y monótonica (continua) de los valores (Gudmundsson, 2022).

2.3.1.2 Corrección de sesgo de datos futuros

Luego de corregir los datos históricos, los resultados obtenidos se utilizaron para ajustar los datos futuros. El proceso de corrección de sesgo para los datos futuros se realizó siguiendo la metodología descrita por Pierce *et al.*, (2015), la cual se estructura en los siguientes pasos:

¹ Estos datos también fueron resampleados a 12.5 m utilizando el DEM.

1. Para cada valor del período futuro, se identifica el valor más cercano del período histórico simulado sin corrección y su respectivo valor corregido, obteniendo previamente en el ajuste de los datos históricos.
2. El valor corregido para el período futuro se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$V_{SFC} = \frac{V_{SFO} * V_{SHC}}{V_{SHO}}$$

Donde VSFC: valor simulado para el período futuro, corregido, VSFO: valor simulado en período futuro, original, VSHC: valor simulado para el período histórico, corregido, y VSHO: valor simulado para el período histórico, original.

El método permite ajustar los datos futuros tomando en cuenta las correcciones aplicadas al periodo histórico. De este modo, garantiza una mayor precisión en las proyecciones climáticas. Tanto la descarga de los datos como el procesamiento y la corrección, fueron ejecutados utilizando el *software* estadístico R (R Core Team, 2024).

2.3.1.3 Comparación de series históricas y futuras

Para la comparación de las series históricas y futuras, se utilizó la base de datos previamente ajustada mediante la corrección de correlaciones y sesgos, empleando datos diarios corregidos de CHIRPS. Las series futuras de ambos escenarios climáticos fueron ensambladas y ajustadas con el fin de realizar la comparación entre el periodo histórico 1990-2019 y el período futuro 2021-2040, considerando los escenarios de emisiones optimistas (SSP2-4.5) y pesimistas (SSP5-8.5).

El análisis se basó en el estudio detallado del patrón de distribución de las series temporales, donde se calcularon las medias, desviaciones estándar, valores máximos y mínimos para ambos periodos. Estos indicadores brindaron una visión clara de las tendencias y variaciones climáticas a lo largo del tiempo. En ese sentido, fue posible llevar a cabo una comparación precisa entre las series históricas y futuras. De esta forma, se evaluaron los posibles cambios en el clima bajo diferentes escenarios de emisiones, lo que facilitó la identificación de riesgos asociados a la variabilidad climática futura.

2.3.2 Balance climático (BC) mensual histórico y futuro

El cálculo del balance climático (BC) se llevó a cabo mediante la diferencia entre la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP), empleando la siguiente ecuación: $BC = P - ETP$ (Thornthwaite, 1948). Para la estimación de la ETP mensual (en mm), se utilizaron los valores promedio, máximo y mínimo de la temperatura (T_{media} , $T_{máx.}$, $T_{mín.}$) y la radiación extraterrestre (R_a). La ecuación empleada para determinar la evapotranspiración potencial (Hargreaves & Allen, 2003) fue la siguiente:

$$ETP = 0.0023(T_{media} + 17.8)(T_{máx.} - T_{mín.})^{0.5} \times R_a$$

El BC se calculó mensualmente tanto para cada mes de la serie histórica (1990-2019) como para la serie futura (2021-2040). Se consideraron dos escenarios climáticos futuros: uno optimista (SSP 2.6) y otro pesimista (SSP 8.5). Se identificaron las variaciones en la disponibilidad hídrica bajo diferentes escenarios climáticos y se proporcionó información clave para la planificación, el manejo y la gestión de las fuentes de captación de agua para la Asada.

2.3.3 Índice de precipitación estandarizada (SPI)

Para el cálculo del índice de precipitación estandarizado (SPI), según la metodología propuesta por McKee *et al.* (1993) y mediante la técnica de Beguera *et al.* (2016) para evaluar las condiciones de sequía o humedad, se utilizaron datos históricos de precipitación del periodo (1990 – 2019) y datos futuros del periodo (2021-2040) bajo los escenarios climáticos (SSP2-4.5 y SSP5-8.5). Las métricas de superávit y déficit mensual de agua en términos de magnitud, duración y frecuencia se calcularon de forma tabulada para la Asada Cipreses. El cálculo de SPI se basa en los datos de precipitación observada durante un período específico, en intervalos determinados, los cuales pueden abarcar de 1, 3, 6, 12 meses o más.

La precipitación acumulada para cada intervalo temporal se compara con una distribución de probabilidad acumulada, obtenida a partir de los datos históricos de precipitación para el mismo período, permitiendo su estandarización. Este proceso genera un índice con una media de cero y una desviación estándar de uno, lo que facilita la interpretación de las condiciones de humedad o sequía en función de los valores de SPI.

El SPI es un valor adimensional: los valores positivos indican condiciones de precipitación superiores a la media (condiciones de humedad), mientras los valores negativos de precipitación por debajo de lo normal indican condiciones de sequía. A continuación (Cuadro 1), se presenta una interpretación común de los valores del SPI (Mlenga *et al.*, 2019).

Cuadro 1. Valores del SPI

SPI	Condición
≥ 2.0	Extrema humedad
1.5 a 1.99	Humedad severa
1.0 a 1.49	Humedad moderada
-0.99 a 0.99	Condiciones normales
-1.0 a -1.49	Sequía moderada
-1.5 a -1.99	Sequía severa
≤ -2.0	Sequía extrema

2.3.4 Análisis espacial del consumo de agua doméstico y otros usos

Para el análisis espacial del consumo de agua doméstico y otros usos en la Asada Cipreses, se utilizaron datos proporcionados por la misma Asada, sobre los usuarios, niveles de consumo, características geográficas y la proximidad a fuentes hídricas. Las nacientes de Plantón y Carlos Calvo fueron identificadas mediante levantamientos de campo y georreferenciadas para su representación en un sistema de información geográfica (SIG). La información recolectada fue organizada y procesada en QGIS 3.10 para integrarla en el análisis espacial.

El consumo de agua de los usuarios se representó mediante la elaboración de un mapa de calor, categorizado en cinco niveles: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. Para el mapa de calor, se utilizó la plataforma QGIS 3.10, donde se realizó la interpolación espacial con el fin de identificar áreas de mayor y menor demanda hídrica.

2.3.5 Zonificación de amenaza a la calidad de agua por potencial de deslizamientos

Para determinar las áreas de susceptibilidad a deslizamientos en la zona de estudio, se empleó el método morfométrico propuesto por Quesada y Feoli (2018). Este enfoque combina variables morfológicas del terreno para identificar zonas con mayor propensión a deslizamientos. Se utilizó el modelo digital de elevación (DEM) ALOS PALSAR con una resolución espacial de 12.5 metros, adecuado para análisis a pequeña escala y de descarga gratuita. Se corrigieron errores potenciales en el DEM mediante la herramienta “Fill” en ArcGIS 10.3.

Posteriormente, se empleó SAGA GIS 9.3.1 para generar las variables clave, como pendiente, LS Factor (que evalúa la longitud y pendiente de las laderas) y el Terrain Ruggedness Index (TRI), que mide la rugosidad del terreno. Además, en ArcGIS 10.3, se calcularon la densidad de curvas de nivel y de ríos utilizando la herramienta Line Density. Todas las variables se estandarizaron en un rango entre 0 y 1 mediante el Raster Calculator de ArcGIS 10.3 para facilitar su combinación. Finalmente, las variables estandarizadas se sumaron para identificar las áreas con mayor susceptibilidad y se reclasificaron en cinco categorías (muy alta, alta, media, baja y muy baja) utilizando el método de clasificación Natural Jenks.

2.3.6 Zonificación de amenazas a la calidad de agua (sedimentos)

Para la zonificación de sedimentación en las microcuencas, se utilizó el módulo Sediment Delivery Ratio (SDR) del modelo SWAT 2.0 que estima el flujo de sedimentos hacia las fuentes de captación de agua de la Asada. El modelo calcula la pérdida anual de suelo por píxel y estima el coeficiente de aporte de sedimentos (SDR), el cual indica la proporción de suelo erosionado que llega a los cuerpos de agua. Se asume que el sedimento que alcanza la corriente es transportado hasta la salida de la cuenca (Vigiak *et al.*, 2012; Leon *et al.*, 2015; Hamel *et al.*, 2015; Sharp *et al.*, 2018).

El cálculo de la pérdida de suelo usa la ecuación universal de pérdida de suelo (RUSLE):

$$RUSLE_i = R_i * K_i * LSi * C_i * P_i$$

Donde:

R_i = erosividad de la lluvia

K_i = erosionabilidad del suelo

LS_i = longitud y pendiente del terreno

C_i = cobertura del suelo

P_i = prácticas de conservación del suelo

El coeficiente de aporte de sedimentos (SDR_i), se calcula en función de la conectividad hidrológica del área usando el índice de conectividad (IC):

$$IC = \log_{10}(Dup/Ddn)$$

Donde:

Dup es el componente ascendente de la pendiente y Ddn el descendente.

El SDR_i se deriva del IC usando una función sigmoide:

$$SDR_i = SDR_{max} / (1 + \exp((IC_0 - IC_i)/K_b))$$

El sedimento exportado por cada píxel se estima mediante la fórmula:

$$E_i = \text{RUSLE}_i * \text{SDR}_i$$

El sedimento total exportado se obtiene sumando el sedimento de cada píxel:

$$E = \sum E_i$$

Además, como parte de esta metodología, se elaboró un mapa para representar el fenómeno gráficamente y se empleó un mapa de zonificación en el que se clasificaron las áreas de acuerdo con su potencial de erosión y generación de sedimentos. Las categorías establecidas fueron: baja, media baja, media, media alta y alta, basadas en t/ha.

2.3.7 Zonificación de amenazas a la calidad de agua (contaminación difusa)

Para definir la zonificación de áreas potenciales de contaminación difusa de las microcuencas que comprenden las fuentes de captación de agua de la Asada Cipreses, se empleó el método del índice de contaminación no puntual (ICNP, o PNPI, por sus siglas en inglés), diseñado por Munafó *et al.*, (2005) y descrito en el artículo publicado por Gosweiller *et al.* (2021). El índice se basa en evaluar la presión ejercida en ríos y otras fuentes de agua superficial por el uso de la tierra a través de una determinada cuenca, subcuenca o microcuenca.

La metodología incorpora el conocimiento de expertos para asignar valores a cada uno de los indicadores utilizado en la ponderación del índice. Teóricamente, la presión generada por la contaminación difusa en diferentes cuerpos de agua desde diversas unidades de tierra se expresa en el índice a través de tres indicadores fundamentales: el indicador de cobertura del suelo (LCI), el indicador de escorrentía (RoI) y el indicador de distancia a la red de drenaje superficial. De esta manera, la contribución potencial a la contaminación desde diversas áreas y la movilidad de los contaminantes están determinadas por la capacidad de retención y transporte de agua de las distintas zonas de la microcuenca, lo cual proporciona un enfoque integral para identificar áreas críticas en términos de la contaminación difusa en las microcuencas de la Asada Cipreses.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo utilizado para el cálculo del índice de contaminación no puntual (ICNP) (PNPI, por sus siglas en inglés):

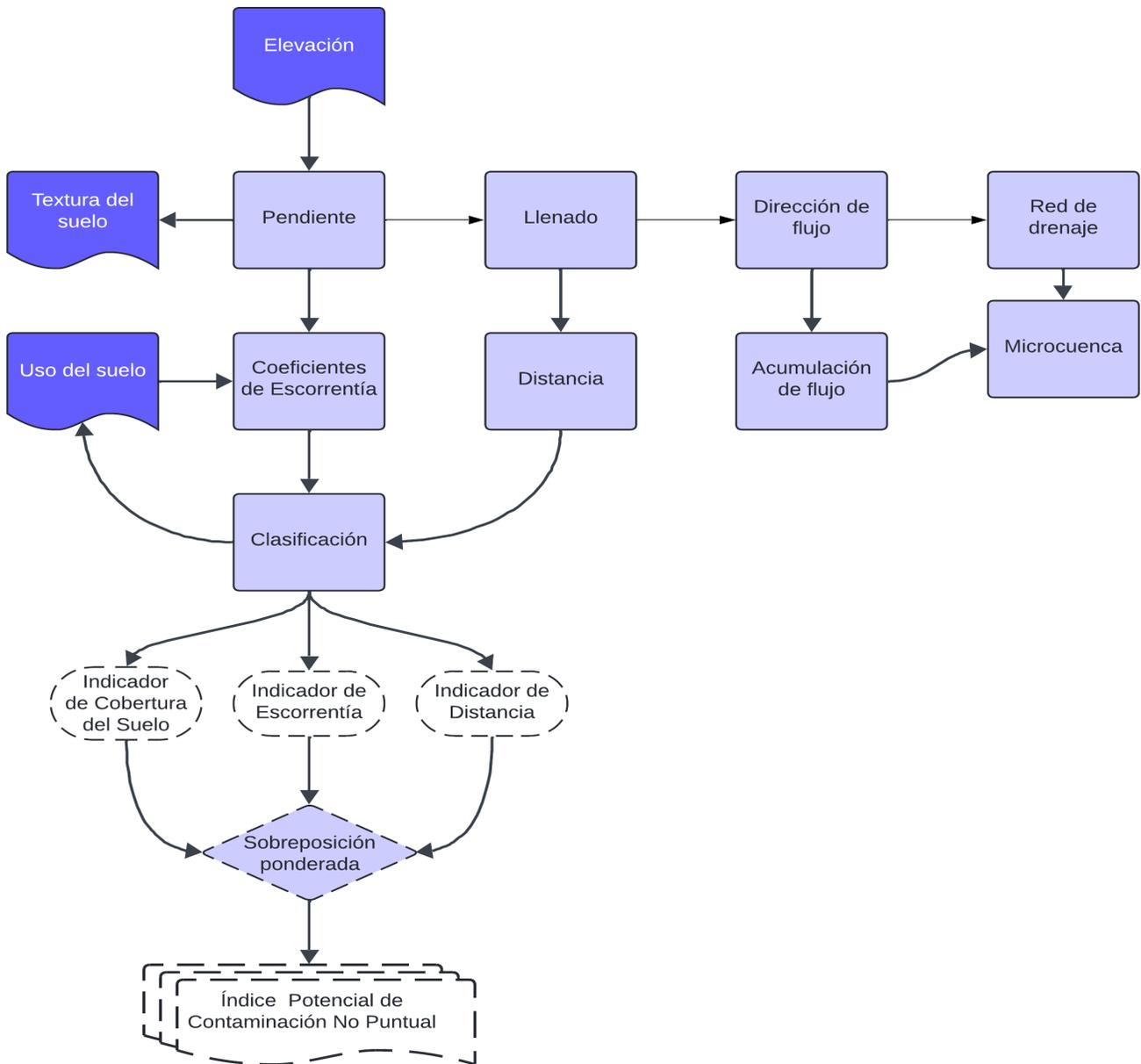


Figura 4. Flujograma de cálculo del índice de contaminación difusa (ICNP)

La implementación del ICNP fue realizado mediante la suma ponderada de los indicadores, utilizando el programa QGIS. De este modo, se generó un mapa que representa la suma ponderada para cada píxel dentro de las microcuencas estudiadas. La ecuación empleada para el cálculo del ICNP es la siguiente:

$$ICNP = \sum_{i=1}^k w_i * x_i$$

Donde:

K = número total de indicadores.

w_i = coeficiente de ponderación asignada a cada indicador.

x_i = valor normalizado de cada indicador (LCI, RoI y DI) con rango de valores entre 0 y 1.

Para este estudio, se aplicó la siguiente ecuación, asignando los valores ponderados correspondientes a cada indicador y generando el mapa de las áreas de mayor susceptibilidad a la contaminación difusa en las microcuencas estudiadas:

$$ICNP = LCI*5 + RoI*3 + DI*2$$

3. Resultados

3.1- Análisis de tendencias temporales

3.1.2 Temperatura máxima

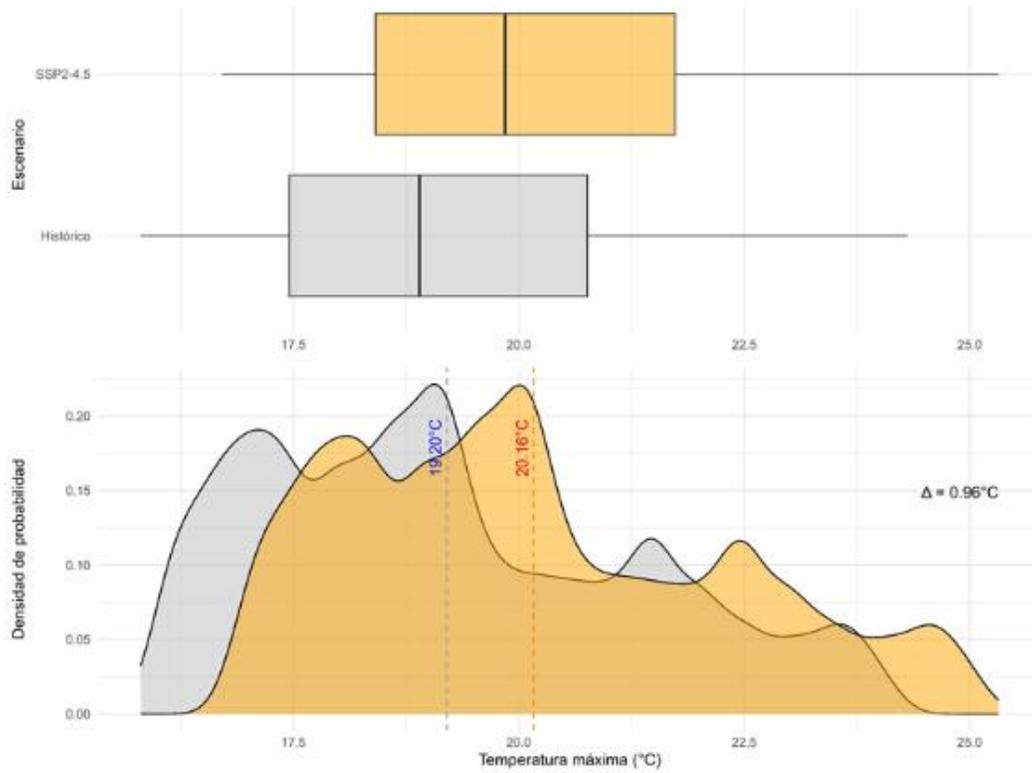
En el Cuadro 1, se visualizan los datos de temperatura máxima (°C) futura de los escenarios optimista (SSP2-4.5) y pesimista (SSP5-8.5). Para las variables de temperatura máxima en el escenario SSP2-4.5, se proyecta un aumento de la temperatura máxima de aproximadamente 1.01 °C, de la temperatura mínima en 0.90 °C y de la temperatura media en 0.96 °C. Sin embargo, en el escenario SSP5-8.5, la temperatura máxima proyectada aumenta en aproximadamente 1.11 °C, la temperatura mínima en 1.00 °C y la temperatura media en 1.07 °C, lo cual advierte un incremento aún mayor en las temperaturas.

Las figuras muestran la distribución de los datos comparando el histórico (azul) con los escenarios futuros (rojo), lo cual reduce los posibles cambios. Similar al escenario optimista, el escenario pesimista también proyecta un aumento significativo de las temperaturas.

Cuadro 2. Comparación del comportamiento histórico de la variable de temperatura máxima (°C) con respecto a los escenarios futuros

Histórico T _{máx} 1990-2019			SSP2-4.5, 2021-20240			SSP5-8.5, 2021-20240		
Mín.	Máx.	Media	Mín.	Máx.	Media	Mín.	Máx.	Media
15.80	24.31	19.20	16.70	25.32	20.16	16.80	25.42	20.26

a)



b)

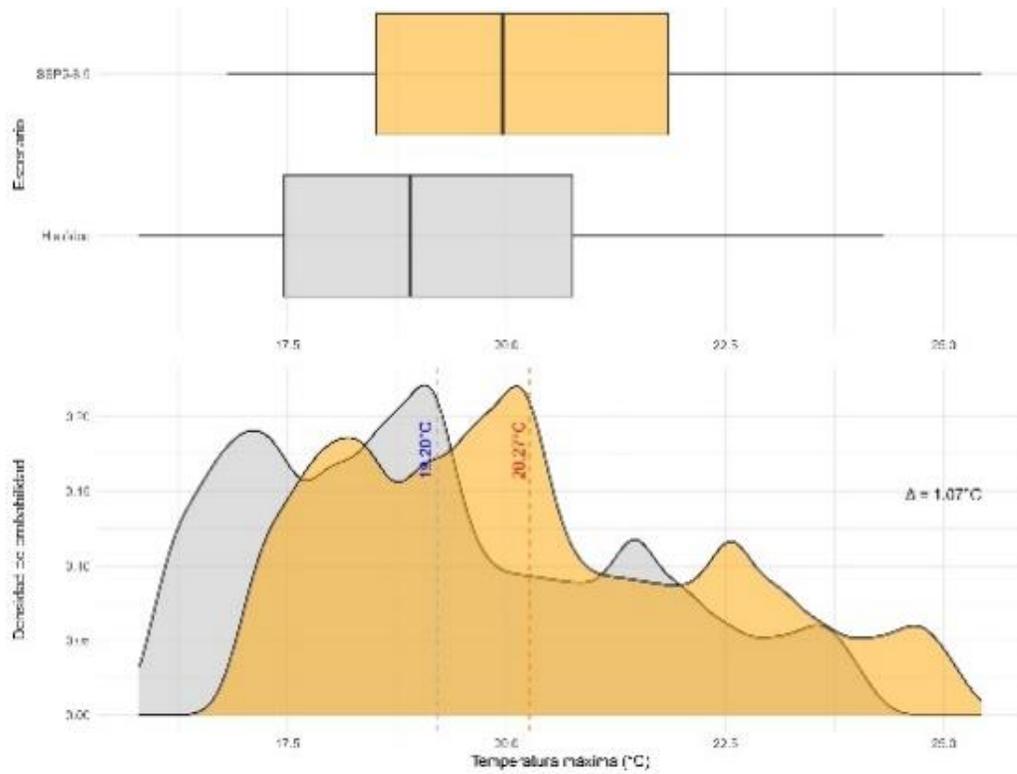


Figura 5. Comparación del comportamiento histórico de la temperatura máxima ($^\circ\text{C}$) frente a los escenarios futuros

La línea punteada azul representa la media de la serie histórica, mientras que la línea punteada roja muestra la media de las series proyectadas para los escenarios futuros.

3.1.3 Temperatura mínima

Se visualizan los datos de temperatura mínima (T_{mín}) a futuro de los escenarios optimista (SSP2-4.5) y pesimista (SSP5-8.5).

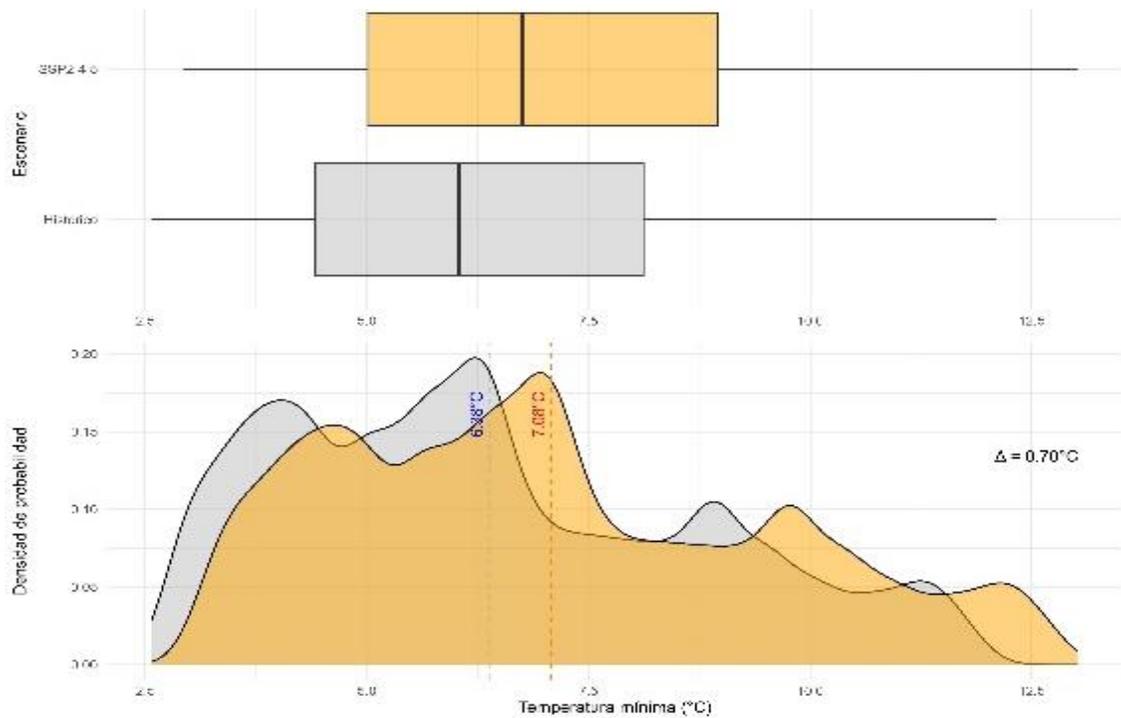
En la variable de temperatura mínima con el escenario SSP2-4.5, se proyecta un aumento de la temperatura mínima de aproximadamente 0.36 °C, de la máxima en 0.93 °C y de la media en 0.70 °C, lo que sugiere un ligero incremento de las temperaturas mínimas y una posible disminución de eventos extremos de frío. Lo anterior afecta potencialmente a los ecosistemas locales y la agricultura. En el escenario SSP5-8.5, la temperatura mínima proyectada aumenta en aproximadamente 0.39 °C, la temperatura máxima en 1.02 °C y la temperatura media en 0.75 °C. Aunque se observa una tendencia a temperaturas mínimas más altas, la mayor diferencia entre la temperatura mínima y máxima podría indicar una mayor amplitud térmica y la persistencia de posibles eventos de frío extremo.

Las figuras muestran la distribución de los datos comparando el histórico (azul) con los escenarios futuros (rojo), lo que permite deducir los posibles cambios.

Cuadro 3. Comparación del comportamiento histórico de la variable de temperatura mínima (°C) con respecto a los escenarios futuros

Histórico 1990-2019			SSP2-4.5, 2021-20240			SSP5-8.5, 2021-20240		
Mín.	Máx.	Media	Mín.	Máx.	Media	Mín.	Máx.	Media
2.57	12.09	6.37	2.93	13.02	7.07	2.96	13.11	7.12

a)



b)

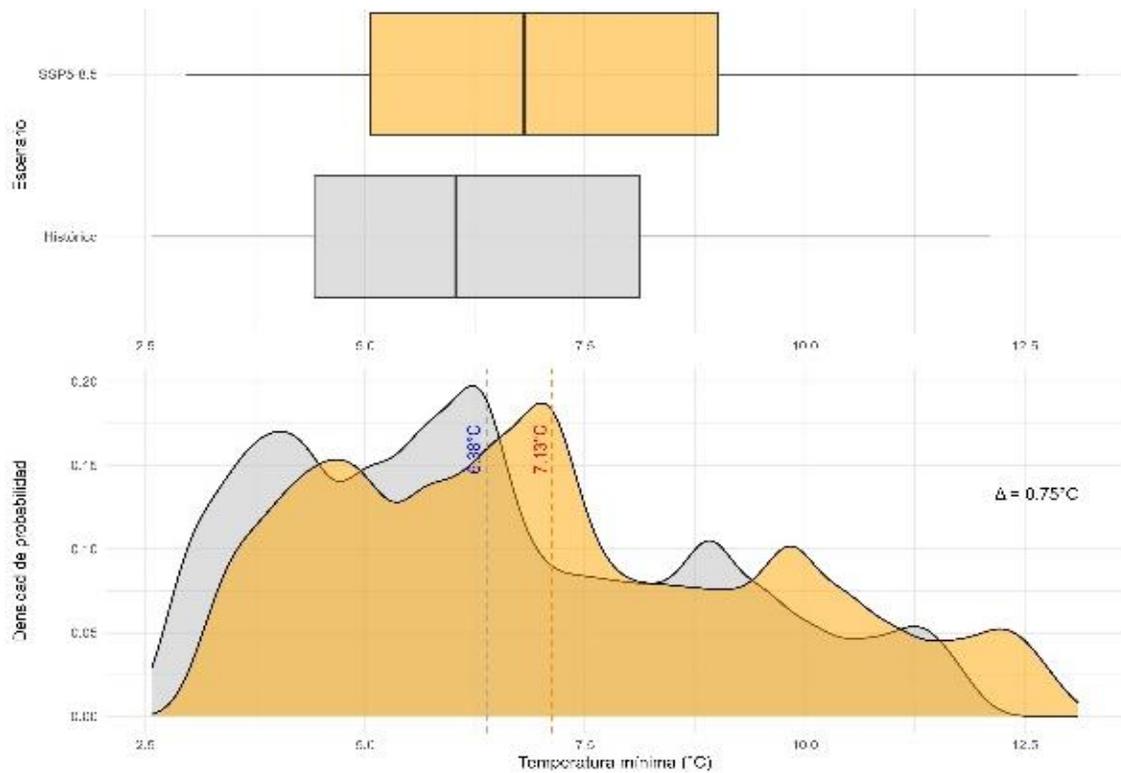


Figura 6. Comparación del comportamiento histórico de la variable de temperatura mínima (°C) con respecto a los escenarios futuros

La línea punteada azul representa la media de la serie histórica, mientras que la línea punteada roja muestra la media de las series proyectadas para los escenarios futuros.

3.1.4 Precipitación

Se observan los datos de precipitación a futuro de los escenarios optimista (SSP2-4.5) y pesimista (SSP5-8.5).

En el escenario SSP2-4.5, se proyecta que la precipitación máxima aumentará en aproximadamente 382.35 mm, mientras que la precipitación mínima disminuirá en 315.44 mm y la precipitación media se reducirá en 197.42 mm. Esto sugiere un incremento en los eventos de alta precipitación, lo que podría llevar a un aumento en la frecuencia y magnitud de inundaciones, especialmente en los meses más lluviosos. Sin embargo, la disminución en la precipitación mínima y media refleja una mayor variabilidad climática, lo cual implica que, además de los eventos extremos de lluvia, también habrá períodos más secos y prolongados.

Se prevé una disminución total de la precipitación anual en más de 100 mm, lo cual es una cantidad significativa, considerando que las áreas que dependen de la lluvia para la agricultura y la recarga de acuíferos podrían experimentar una reducción considerable en el suministro de agua. Este descenso tendrá un impacto considerable en la disponibilidad hídrica, especialmente en los meses secos, cuando la merma de lluvias afecte la capacidad de recuperación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

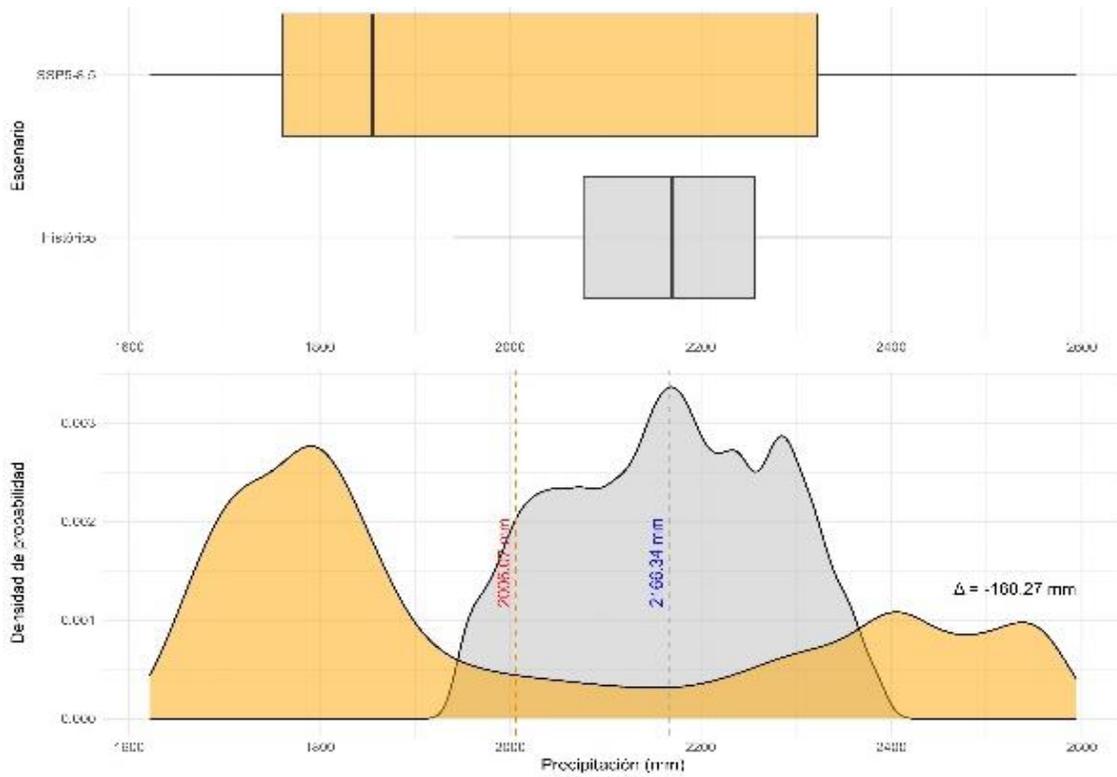
En el escenario SSP5-8.5, se proyecta un aumento en la precipitación máxima de aproximadamente 340.69 mm, una reducción en la precipitación mínima de 348.48 mm y un descenso en la precipitación media de 232.63 mm. Este escenario también muestra un aumento en los eventos extremos de precipitación máxima, aunque con una reducción más pronunciada en la precipitación mínima, lo cual indica una mayor amplitud en la variabilidad de las precipitaciones.

Las figuras muestran la distribución de los datos comparando el histórico (azul) con los escenarios futuros (rojo), lo cual permite deducir los posibles cambios:

Cuadro 4. Comparación del comportamiento histórico de la variable de precipitación (mm) con respecto a los escenarios futuros

Histórico 1990-2019			SSP2-4.5, 2021-20240			SSP5-8.5, 2021-20240		
Mín.	Máx.	Media	Mín.	Máx.	Media	Mín.	Máx.	Media
1941.92	2398.29	2166.34	1655.31	2635.75	2042.8	1621.64	2594.14	2006.07

a)



b)

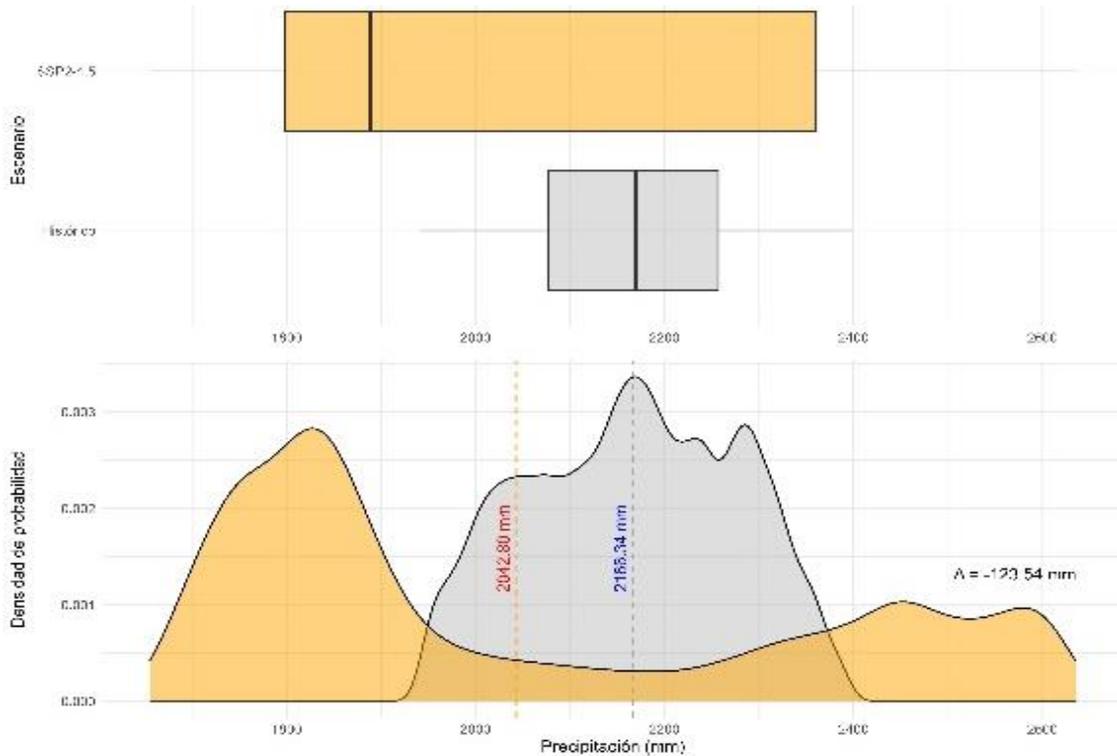


Figura 7. Comparación del comportamiento histórico de la variable de precipitación (mm) con respecto a los escenarios futuros

La línea punteada azul representa la media de la serie histórica, mientras que la línea punteada roja muestra la media de las series proyectadas para los escenarios futuros.

3.1.5 Balance climático

Al analizar los resultados del balance climático mensual histórico y proyectado para el área de estudio, se observó una tendencia decreciente bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, lo cual se debe a la disminución de las precipitaciones e incremento de las temperaturas máximas y mínimas, que impulsan una mayor evapotranspiración potencial y, por lo tanto, un mayor consumo de agua. Sin embargo, a pesar de estas disminuciones, se observa que el balance será positivo durante todos los meses, incluso en el escenario SSP5-8.5. En promedio, la disminución en el escenario más optimista será de -10.47 mm (165.35 mm) y de -13.55 mm (162.27 mm) en el escenario pesimista, con respecto al periodo de referencia (175.82 mm) (Figura 5).

Al analizar la variación mensual de los resultados, se observa que, durante el periodo comprendido por los meses de enero a mayo, los valores del balance climático proyectado en los dos escenarios son similares y ligeramente menores con respecto al periodo histórico. Sin embargo, en el mes de junio, el balance climático proyectado aumenta considerablemente y vuelve a disminuir en el siguiente mes. Este comportamiento irregular también se observa en el mes de setiembre, en el cual se determina un incremento y una reducción en el siguiente mes. Las mayores disminuciones se observan en el mes de julio y en el último trimestre del año, especialmente bajo el escenario SSP5-8.5.

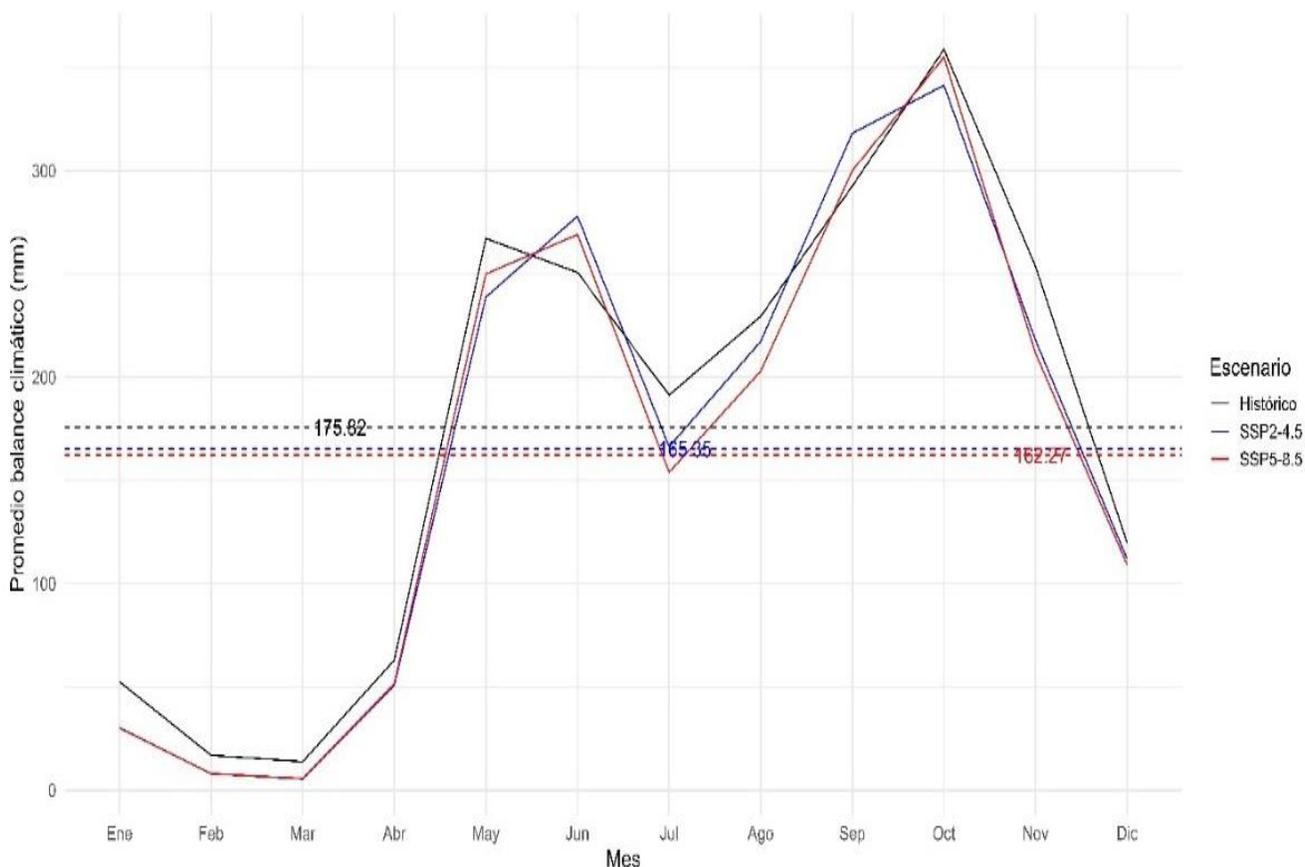


Figura 8. Balance climático mensual del área de estudio

3.1.6 Índice de precipitación estandarizado (SPI)

Con base en los resultados del SPI de 1 mes promedio, el rango de variación de los datos oscila entre 1 y -1, que indica condiciones relativamente normales. Sin embargo, al analizar los valores medianos, se observa que algunos meses experimentan condiciones de sequía, que son más frecuentes en los escenarios climáticos con respecto al periodo histórico. En el periodo histórico, estos eventos se presentan en los meses de enero, febrero, marzo y diciembre; en cambio, en ambos escenarios se observa que estos eventos se presentan en los meses de abril, mayo, julio, setiembre, noviembre y diciembre (Figura 6).

Al comparar los resultados, se observó que en el futuro algunos meses experimentarán condiciones más húmedas en comparación con el periodo histórico. Este comportamiento se presenta en los meses de enero, febrero, marzo, junio y agosto, los cuales resultaron con un incremento del SPI mediano. Precisa resaltar que se observó una mayor variabilidad de los datos en el SPI proyectado en ambos escenarios, especialmente en los meses de enero, agosto, octubre, noviembre y diciembre.

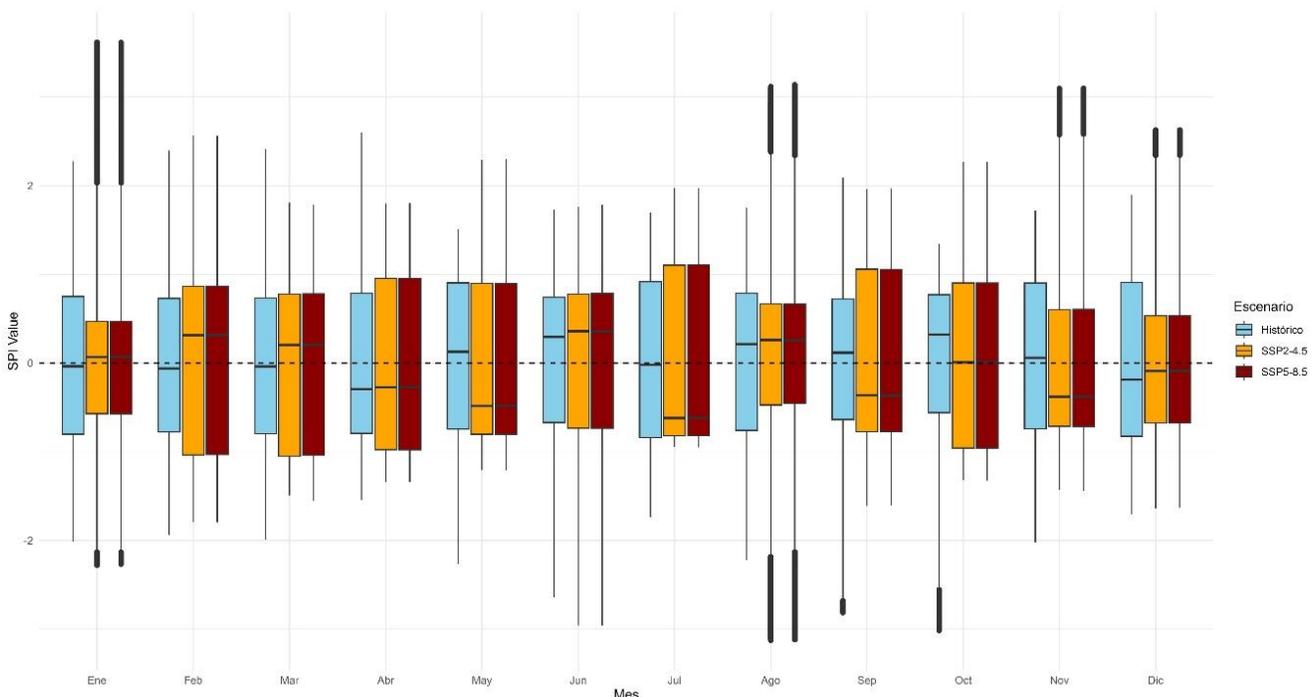


Figura 9. Boxplot de resultados mensuales del SPI en el área de estudio

3.1.7 Mapa de consumo doméstico y otros usos

El mapa de consumo de agua en las microcuencas se desarrolló utilizando un método de mapa de calor para visualizar los niveles de uso en diferentes áreas de la cuenca. Las microcuencas se delimitan con líneas rojas y los niveles de consumo se representan con una escala de colores que varía desde el azul claro (menor consumo) hasta el rojo (mayor consumo). Los puntos de interés incluyen la ubicación de la Asada Cipreses, nacientes de agua y fuentes clave, como las de Planton y Carlos Calvo, que se relacionan directamente con los patrones de consumo. Este método contribuyó a identificar claramente las zonas con mayor y menor uso del recurso hídrico, lo que se traduce en una herramienta visual efectiva para la gestión del agua.

Las áreas de mayor consumo se concentran en torno a la Asada y las fuentes principales, lo que sugiere que el acceso cercano a estas infraestructuras facilita el uso del agua. Estas zonas están marcadas en rojo y amarillo, con niveles de consumo que van desde 4873 hasta 8122 unidades. En contraste, las áreas de menor consumo, representadas en azul claro, se encuentran en las partes más alejadas de las fuentes y la infraestructura de distribución, con niveles que oscilan entre 0 y 3249 unidades. Esta distribución refleja un claro vínculo entre la proximidad a las fuentes de agua y la cantidad de consumo, lo cual puede ser explicado tanto por la accesibilidad como por la distribución de la población dentro de las microcuencas.

El mapa presenta el consumo de agua en las microcuencas de la Asada Cipreses, clasificado en cinco niveles: muy bajo: 0 - 1624, bajo: 1624 - 3249, medio: 3249 - 4873, Alto: 4873 - 6498 y muy alto: 6498 - 8122. Las áreas con mayor consumo se concentran en la parte central de las microcuencas, mientras que las zonas de menor consumo se encuentran más dispersas en la periferia.

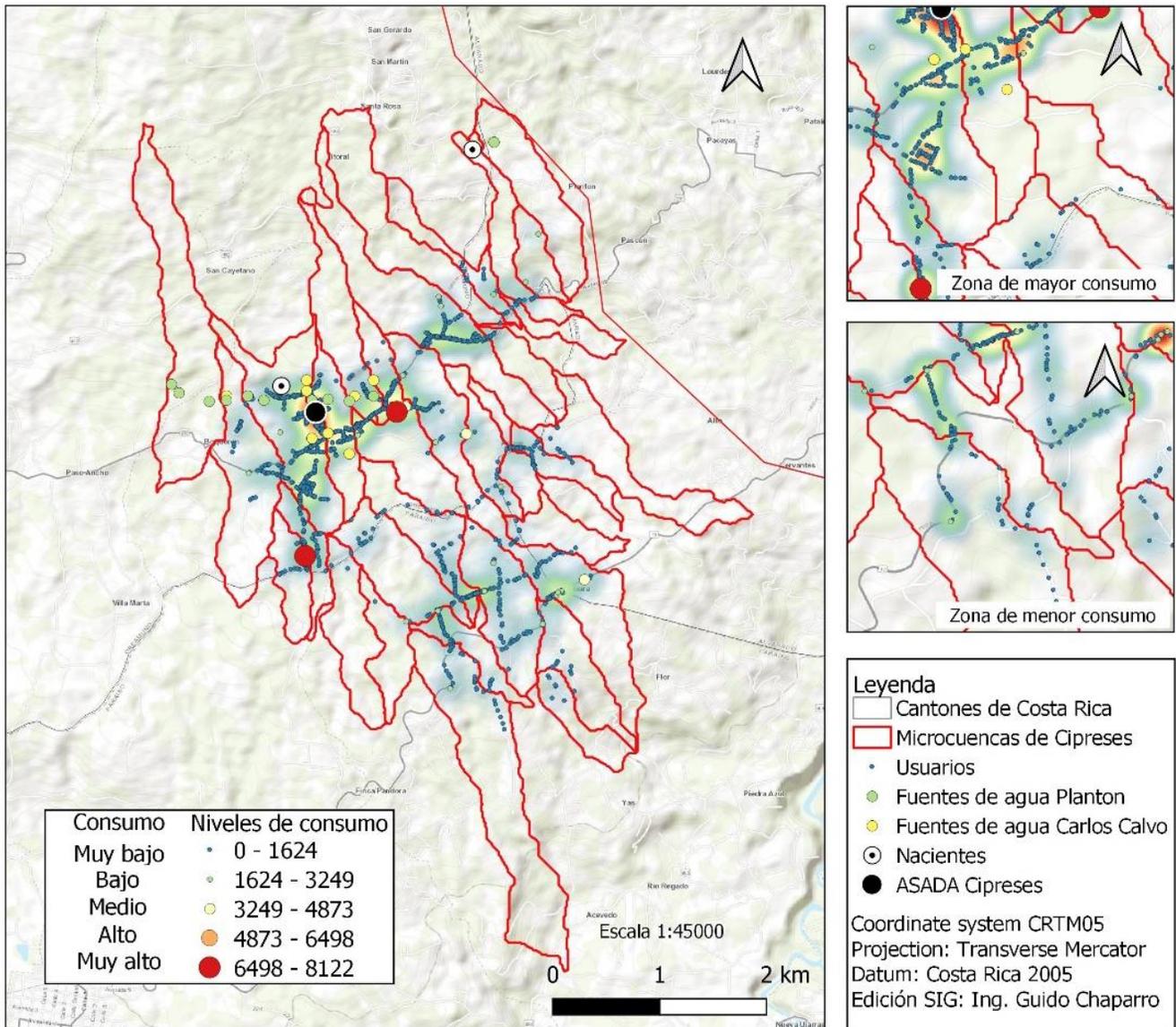


Figura 10. Mapa de consumo de las microcuencas de la Asada Cipreses

3.1.8 Zonificación del potencial de producción de deslizamientos

La vulnerabilidad a deslizamientos en la microcuenca se evaluó utilizando cuatro factores principales: densidad de la disección (D), profundidad de la disección (P), energía del relieve (E) y erosión total (ET). A partir de estos factores, se estiman las áreas más propensas a deslizamientos, lo cual resulta en un mapa que clasifica la susceptibilidad en varias categorías. Los deslizamientos pueden tener un impacto significativo en las fuentes de captación de agua, especialmente en épocas de precipitaciones intensas, cuando el terreno saturado es más propenso a desestabilizarse.

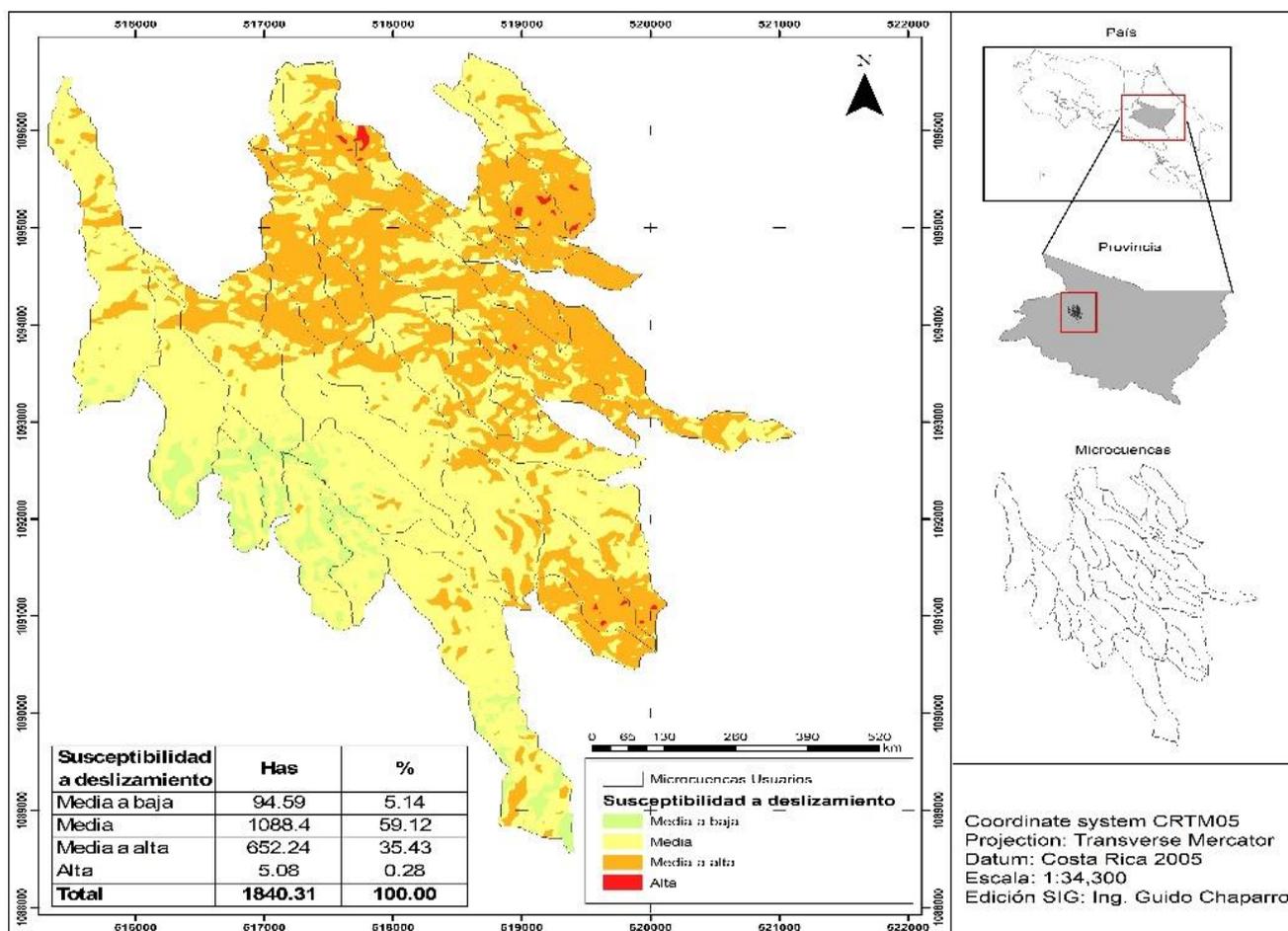


Figura 11. Mapa zonificación de amenazas: susceptibilidad a deslizamientos

El mapa de susceptibilidad clasifica el territorio de la microcuenca en cuatro categorías: media baja, media, media alta y alta. Cada una de estas categorías indica un nivel de riesgo de deslizamientos, con base en la combinación de los factores mencionados. A continuación, se describen las categorías y lo que representan:

Los resultados obtenidos muestran que la zonificación del área de estudio en función de la susceptibilidad a deslizamientos se distribuye en cuatro categorías principales: media baja, media, media alta, y alta. Las áreas de susceptibilidad media comprenden el 59.12 % del territorio, la cual constituye la categoría predominante, seguida de la categoría media alta (35.43 %). Las zonas de mayor riesgo (alta) cubren solo el 0.28 % del área, mientras que las de menor susceptibilidad representan el 5.14 %. Este análisis resalta la importancia de implementar medidas preventivas en áreas con alta probabilidad de deslizamientos y permite una mejor gestión del territorio en función del riesgo identificado.

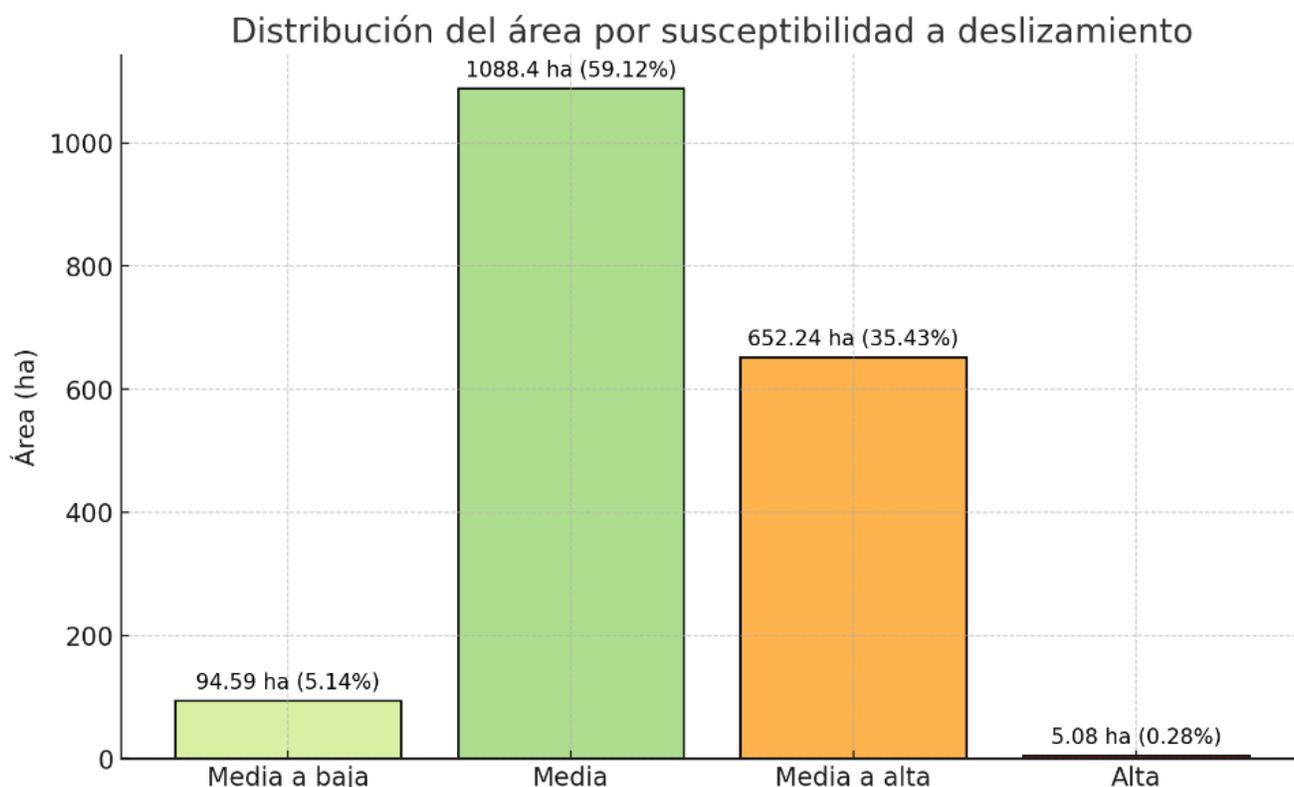


Figura 12. Susceptibilidad a deslizamientos

En total, el área evaluada cubre 1840.31 hectáreas. El 64.55 % del territorio (media alta y alta) se encuentra en zonas de riesgo significativo de deslizamientos, lo que subraya la necesidad de monitoreo constante, planificación territorial y posibles intervenciones para prevenir daños, especialmente en áreas cercanas a fuentes de captación de agua y en zonas de infraestructura crítica.

3.1.9 Zonificación de amenazas a la calidad de agua (sedimentos)

La vulnerabilidad a la sedimentación en la microcuenca se evaluó utilizando un enfoque basado en la erosión total (ET), lo cual permite identificar áreas susceptibles a la acumulación de sedimentos en los cuerpos de agua. Este tipo de sedimentación puede afectar negativamente la capacidad de los ecosistemas acuáticos, reducir la calidad del agua y aumentar los costos de tratamiento para las Asadas y otras entidades que dependen de estas fuentes.

El mapa (Figura 12) clasifica la sedimentación en cinco categorías, basadas en la cantidad de sedimentos (medida en toneladas por hectárea) que potencialmente pueden desplazarse desde las áreas afectadas por la erosión. En seguida, se detallan estas categorías y lo que representan:

El análisis de la calidad de agua, considerando el potencial de erosión y generación de sedimentos, revela que el 49.6 % del área total evaluada se clasifica en la categoría de alta amenaza (45.28 - 82.96 t/ha), lo cual indica una vulnerabilidad considerable a la erosión y el transporte de sedimentos. Las categorías medias alta (27.15 - 45.28 t/ha) y media (14.38 - 27.15 t/ha) ocupan el 24.4 % y el 10.7 % del territorio, respectivamente. Las áreas de menor riesgo (baja y media baja) cubren el 15.3 % restante. Este resultado

subraya la necesidad de estrategias de conservación del suelo y control de escorrentía en las áreas más vulnerables.

En total, el área evaluada cubre 1843.2 hectáreas. La mayor parte del territorio está clasificada en las categorías de media alta y alta, lo que indica un potencial considerable para la generación de sedimentos. Esto podría afectar la capacidad de las infraestructuras hídricas, especialmente durante eventos de precipitación intensa, que podrían movilizar grandes cantidades de sedimentos hacia las fuentes de captación de agua.

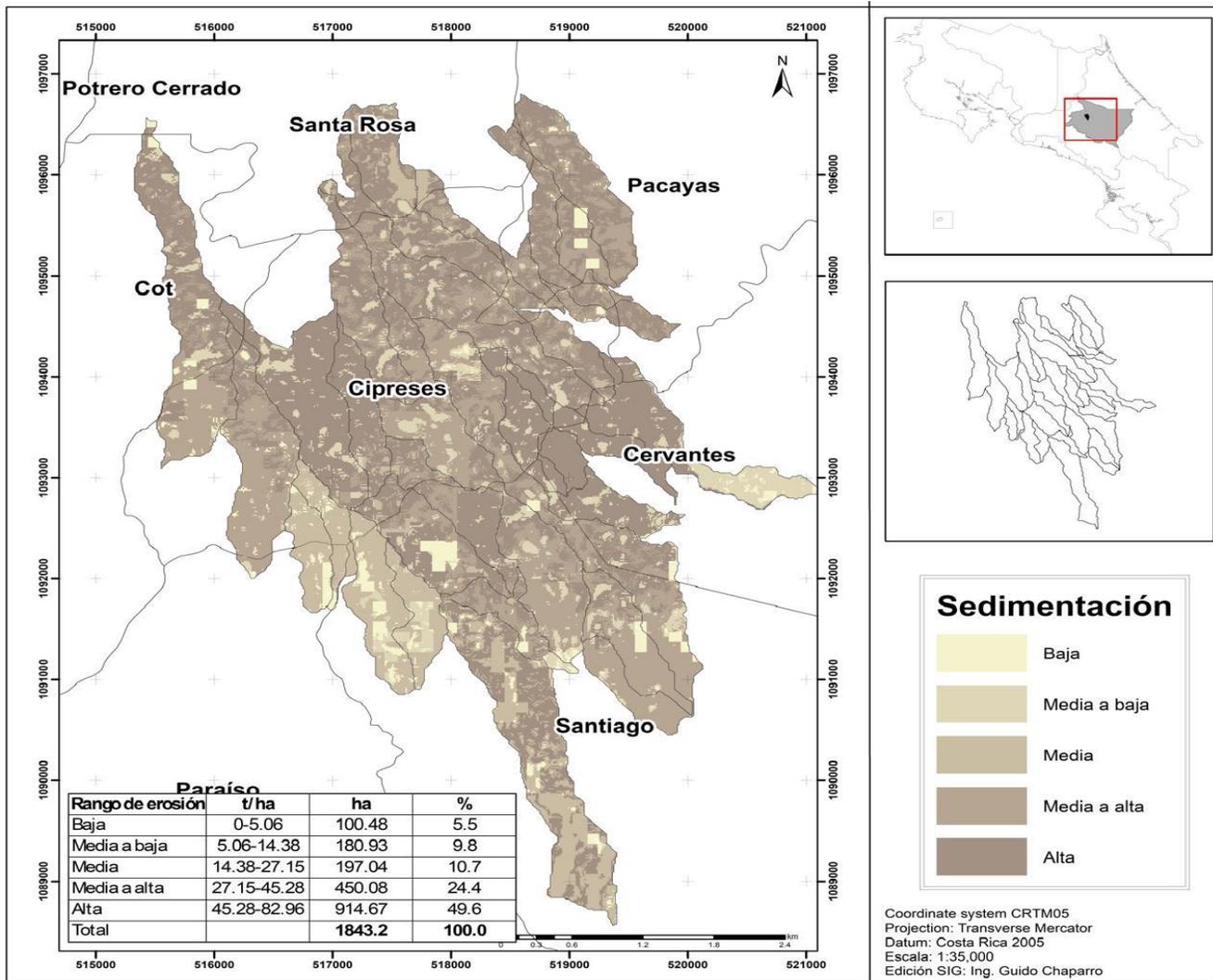


Figura 13. Mapa de zonificación de amenazas a la calidad de agua (sedimentos)

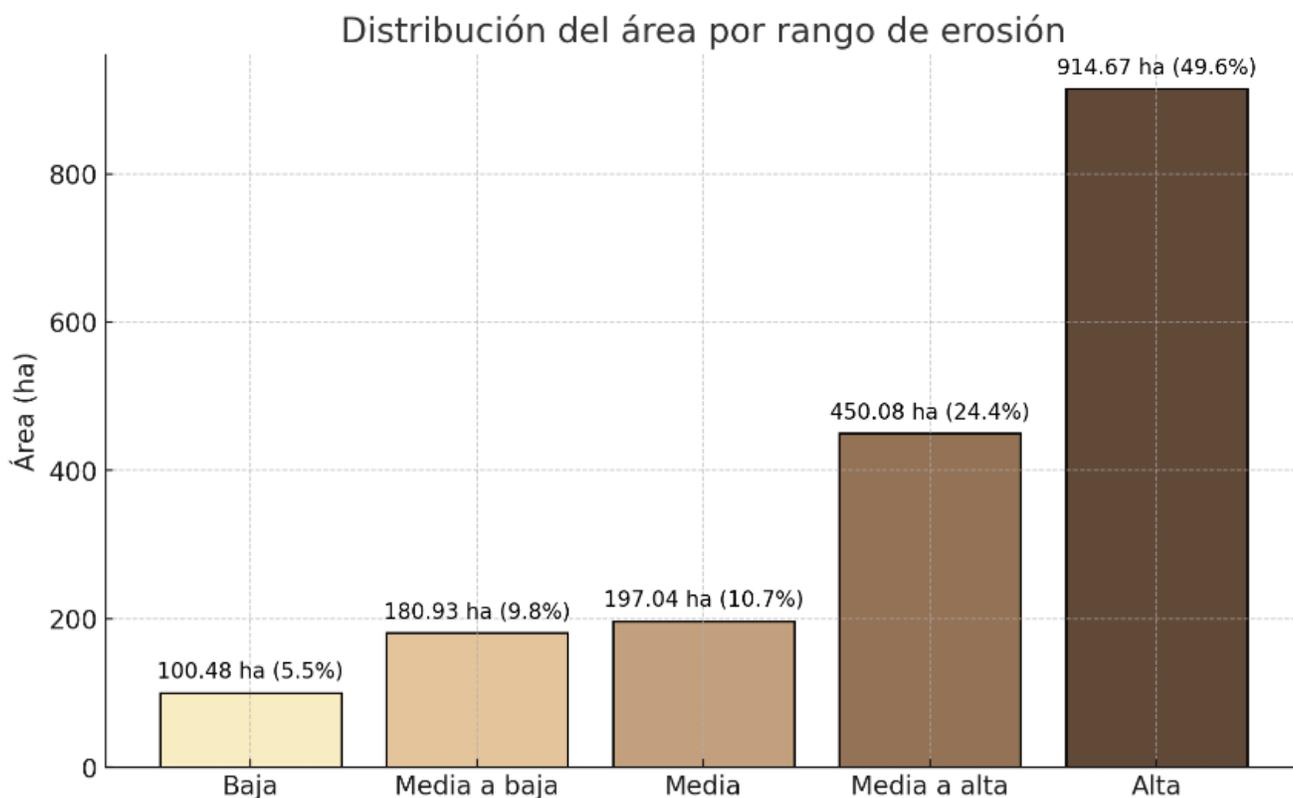


Figura 14. Clasificación de sedimentos

3.1.10 Zonificación de amenazas a la calidad de agua (contaminación)

La vulnerabilidad a la contaminación difusa en la microcuenca se evaluó utilizando el índice potencial de contaminación difusa (ICNP), el cual clasifica el territorio en cinco categorías: bajo, medio bajo, medio, medio alto y alto. Este índice permite identificar las áreas más susceptibles a contribuir con contaminación difusa hacia los cuerpos de agua superficiales, lo que es especialmente relevante en zonas con uso agrícola, urbano o forestal que generan escorrentías contaminantes. A continuación, se describe el resultado obtenido en la Figura 14.

Las zonas de menor vulnerabilidad a la contaminación difusa se encuentran en áreas con buena cobertura vegetal y prácticas de conservación del suelo, que cubre aproximadamente el 5 % del área total. Aunque presentan un riesgo bajo, es importante mantener estas prácticas para proteger las fuentes de agua. Las áreas de vulnerabilidad media baja, que abarcan un 20 % del territorio, ofrecen una protección moderada frente a la contaminación, aunque con lluvias intensas o manejo inadecuado podrían aportar contaminantes a los cuerpos de agua.

Las zonas de vulnerabilidad media representan el 40 % del área y están asociadas a un mayor riesgo de contaminación, especialmente en áreas agrícolas donde la escorrentía es más intensa. En las áreas de vulnerabilidad media alta, que abarcan un 30 % del territorio, la pendiente pronunciada y la baja cobertura vegetal facilitan el transporte de contaminantes hacia los cuerpos de agua. Las zonas de mayor riesgo de contaminación, que comprenden el 5 % del área, se caracterizan por terrenos con alta escorrentía y suelos erosionables, lo que demanda una gestión prioritaria para evitar impactos significativos en la calidad del agua.

El mapa indica que aproximadamente el 35 % del área total (categorías medio alto y alto) se encuentra en zonas con un riesgo significativo de contaminación difusa. Esto subraya la necesidad de implementar medidas de manejo del suelo y control de la escorrentía para proteger las fuentes de agua, especialmente en las zonas agrícolas y cercanas a cuerpos de agua, donde los efectos de la contaminación difusa son más evidentes. La correcta zonificación y gestión de estas áreas puede mitigar los riesgos de contaminación, protegiendo así tanto los ecosistemas acuáticos como las actividades humanas dependientes de estas fuentes.

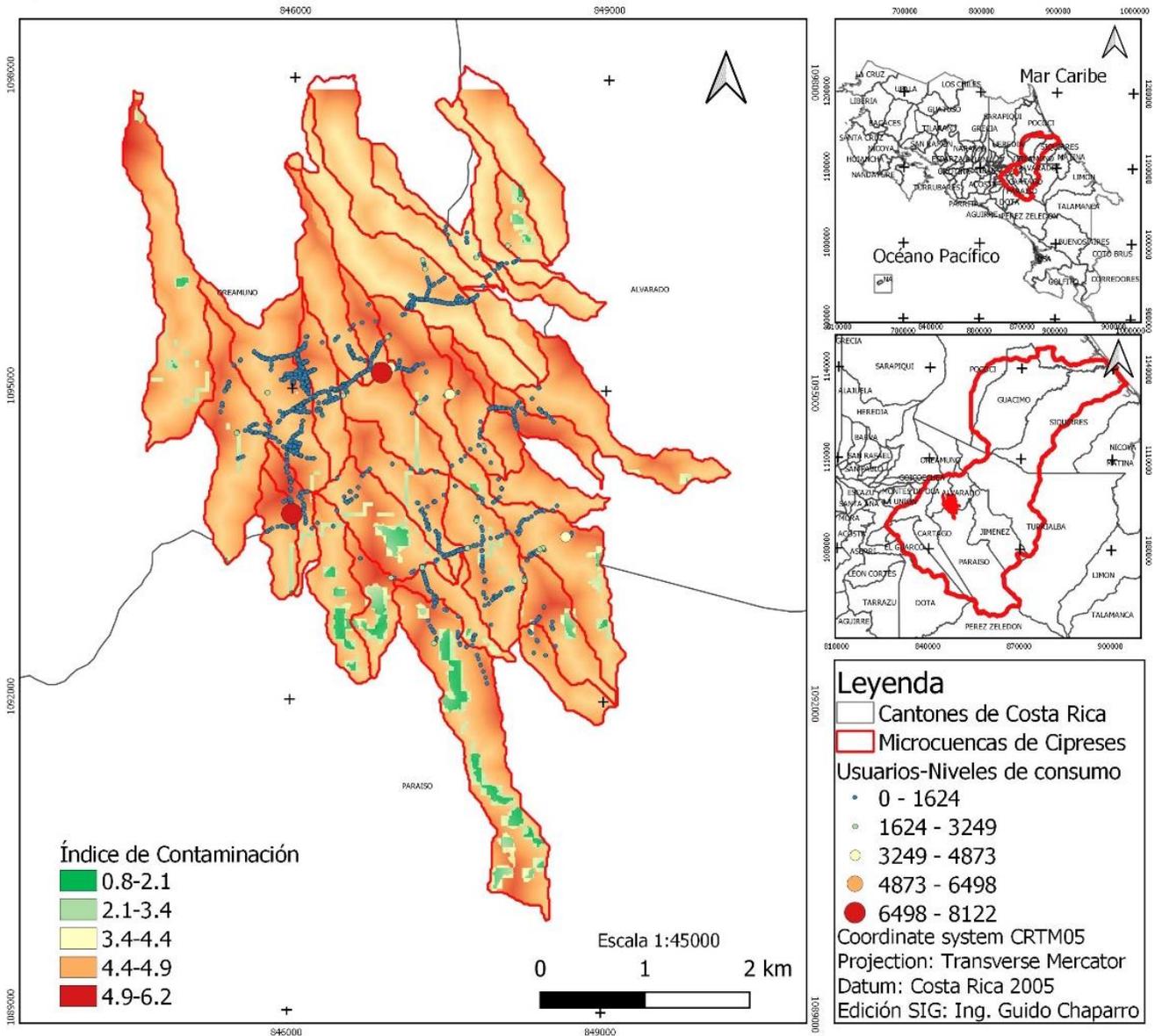


Figura 15. Mapa de zonificación de amenazas a la calidad de agua (contaminación difusa índice ICNP)

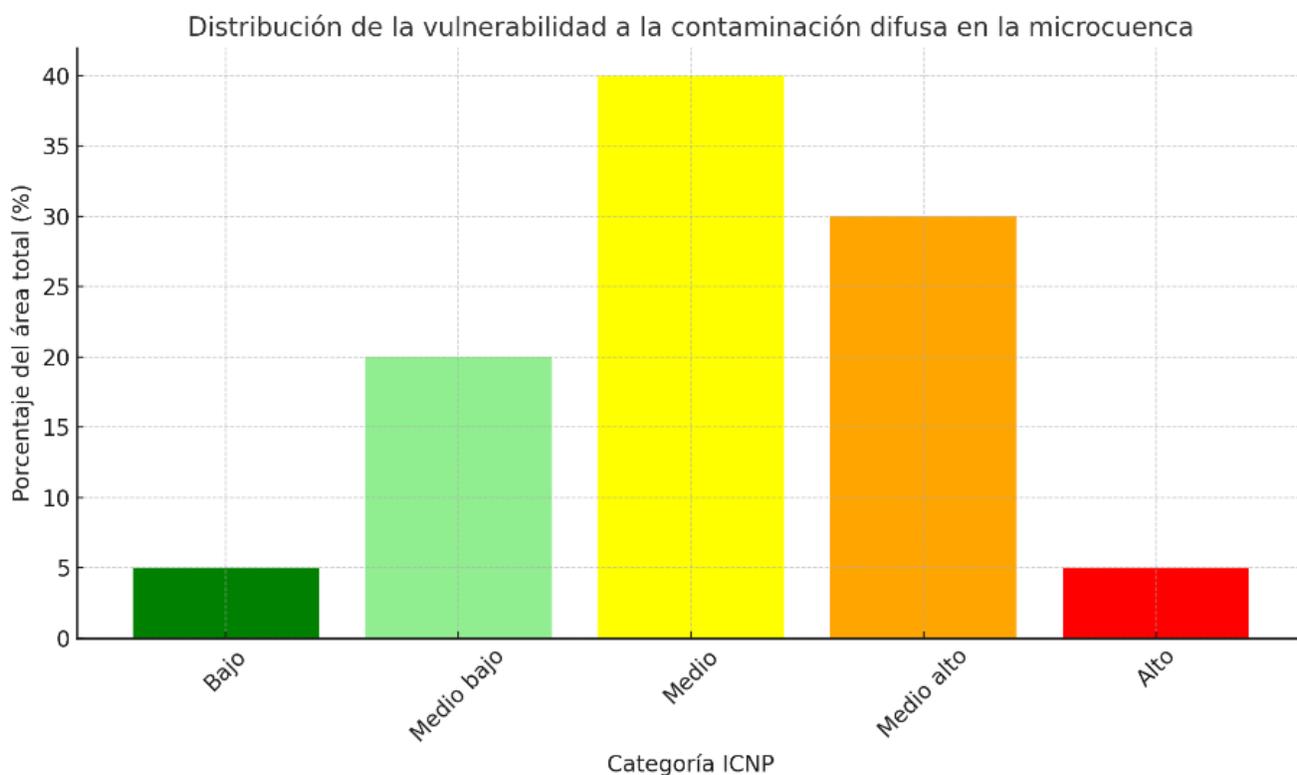


Figura 16. Distribución de la vulnerabilidad de la contaminación difusa (índice ICNP)

4. Discusión

Los cambios observados en la precipitación reflejan una mayor variabilidad climática, caracterizada por la ocurrencia más frecuente de eventos extremos, tanto de lluvias intensas como de sequías prolongadas. Este fenómeno está en consonancia con los hallazgos de Labędzki & Bąk (2015) y Olivares *et al.* (2016), quienes destacan que la sequía constituye una amenaza natural con el potencial de generar serias repercusiones en diversos sectores productivos y económicos de una región o país. Además, la sequía tiene la capacidad de alterar de manera significativa el desarrollo social, las actividades humanas y el entorno ambiental, lo cual afecta la seguridad hídrica, la producción agrícola y la estabilidad económica.

Los resultados advierten que el aumento proyectado en la temperatura y la reducción de la precipitación anual sugieren un escenario en el que las condiciones de sequía y los eventos de alta precipitación podrían coexistir, exacerbando la vulnerabilidad de los recursos hídricos y los sistemas productivos locales. Aunque la región no experimentará sequías severas según el SPI, la reducción de la lluvia durante ciertos meses clave podría impactar en la recarga de acuíferos y cuerpos de agua superficiales, lo cual incide en la disponibilidad de agua para el consumo humano y la agricultura. Además, el aumento en los eventos de lluvias intensas podría incrementar el riesgo de inundaciones repentinas, lo que agravaría los problemas de manejo de agua y suelo en la región. Algunas referencias a diversos modelos climáticos globales y regionales mencionan que, para el futuro, Centroamérica experimentará un clima más cálido y seco, con un aumento medio de la temperatura de al menos 2°C bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 (Hidalgo *et al.*, 2013; Hannah *et al.*, 2017), lo que coincide con los resultados.

En un estudio del índice de precipitación estandarizado (SPI) realizado por Birkel (2005) en tres países de Centroamérica -Nicaragua, El Salvador y Honduras-, se evaluó la variabilidad climática a lo largo de diferentes periodos utilizando datos de al menos 30 años provenientes de estaciones climáticas

seleccionadas. Los resultados del SPI mostraron fluctuaciones notables en la humedad, con valores que oscilaban entre +1 (indicando condiciones de humedad extrema) y -2.9 (indicando sequía moderada). Estos valores reflejan eventos climáticos extremos, como las sequías de 1976-1977 y 1986-1987, las cuales tuvieron un impacto significativo en la región.

De la misma manera, las inundaciones representan uno de los riesgos naturales más perjudiciales a nivel mundial. Las lluvias estacionales y eventos extraordinarios ocasionan de manera recurrente diversos tipos de inundaciones en Costa Rica (Quesada-Román, 2022). En medio de un escenario de cambio climático a nivel mundial y una urbanización acelerada, los eventos climáticos extremos son comunes y los desafíos asociados con inundaciones en zonas altamente urbanizadas se hacen cada vez más evidentes (Zuo *et al.*, 2023).

El balance climático mensual histórico y proyectado para las microcuencas muestra una tendencia decreciente bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, debido a la disminución de las precipitaciones y el incremento de las temperaturas, lo cual impulsa una mayor evapotranspiración y un mayor consumo de agua. A pesar de estas disminuciones, que, si bien se mantienen en positivo, es probable que en el futuro esta tendencia se siga manteniendo y siga disminuyendo aún más; por lo tanto, hay que tomar medidas. Si la cuenca es agrícola hay que valorar la implementación de medidas de conservación de agua incluso en el escenario SSP5-8.5.

Estos resultados concuerdan con otros estudios de la región, como el realizado en la microcuenca del río Porrosatí, ubicada en Heredia, Costa Rica. En este estudio, se analizaron registros meteorológicos de 15 años (2000-2014) y se incorporaron proyecciones de cambio climático bajo el escenario de emisiones A2 del IPCC. Los resultados indicaron que la recarga de agua subterránea podría experimentar reducciones significativas, superando el 15 % y llegando hasta un 50 % en comparación con los promedios históricos. Además, se observó un cambio en el comportamiento estacional de la recarga, con la aparición de dos picos durante el año, lo que sugiere una alteración en la disponibilidad y suministro de agua en la microcuenca (Montero-Sánchez *et al.*, 2018).

A pesar de la proyección de una disminución en la cantidad total de lluvia, el índice de precipitación estandarizado (SPI) sugiere que la región no experimentará episodios significativos de sequía, lo cual es consistente con el hecho de que se trata de una zona característicamente húmeda. Esto indica que, aunque la precipitación media disminuirá, los patrones de humedad del suelo y la vegetación podrían mantenerse lo suficientemente estables como para evitar condiciones de sequía severa.

Sin embargo, en otro estudio realizado en Costa Rica, se evaluaron las condiciones de sequía y humedad a lo largo del tiempo, utilizando el SPI. Los resultados del análisis mostraron variaciones en las condiciones de sequía y humedad a lo largo del período estudiado. Estas variaciones fueron evaluadas en relación con eventos climáticos como el ENOS (El Niño-Oscilación del Sur), lo que permitió identificar posibles relaciones entre los patrones de precipitación y la ocurrencia de eventos climáticos específicos. El estudio reveló que el SPI es una herramienta útil para comprender la variabilidad de la precipitación y sus impactos en Costa Rica, lo que puede contribuir a una mejor comprensión de los riesgos asociados con la sequía y la gestión de recursos hídricos en la región (Quesada, 2019).

El mapa de consumo de agua en las microcuencas de la Asada Cipreses muestra una distribución espacial que revela patrones interesantes en el uso del recurso hídrico. Las áreas con mayor consumo, localizadas principalmente en la parte central de las microcuencas, pueden estar vinculadas a zonas de mayor densidad poblacional o de mayor actividad agrícola e industrial. Este patrón sugiere una presión más

fuerte sobre las fuentes de agua en estas zonas, lo que podría representar un desafío para la sostenibilidad de los recursos hídricos, especialmente en épocas de sequía o bajo condiciones de estrés hídrico causado por el cambio climático.

En contraste, las zonas de menor consumo, más dispersas y ubicadas hacia la periferia, probablemente representan áreas rurales o con menor actividad económica. Este menor consumo podría estar asociado con la menor densidad poblacional o actividades productivas menos intensivas. No obstante, la dispersión de estas áreas sugiere que la infraestructura de distribución del agua podría ser menos eficiente en términos de cobertura, lo que podría generar una necesidad de optimizar las redes de distribución en esas áreas.

Identificar los puntos de captación de agua, nacientes y fuentes adicionales, como las de Plantón y Carlos Calvo, es clave para entender la dinámica de suministro de agua en la zona. Estos puntos son estratégicos para la gestión del recurso hídrico y su protección es crucial para asegurar la sostenibilidad del suministro en el futuro. Dado que las fuentes de mayor captación están concentradas en las áreas de mayor consumo, es imperativo asegurar que estas fuentes puedan sostener el nivel de demanda.

En las áreas urbanas de Costa Rica, aproximadamente el 95 % de la población tiene acceso a agua de calidad, debido a que los principales proveedores de agua del país disponen de la tecnología y los recursos humanos y financieros necesarios para una gestión eficiente del suministro. Por su parte, en las zonas rurales, la responsabilidad de esta gestión recae en las Asociaciones Administradoras de Agua (Asada), conformadas por juntas de vecinos voluntarios. Sin embargo, persisten áreas en estas zonas que aún no cuentan con acceso a agua potable (Soto-Córdoba *et al.*, 2016).

El análisis de la vulnerabilidad a deslizamientos en la región evaluada revela un patrón preocupante, ya que más del 90 % del área total está clasificada dentro de las categorías de susceptibilidad media y media alta. Esto indica una notable propensión a deslizamientos, especialmente en zonas que rodean las fuentes de captación de agua de la Asada. Este hallazgo es significativo dado que la estabilidad del terreno es crucial para la seguridad hídrica de la comunidad, particularmente en contextos de precipitaciones intensas, que son comunes en la zona. Aunado a esto, el riesgo de deslizamiento es mayor con las lluvias intensas.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto el nexo directo entre los factores geomorfológicos evaluados densidad y profundidad de la disección, energía del relieve y erosión total y la susceptibilidad a deslizamientos. La influencia combinada de estos factores refuerza la necesidad de una gestión integral del territorio, que no solo considere las características geográficas inherentes, sino también los patrones climáticos que, en conjunto, incrementan el riesgo.

Las zonas con mayor riesgo, representadas en rojo en el mapa, exigen atención prioritaria para la implementación de estrategias de mitigación de deslizamientos. Esta identificación es particularmente relevante dado que, en eventos de lluvias extremas, dichas áreas podrían ser el punto de partida de desastres naturales que afecten no solo la integridad física del ecosistema, sino también la infraestructura hídrica crítica para el abastecimiento de agua potable.

Este análisis no solo aporta una visión detallada de los riesgos actuales, sino que también constituye una herramienta fundamental para la planificación estratégica a largo plazo. En el contexto del cambio climático, con sus efectos sobre los patrones de precipitación, se requiere un enfoque preventivo que permita a las autoridades locales y a la Asada implementar medidas como reforestación, estabilización

de suelos y diseño de infraestructuras resilientes. Integrar estos resultados en los planes de ordenamiento territorial es clave para mitigar el impacto de futuros deslizamientos, salvaguardando los recursos naturales y la seguridad comunitaria.

El análisis de la vulnerabilidad a la sedimentación en la microcuenca muestra un panorama igualmente preocupante, ya que más del 70 % del área total está clasificada dentro de las categorías de media alta y alta susceptibilidad a la erosión y generación de sedimentos. Esto implica una considerable propensión a acumular sedimentos en los cuerpos de agua, lo que podría afectar negativamente tanto los ecosistemas acuáticos como la infraestructura hídrica de las Asadas que dependen de estas fuentes.

La sedimentación es un factor crítico que puede reducir la calidad del agua y aumentar los costos de tratamiento, debido al aumento en la turbidez y a la posible colmatación de embalses y ríos. Este hallazgo es particularmente significativo en el contexto de precipitaciones intensas, comunes en la zona, ya que el transporte de grandes cantidades de sedimentos hacia las fuentes de captación puede comprometer la capacidad de almacenamiento y el flujo de agua, agravando los desafíos de suministro de agua potable.

Los resultados revelan una relación directa entre la erosión total y la susceptibilidad a la sedimentación, donde las zonas de alta vulnerabilidad, que abarcan casi la mitad del área (49.6 %), presentan un riesgo crítico. Estas áreas requieren atención prioritaria, especialmente porque, durante episodios de lluvias extremas, la movilización de sedimentos podría ser severa, afectando no solo la integridad de los cuerpos de agua, sino también las infraestructuras clave para el suministro de agua potable.

El mapa que clasifica las áreas con mayor riesgo permite una identificación precisa de las zonas que deben ser priorizadas para implementar medidas de mitigación, como reforestación, control de escorrentías y prácticas de manejo del suelo que reduzcan la erosión. Estas estrategias son esenciales para evitar el deterioro acelerado de los recursos hídricos y la infraestructura que depende de ellos.

El análisis de la vulnerabilidad a la contaminación difusa en la microcuenca presenta un panorama preocupante, ya que aproximadamente el 35 % del área total se clasifica en las categorías de medio alto y alto riesgo. Estas áreas, con una alta susceptibilidad a la contaminación difusa, incluyen zonas caracterizadas por pendientes pronunciadas, baja cobertura vegetal y proximidad a cuerpos de agua, lo que las convierte en fuentes potenciales de escorrentía contaminante hacia los sistemas acuáticos. El hallazgo resalta la importancia de la zonificación y gestión adecuada del uso del suelo para mitigar los riesgos de contaminación y proteger las fuentes hídricas.

El resultado de este análisis es especialmente relevante en zonas con uso agrícola intensivo y áreas urbanas en expansión, donde la escorrentía arrastra contaminantes como fertilizantes, pesticidas y residuos urbanos hacia los cuerpos de agua superficiales. Aunque el sector agrícola se esfuerza por utilizar estos productos de manera segura, existe una percepción de bajo riesgo. No obstante, en las distintas etapas del manejo de plaguicidas (almacenamiento, mezcla, preparación y aplicación), se produce una deriva de estas sustancias en el entorno.

En otro estudio similar en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, ubicadas en Cartago, Costa Rica., la investigación se centró en identificar y clasificar las fuentes de contaminación potencial que podrían afectar la calidad del agua subterránea en esta región. Se identificaron 186 fuentes potenciales de contaminación del subsuelo, de las cuales la mitad presentó un riesgo elevado, el 46 % un riesgo moderado y solo un 4 % un riesgo bajo. Las principales fuentes de alto riesgo incluyeron bodegas de agroquímicos, donde no se evalúa correctamente la degradación de los plaguicidas, lo que genera

contaminación en diferentes etapas de su manejo. También se destacaron los puntos de descarga de aguas residuales domésticas y los talleres mecánicos. Además, se identificaron vertederos ilegales y puntos de venta de agroquímicos como focos de posibles derrames accidentales. Las fuentes moderadas incluyeron principalmente lecherías y granjas avícolas (Fonseca-Sánchez *et al.*).

En el contexto del cambio climático, que puede intensificar los eventos de precipitación extrema, este análisis proporciona una herramienta clave para la planificación estratégica a largo plazo. Las autoridades locales y las Asadas deben integrar estos hallazgos en sus planes de ordenamiento territorial y en las políticas de manejo de cuencas, adoptando un enfoque preventivo para mitigar el impacto de la sedimentación, proteger los recursos hídricos y garantizar la seguridad del suministro de agua para la comunidad.

5- Conclusiones

El análisis de los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para las microcuencas estudiadas muestra un aumento general de las temperaturas y una mayor variabilidad en las precipitaciones futuras. Las temperaturas medias, máximas y mínimas se incrementan más significativamente en el escenario SSP5-8.5, con un aumento proyectado de 1.11 °C en la temperatura máxima y 1.00 °C en la mínima, mientras que en el escenario SSP2-4.5, la temperatura máxima aumenta en 1.01 °C y la mínima en 0.90 °C, lo cual indica un calentamiento más pronunciado en el escenario de altas emisiones. Las precipitaciones muestran un incremento en los valores máximos de 382.35 mm para el SSP2-4.5 y 340.69 mm para el SSP5-8.5, aunque los valores mínimos disminuyen en 315.44 mm y 348.48 mm, respectivamente, lo cual sugiere una mayor frecuencia de eventos extremos como inundaciones y sequías.

El balance climático mensual proyectado indica una tendencia decreciente, con mayores reducciones en las precipitaciones y aumentos en las temperaturas, lo cual incrementa la evapotranspiración y el consumo de agua. En promedio, el balance climático mensual se reduce en 10.47 mm bajo el escenario SSP2-4.5 y en 13.55 mm bajo el SSP5-8.5 en comparación con el periodo histórico, aunque el balance hídrico sigue siendo positivo durante todo el año, con valores menores que en el periodo histórico.

El índice de precipitación estandarizado (SPI) proyecta una mayor variabilidad en las condiciones de precipitación, aumentando la incertidumbre climática futura y resaltando la necesidad de estrategias de adaptación robustas para mitigar los impactos del cambio climático y asegurar la sostenibilidad de las microcuencas.

El uso de un mapa de calor para analizar el consumo de agua en las microcuencas brinda información clave sobre las áreas donde el acceso a los recursos hídricos está más concentrado. Las zonas de mayor consumo, que coinciden con las áreas cercanas a las fuentes y la infraestructura de la Asada, están expuestas a las futuras variaciones climáticas que incrementan la demanda de agua. Este método permite identificar no solo patrones de consumo, sino también áreas donde se deben priorizar las estrategias de adaptación.

En cuanto a la zonificación de deslizamientos, los resultados sugieren que las áreas con mayores pendientes y cercanas a los cuerpos de agua están en mayor riesgo, especialmente bajo los escenarios de lluvias extremas previstas por los modelos climáticos. Aproximadamente, el 64.55 % del área evaluada se encuentra en categorías de riesgo medio alto y alto. Se subraya la necesidad de medidas de planificación en las zonas críticas para prevenir riesgos a la población y la infraestructura. De manera similar, la zonificación de sedimentación indica que más del 70 % del área presenta alta susceptibilidad,

con valores de erosión entre 45.28 y 82.96 t/ha, lo cual incrementa los niveles de sedimentos en los cuerpos de agua y afecta su calidad y capacidad de almacenamiento.

Finalmente, el mapa de contaminación difusa en las microcuencas revela que las áreas más vulnerables a este tipo de contaminación están relacionadas con zonas de uso agrícola intensivo y menor cobertura forestal. El aumento de eventos de lluvias intensas y prolongadas podría agravar estos problemas, facilitando la movilización de contaminantes hacia los cuerpos de agua. La planificación debe centrarse en medidas para mitigar esta contaminación, como implementar buenas prácticas agrícolas y proteger las zonas de recarga hídrica.

La Asada Cipreses juega un papel fundamental en la protección y gestión de las nacientes /o puntos de captación de agua para consumo. La adecuada conservación de estas fuentes con enfoque de cuencas hidrográficas es esencial para garantizar la calidad y disponibilidad del recurso hídrico a largo plazo, no solo para la comunidad, sino también para los ecosistemas que dependen de este. Mediante prácticas sostenibles, como la protección de las zonas de recarga hídrica, el control de la contaminación difusa y la implementación de planes de manejo del suelo, la Asada puede mitigar los riesgos asociados a la escorrentía, sedimentación y contaminación. El trabajo en conjunto con los actores locales y la promoción de la educación ambiental en la comunidad son claves para asegurar que estas fuentes de agua sigan siendo una base sólida para el bienestar humano y ambiental.

6- Bibliografía

- Arciniega-Esparza, S., & Birkel, C. (2020). *Hydrological simulations for Costa Rica from 1985 to 2019 using HYPE CR 1.0* (Versión 1.0) [Dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4029572>
- Almarza, C. (2005). *Adaptación Del S.P.I. Para El Análisis De La Variabilidad Intra-Anual De Periodos Secos*. https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/9260/1/0002_PU-SA-I-99-C_ALMARZA.pdf
- Alvarez Jiménez, M., Ramírez-Granados, P., & Castro-Solís, J. (2021). Aspectos biofísicos y socioeconómicos de la subcuenca del río Páez, Cartago, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central* 2(67), 195–298. <https://doi.org/10.15359/rgac.67-2.7>
- Arce, R. (2013). Ordenamiento Territorial y Cambio Climático. *Manuales Cooperación Alemana, capacitaci*, 184. http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/Manual_8-OTyCC.pdf
- Borselli, L., Cassi, P., & Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *CATENA*, 75(3), 268-277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
- Beguéría, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2016). Standardized Precipitation Index revisited: parameter estimation, confidence intervals, and drought classification. *Journal of Hydrology*, 535, 284-302.
- Barrera-Hernández, L., Murillo-Parra, L. D., Ocaña-Zúñiga, J., Cabrera-Méndez, M., & Echeverría-Castro, Sonia Sotelo-Castillo, M. A. (2020). Causas, consecuencias y qué hacer frente al cambio climático. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, 25(87), 1103–1122. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7604726>
- Bastidas Pacheco, G. A., & Hernández, R. (2019). Cambio climático algunos aspectos a considerar para la supervivencia del ser vivo: revisión sistemática de la literatura TT - Some climate-change aspects to be considered for the survival of living organisms: a systematic literature review TT - Mudança cl. *Rev. Cuid.* (Bucaramanga. 2010), 10(3), e664–e664.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15649/cuidarte.v10i3.664>

- Campos Durán, D., & Quesada Román, A. (2017). Impacto De Los Eventos Hidrometeorológicos En Costa Rica, Periodo 2000-2015 / Impact of the Hydrometeorological Events in Costa Rica, Period 2000-2015. *Geo UERJ*, 0(30), 440–465. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2017.26116>
- Chaves Quirós, A. (2020). El río Reventazón: producción de energía y gestión ambiental. *Revista de Ciencias Ambientales*, 54(1), 200–214. <https://doi.org/10.15359/rca.54-1.12>
- Chiabai, A., Quiroga, S., Martínez-Juárez, P., Higgins, S., & Taylor, T. (2018). The nexus between climate change, ecosystem services and human health: Towards a conceptual framework. *Science of the Total Environment*, 635, 1191–1204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.323>
- Enayati, M., Bozorg-Haddad, O., Bazrafshan, J., Hejabi, S., & Chu, X. (2020). Bias correction capabilities of quantile mapping methods for rainfall and temperature variables. *Journal of Water and Climate Change*, 12(2), 401-419. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.261>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Fonseca-Sánchez, Alicia, Helga Madrigal-Solís, Christian Núñez-Solís, Hazel Calderón-Sánchez, Geannina Moraga-López, y Alicia Gómez-Cruz. «Evaluación de la amenaza de contaminación al agua subterránea y áreas de protección a manantiales en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica». *Uniciencia* 33 (2): 76-97. <https://doi.org/10.15359/ru.33-2.6>
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences* 16(9): 3383-3390. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012>
- Gosweiller, C., Barral, M. P., & Bocci, M. (2021). Evaluating sediment retention ecosystem service using InVEST and RUSLE models in a Mediterranean basin. *Ecosystem Services*, 48, 101228. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101228>
- Leon, L. F., Soulis, E. D., Kouwen, N., & Farquhar, G. J. (2015). Predicting sediment yield from agricultural watersheds using SWAT. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70(2): 111-123. <https://doi.org/10.2489/jswc.70.2.111>
- León Baque, E. E., Vásquez Granda, V. D., & Valderrama Chávez, M. D. (2021). Cambios en patrones de precipitación y temperatura en el Ecuador: regiones sierra y oriente. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 1–22. <https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i.2608>
- Liu, D., You, J., Xie, Q., Huang, Y., & Tong, H. (2018). Spatial and Temporal Characteristics of Drought and Flood in Quanzhou Based on Standardized Precipitation Index (SPI) in Recent 55 Years. *Journal of Geoscience and Environment Protection* 06(08): 25–37. <https://doi.org/10.4236/gep.2018.68003>
- Hamel, P., Guswa, A. J., & Padowski, J. (2015). Managing water quality for ecosystem services in conservation planning. *Ecosystem Services* 15: 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.07.003>
- Hargreaves, G. H., & Allen, R. G. (2003). History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129(1): 53-63. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53))
- Piani, C., J. O. Haerter, y E. Coppola. «Statistical Bias Correction for Daily Precipitation in Regional Climate Models over Europe». *Theoretical and Applied Climatology* 99 (1): 187-92. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0134-9>

- Birkel, C. (2005). Sequía en centroamérica: Implementación metodológica espacial para la cuantificación de sequías en el golfo de Fonseca. *Reflexiones* 84(1): 57–70.
- Hannah, L., Donatti, C. I., Harvey, C. A., Alfaro, E., Rodriguez, D. A., Bouroncle, C., Castellanos, E., Diaz, F., Fung, E., Hidalgo, H. G., Imbach, P., Läderach, P., Landrum, J. P., & Solano, A. L. (2017). Regional modeling of climate change impacts on smallholder agriculture and ecosystems in Central America. *Climatic Change* 141(1): 29-45. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1867-y>
- Hidalgo, H. G., Amador, J. A., Alfaro, E. J., & Quesada, B. (2013). Hydrological climate change projections for Central America. *Journal of Hydrology* 495: 94-112. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.004>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eighth Conference on Applied Climatology*, https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf
- Mlenga, D. H., Jordaan, A. J., & Mandebvu, B. (2019). Integrating Standard Precipitation Index and Normalised Difference Vegetation Index for near-real-time drought monitoring in Eswatini. *Jàmbá: Journal of Disaster Risk Studies* 11(1): 1-9. <https://doi.org/10.4102/jamba.v11i1.917>
- Montero-Sánchez, E., Herrera-Murillo, J., & Ramírez-Granados, P. (2018). Sensibilidad y escenarios de disponibilidad de agua para consumo humano en la microcuenca del río Porrosatí, Heredia, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central* 1(62): 52. <https://doi.org/10.15359/rgac.62-1.3>
- Munafò, M., Cecchi, G., Baiocco, F., & Mancini, L. (2005). River pollution from non-point sources: A new simplified method of assessment. *Journal of Environmental Management* 77(2): 93-98. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.02.016>
- Montero-Sánchez, E., Herrera-Murillo, J., & Ramírez-Granados, P. (2018). Sensibilidad y escenarios de disponibilidad de agua para consumo humano en la microcuenca del río Porrosatí, Heredia, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central* 1(62): 52. <https://doi.org/10.15359/rgac.62-1.3>
- Jarma Orozco, A., Cardona Ayala, C., & Araméndiz Tatis, H. (2012). Efecto del cambio climático sobre la fisiología de las plantas cultivadas: una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 15(1): 63–76. <https://doi.org/10.31910/rudca.v15.n1.2012.803>
- López-Lambrañ, A., Carrillo-Yee, E., Fuentes, C., López-Ramos, A., & López-Lambraño, M. (2017). Una revisión de los métodos para estimar el exponente de Hurst y la dimensión fractal en series de precipitación y temperatura. *Revista Mexicana de Física* 63(3): 244–267.
- Ortega-Gaucin, D., & Velasco, I. (2013). Aspectos Socioeconómicos y ambientales de las Sequías en México. *Aqua-LAC* 5(2): 78-90. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2013-v5-2-08>
- Pierce D, Cayan D, Maurer E, *et al.* (2015) Improved bias correction techniques for hydrological simulations of climate change. *Journal of Hydrometeorology* 16: 2421–2442. DOI: 10.1175/JHM-D-14-0236.1
- Quesada, M. (2019). Precipitación acumulada en las tierras altas entre las secciones Tilarán y Central, Costa Rica. *Physis Terrae - Revista Ibero-Afro-Americana de Geografía Física e Ambiente* 1(1): 107–119. <https://doi.org/10.21814/physisterrae.407>
- Soto-Córdoba, S. M., Gaviria-Montoya, L., & Pino-Gómez, M. (2016). Situación de la gestión del agua potable en las zonas rurales de la provincia de Cartago, Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha* 29(8): 67. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i8.2986>
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación (Sinac). (2022). *Informe sobre la gestión de áreas silvestres protegidas y biodiversidad en Costa Rica*. Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica. <https://www.sinac.go.cr>
- Quesada Román, A., & Feoli Boraschi, S. (2018). *Comparación de la metodología Mora-Vahrson y el método morfométrico para determinar áreas susceptibles a deslizamientos en la microcuenca del río Macho, Costa Rica*. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.61-2.1>

- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703.
- Solano, J., & Villalobos, R. (2001). Aspectos Fisiográficos aplicados a un Bosquejo de Regionalización Geográfica Climática de Costa Rica. *Top. Meteor. Oceanogr.*, 8. <https://www.researchgate.net>.
- Soto-Córdoba, S. M., Gaviria-Montoya, L., & Pino-Gómez, M. (2016). Situación de la gestión del agua potable en las zonas rurales de la provincia de Cartago, Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha* 29(8): 67. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i8.2986>
- R package, SPEI. Beguera S, Vicente-Serrano SM, Reig F, Latorre B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology* 34(10): 3001-3023.
- Vargas Sanabria, A. (2011). Balance hídrico en la cuenca alta del Río Reventazón, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central* 21: 37–46. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i21.8608>
- Gutiérrez Villalpando, V., Zapata Martelo, E., Nazar Beutelspacher, A., Salvatierra Izaba, B., & Ruíz de Oña, C. (2019). *Agricultura, sociedad y desarrollo* 16(2): 159-181. <https://doi.org/10.22231/asyd.v16i2.1005>
- Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, K., Bernhardt, J., Bierbower, W., ... & Verutes, G. (2018). *InVEST user's guide: Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs model*. The Natural Capital Project, Stanford University. <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/invest>
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review* 38(1): 55-94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Vigiak, O., Wilson, C., Newham, L. T., Rustomji, P., & Turrall, H. (2012). Modelling catchment processes affecting sediment yield in tropical developing countries. *Environmental Modelling & Software* 31: 73-83. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.11.017>