

Análisis de los impactos del cambio climático en la demanda hídrica del cultivo de caña de azúcar y su implicación en la sostenibilidad ambiental en la cuenca del río Sonso

Luis Fernando Prieto Lozano

Directora:

Kelly Andrea Aguirre

Administradora Ambiental, Magister en Ecotecnología

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrarias Pecuarias y del Medio Ambiente – ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

Semillero de Investigación IngTec, ECAPMA, CIP Dosquebradas

2024

Resumen

El estudio analiza el impacto del cambio climático en la demanda hídrica del cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso. Se estableció la demanda hídrica actual, se proyectaron escenarios futuros utilizando modelos climáticos y se propusieron estrategias de manejo sostenible del agua. Los resultados muestran un aumento en la demanda hídrica bajo escenarios de alta concentración de gases de efecto invernadero, subrayando la necesidad de implementar tecnologías de riego eficientes y estrategias de gestión del agua.

Palabras Clave: Cambio climático, demanda hídrica, caña de azúcar, cuenca del río Sonso, sostenibilidad, gestión del agua.

Abstract

The study analyzes the impact of climate change on the water demand for sugarcane cultivation in the Sonso River basin. The current water demand was established, future scenarios were projected using climate models, and sustainable water management strategies were proposed. The results show an increase in water demand under high greenhouse gas concentration scenarios, highlighting the need for efficient irrigation technologies and water management strategies.

Keywords: Climate change, water demand, sugarcane, Sonso River basin, sustainability, water management.

Tabla de Contenido

Resumen	2
Introducción.....	9
Planteamiento del Problema	11
Justificación	12
Objetivos.....	14
Objetivo General.....	14
Objetivos Específicos	14
Marco Contextual y Teórico.....	15
Metodología.....	20
Objetivo 1	22
Expresión para la determinación de la Precipitación media por el método Isoyetas.	24
Cálculo Precipitación efectiva.	24
Método Penman – Monteith para la estimación de la evapotranspiración media mensual potencial.	25
Demanda de uso para el sector agrícola.	27
Objetivo 2	28
Expresión para la determinación de la Precipitación media por el método Isoyetas.	30
Cálculo Precipitación efectiva.	31

Método Penman – Monteith para la estimación de la evapotranspiración media mensual potencial.	31
Expresión para la estimación de la evapotranspiración real.	32
Objetivo 3	35
Revisión de Literatura Científica y Técnica	35
Búsqueda y Selección de Fuentes	35
Criterios de Exclusión	36
Revisión y Síntesis de la Información	36
Resultados.....	37
Objetivo 1	37
Cálculo de la Demanda	48
Objetivo 2:	51
Escenarios de cambio climático	52
Objetivo 3:	69
Estrategias Propuestas.	69
Conclusiones.....	73
Referencias Bibliográficas.....	75
Apéndices	85

Lista de Tablas

<i>Tabla 1 Estaciones Seleccionadas</i>	38
---	----

Lista de Figuras

<i>Figura 1 Ubicación cuenca río Sonso.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2 Evapotranspiración de la cuenca del río Sonso.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3 Precipitación efectiva de la cuenca del río Sonso.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4 Demanda Hídrica de la cuenca del río Sonso.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 5 Diferencia demanda 2.6 – 2028.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 6 Diferencia demanda 2.6 – 2033.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 7 Diferencia demanda 2.6 – 2038.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 8 Diferencia demanda 4.5 – 2028.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 9 Diferencia demanda 4.5 – 2033.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 10 Diferencia demanda 4.5 – 2038.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 11 Diferencia demanda 6.0 – 2028.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 12 Diferencia demanda 6.0 – 2033.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 13 Diferencia demanda 6.0 – 2038.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 14 Diferencia demanda 8.5 – 2028.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 15 Diferencia demanda 8.5 – 2033.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 16 Diferencia demanda 8.5 – 2038.</i>	<i>68</i>

Lista de Gráficas

<i>Gráfica 1 Temperaturas máximas y mínimas por estación – Costa Rica</i>	<i>39</i>
<i>Gráfica 2 Temperaturas máximas y mínimas por estación – Guacarí.....</i>	<i>39</i>
<i>Gráfica 3 Temperaturas máximas y mínimas por estación – La Patagonia.....</i>	<i>40</i>
<i>Gráfica 4 Temperaturas máximas y mínimas por estación – Acueducto Buga.....</i>	<i>40</i>
<i>Gráfica 5 Temperaturas máximas y mínimas por estación – Mediacanoa-Alertas.....</i>	<i>41</i>

Introducción

El cambio climático se ha convertido en uno de los desafíos más apremiantes que enfrenta la humanidad en el siglo XXI. Sus efectos ya se hacen sentir en diversas regiones del mundo, y la cuenca del río Sonso, ubicada en el Valle del Cauca, Colombia, no es una excepción. Esta región, rica en biodiversidad y recursos hídricos, alberga un importante cultivo agrícola que ha sido fuente de desarrollo económico y social para la zona: la caña de azúcar.

La caña de azúcar es uno de los principales cultivos agrícolas a nivel mundial y desempeña un papel fundamental en la economía local de la cuenca del río Sonso. Sin embargo, el cambio climático plantea desafíos significativos para la sostenibilidad y la seguridad hídrica en esta región. El aumento de las temperaturas, los cambios en los patrones de precipitación y la variabilidad climática, entre otros factores, tienen un impacto directo en la demanda de agua para el riego de la caña de azúcar.

Este trabajo de grado aplicado tiene como objetivo analizar los efectos del cambio climático en la demanda hídrica del cultivo de caña de azúcar y su relación con los conflictos ambientales en la cuenca del río Sonso. Se busca comprender cómo las variaciones climáticas afectan la cantidad de agua requerida por el cultivo y cómo estos cambios pueden influir en los recursos hídricos disponibles en la cuenca.

Dentro del primer objetivo específico: Determinar la Demanda Hídrica Actual del Cultivo de Caña, se empleará una metodología basada en el uso del software LocClim y Cropwat, que proporciona estimaciones climáticas promedio para lugares donde no hay observaciones disponibles. Se recopilarán datos de 15 estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio, de fuentes como CVC, IDEAM, Cenicaña y particulares. Después de

realizar un análisis, se seleccionarán las estaciones Costa Rica, La Patagonia, Guacarí, Acueducto Buga y Mediacanoa-Alertas, que cumplen con los datos históricos necesarios y se encuentran dentro del buffer de 4 km alrededor de la cuenca. Estas estaciones proporcionarán los datos de precipitación necesarios.

Objetivo Específico 2: Proyectar Escenarios de Cambio Climático.

Para cumplir con este objetivo, se utilizarán modelos climáticos y datos históricos para proyectar escenarios de cambio climático en diferentes horizontes de tiempo. Los resultados de estos escenarios se compararán con los datos de precipitación obtenidos en el objetivo anterior para analizar las variaciones climáticas esperadas en la cuenca del río Sonso y su impacto en el cultivo de caña de azúcar.

Objetivo Específico 3: Proponer Estrategias de Gestión del Recurso Hídrico.

En este objetivo, se empleará la información desde la perspectiva de la ingeniería ambiental, el objetivo de desarrollar estrategias de gestión del recurso hídrico para el cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso es fundamental para abordar los desafíos que plantea el cambio climático en términos de demanda hídrica. Estas estrategias buscan no solo garantizar la viabilidad económica del cultivo, sino también proteger el medio ambiente. Para lograrlo, se enfocarán en la promoción de un uso más eficiente y sostenible del agua, lo que contribuirá a preservar los recursos hídricos de la cuenca y mitigar los posibles impactos negativos en el ecosistema. De esta manera, la ingeniería ambiental desempeña un papel esencial en la adaptación de la agricultura a las condiciones cambiantes del entorno, asegurando la armonía entre el desarrollo económico y la conservación del medio ambiente en la cuenca del río Sonso.

Planteamiento del Problema

El uso ineficiente del agua en los cultivos de caña de azúcar puede generar conflictos por el recurso hídrico en la región, ya que esta actividad puede llegar a ser una de las principales consumidoras de agua en zonas agrícolas. Estudios realizados por CENICAÑA indican que los requerimientos de agua en la zona cañicultora del valle del río Cauca en un ciclo de cultivo de 13 meses oscilan entre 10,000 y 14,000 m³/hectárea (CENICAÑA, 2018), en comparación con cultivos como la uva, el sorgo, el maíz y el aguacate que consumen entre 7,000-8,500, 5,000-10,000, 6,000-12,000 y 5,000-20,000 m³/hectárea por año respectivamente (FAO, 2012).

La mala gestión del agua en los cultivos de caña de azúcar puede generar conflictos entre los usuarios del recurso, especialmente en zonas donde el recurso es escaso o su disponibilidad es limitada. Además, los cambios en los patrones climáticos actuales afectan el desarrollo y los procesos fisiológicos de los cultivos (Bustamante et al., 2011).

Es importante destacar que, además de los problemas de gestión y uso del agua, los cambios en los patrones climáticos actuales, como la disminución de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas, pueden agravar aún más la situación del agua en las zonas cañeras, afectando el desarrollo y los procesos fisiológicos de los cultivos de caña de azúcar, así como los demás usos que se presentan en la cuenca (Bustamante et al., 2011).

Justificación

En Colombia, la producción de caña de azúcar tiene un valor significativo para muchas familias debido a que el país se encuentra entre los 15 mayores productores y exportadores de azúcar del mundo. La agroindustria de la caña se ubica actualmente como el quinto generador agroindustrial de divisas después del café, las flores, el cultivo de banano y el aceite de palma, convirtiéndose en un elemento estructural para la economía del país (James & Alzate, 2021).

Sin embargo, debido a la intensidad del uso del agua en la agroindustria cañera y el crecimiento del sector, se hace evidente y necesario conocer con exactitud el impacto de este cultivo sobre el recurso hídrico frente a los demás usos de la cuenca y sus posibles aportes al cambio y variabilidad climática. Ante esta necesidad de conocer mejor el impacto del cultivo y propender por alternativas que conlleven hacia el desarrollo sostenible en su producción, se destaca la importancia de la gestión integral del recurso hídrico.

La gestión integral del recurso hídrico implica la implementación de políticas y estrategias que buscan garantizar la equidad en el acceso al agua, su uso eficiente y la protección de los ecosistemas acuáticos (Muñoz et al., 2019). Por lo tanto, se convierte en una herramienta esencial para la sostenibilidad de la agroindustria de la caña de azúcar en Colombia. Esta gestión permitiría el uso eficiente del agua en la producción, reduciendo el impacto sobre otros usos de la cuenca y sobre el ambiente, contribuyendo así a un desarrollo sostenible del sector y al bienestar de las comunidades que dependen de él.

Por lo tanto, la gestión integral del recurso hídrico se convierte en una herramienta esencial para la sostenibilidad de la agroindustria de la caña de azúcar en Colombia. Esta gestión permitiría el uso eficiente del agua en la producción, reduciendo el impacto sobre

otros usos de la cuenca y sobre el ambiente, lo que contribuiría a un desarrollo sostenible del sector y al bienestar de las comunidades que dependen de él.

Una herramienta importante en esta gestión es el balance hídrico, ya que quienes se dedican a la producción de caña de azúcar obtienen información que les permite realizar un uso planificado del agua, optimizando el recurso. La mejora en la eficiencia del uso del agua permite evaluar diversos sistemas de riego y proveer recomendaciones basadas en las condiciones climáticas y el estado del cultivo (Sáenz, 2014).

El análisis del balance hídrico climático ayuda a conocer si un cultivo tiene déficit de agua o si por el contrario está teniendo un inadecuado uso del recurso, lo que arrojaría un resultado de exceso; ya que este analiza la entrada y salida del agua mediante la evapotranspiración en un sistema cualquiera, lo que obliga a saber la humedad disponible en el suelo. Dentro de este balance se encuentran algunos indicadores como el déficit climático, la eficacia de las lluvias y el factor de humedad Balance Hídrico Climático (Universidad el Bosque, 2016). El balance hídrico del suelo se determina diariamente en función de la precipitación, el riego, la transpiración, la evaporación del suelo, la escorrentía y el drenaje desde la parte inferior del perfil (Tojo Soler et al., 2007).

Objetivos

Objetivo General

Analizar los efectos del cambio climático en la demanda hídrica del cultivo de caña de azúcar y su relación con los conflictos ambientales en la cuenca del río Sonso.

Objetivos Específicos

Determinar la demanda hídrica actual del cultivo de caña de acuerdo con las condiciones agroclimáticas de la cuenca del río Sonso.

Proyectar escenarios de cambio climático en diferentes horizontes de tiempo para el cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso.

Proponer estrategias para la gestión del recurso hídrico en el cultivo de caña en la cuenca del río Sonso según los escenarios de cambio climáticos proyectados.

Marco Contextual y Teórico

La agricultura se define como un conjunto de actividades económicas relacionadas con el cultivo de la tierra y el manejo de suelos fértiles para la producción de alimentos. Esta definición abarca todas las técnicas y acciones humanas enfocadas a la extracción de alimentos del entorno natural, lo que incluye una amplia variedad de prácticas y procesos destinados a asegurar la disponibilidad de productos alimenticios. Así, la producción de alimentos, en todas sus formas y variedades, se desarrolla en torno a la agricultura (Coll, 2021).

Según Odum (1984), la agricultura puede ser vista como el área encargada de la modificación de los ecosistemas naturales para transformarlos en agroecosistemas. Estos agroecosistemas son un tipo especial de ecosistema que presenta características intermedias entre los sistemas naturales y los sistemas industriales. La agricultura, por lo tanto, no solo se trata de la producción de alimentos, sino también de la gestión y alteración de los ecosistemas para hacerlos más productivos y sostenibles.

A lo largo de la historia, la agricultura ha experimentado transformaciones significativas que reflejan los cambios en los paradigmas, conocimientos e intereses de los seres humanos. Estas transformaciones han sido impulsadas por una variedad de actores, incluyendo agricultores, instituciones, universidades, centros de investigación, empresas y políticos, entre otros (Sarandón, 2020). En este contexto, muchos sistemas agrícolas han sido adaptados y mejorados para maximizar la producción de alimentos, como es el caso de la producción de caña de azúcar.

En Colombia, una de las regiones más destacadas en la producción de caña de azúcar es el departamento del Valle del Cauca. Este cultivo ocupa alrededor de 200,000

hectáreas, y el 60% de esta área se encuentra en el Valle del Cauca (González et al., 2001). La producción de caña de azúcar en esta región es particularmente demandante en términos de recursos hídricos. Según estudios realizados por CENICAÑA (2018), en un ciclo de cultivo de 13 meses, los requerimientos de agua en la zona cañicultora del valle del río Cauca oscilan entre 10,000 y 14,000 m³ por hectárea. Por lo tanto, la gestión adecuada del agua se convierte en un aspecto crítico para la sostenibilidad de la actividad agrícola en esta región (CENICAÑA, 2018).

La gestión integral del recurso hídrico es esencial para el cultivo de la caña de azúcar. Se utiliza un método de balance hídrico para determinar la cantidad de agua necesaria, equilibrando el uso del recurso para garantizar tanto el sustento de la población como la preservación de los recursos hídricos. El balance hídrico se establece comparando los aportes y las pérdidas de agua en un lugar y periodo específicos, considerando tanto las entradas como las salidas de agua (Ben-Daoud et al., 2021). Este proceso incluye conceptos fundamentales como la demanda hídrica, la evapotranspiración, la precipitación y la temperatura.

La demanda hídrica, en el contexto del Estudio Nacional del Agua (ENA) 2010, se define como la extracción hídrica del sistema natural destinada a suplir las necesidades del consumo humano, la producción sectorial y las demandas esenciales de los ecosistemas no antrópicos. En el sector agrícola, se consideran dos componentes principales: la estimación del agua extraída con fines agrícolas (que incluye el uso consuntivo y el agua extraída no consumida) y el valor agregado por el consumo de agua en las actividades de postcosecha (IDEAM, 2010).

La demanda hídrica de los cultivos, también conocida como evapotranspiración del cultivo (ET_c), se refiere al consumo de agua en condiciones donde el suelo no presenta deficiencias de agua y el cultivo se desarrolla en condiciones óptimas de sanidad y fertilidad. Esta demanda se puede determinar experimentalmente mediante el uso de lisímetros o, en ausencia de estos, calculando la evapotranspiración de referencia (ET_o) y el coeficiente hídrico (K_c) del cultivo en consideración. Bajo estas condiciones, la evapotranspiración alcanza su valor más alto, también conocida como evapotranspiración máxima (E_m) (García Villanueva et al., 2017).

La evapotranspiración (ET) es un componente crucial del ciclo del agua y describe el proceso de transferencia de agua a la atmósfera, tanto por evaporación del suelo como por transpiración de las plantas (Monterroso-Rivas & Gomez-Díaz, 2021). La evapotranspiración incluye dos procesos: la evaporación (E) y la transpiración (T). La evaporación se refiere al proceso por el cual el agua se transfiere desde la superficie terrestre hacia la atmósfera, ya sea desde el suelo, superficies vegetales vivas o muertas. La transpiración, por otro lado, implica la transferencia de agua absorbida por las raíces de las plantas hacia la atmósfera, principalmente a través de las estomas en las hojas. La dificultad para separar estos dos procesos en condiciones naturales llevó a la introducción del concepto de evapotranspiración (ET), que abarca la transferencia total de agua desde una superficie con cubierta vegetal a la atmósfera (Reckmann, s.f.).

La evapotranspiración se divide en potencial (ETP) y real (ETR). La ETP se refiere a la cantidad máxima de agua que puede evaporarse en un clima dado por una cubierta vegetal bien dotado de agua. Este proceso combina la evaporación de todos los tipos de superficie (agua, vegetación, suelo) y la transpiración de las plantas en un intervalo de

tiempo y región determinados. La ETR, en cambio, hace referencia a la cantidad de agua efectivamente evaporada desde la superficie del suelo y transpirada por la vegetación, expresada en milímetros por día (IDEAM, s.f.).

La ETP está influenciada por parámetros climáticos y no tiene en cuenta las características específicas del cultivo, como el índice foliar, la resistencia estomatal o la altura de la vegetación, ni factores del suelo (Monterroso-Rivas & Gómez-Díaz, 2021).

En meteorología, la precipitación se refiere al depósito de agua sólida o líquida proveniente de la atmósfera, aplicable a fenómenos como la lluvia, nieve, granizo, rocío y neblina. La cantidad de precipitación se expresa en milímetros (mm), donde 1 mm de lluvia equivale a 1 litro por metro cuadrado (Jaramillo Robledo, 2005).

La temperatura es una propiedad de los sistemas que determina si están en equilibrio térmico. Este concepto se deriva de la idea de medir el grado de calor o frío relativo y de observar que las variaciones de calor sobre un cuerpo producen variaciones en su temperatura. En meteorología, la temperatura se registra en estaciones meteorológicas que miden datos a horas fijas, valores de temperaturas máximas y mínimas, o registros continuos llamados termogramas. Estos datos permiten realizar cálculos estadísticos para descripciones climatológicas generales. La temperatura afecta el desarrollo de los cultivos, ya que un incremento de la temperatura ambiental puede influir en la tasa de crecimiento, limitar la actividad fotosintética y aumentar la respiración de las plantas (Ellis et al., 1990; Lawlor, 2005).

Los modelos climáticos son herramientas fundamentales para calcular las necesidades hídricas de los cultivos, proporcionando información valiosa sobre el cambio climático, sus causas, efectos y posibles estrategias de mitigación. Estos modelos analizan

tanto las observaciones del pasado como las proyecciones futuras (Asamblea Ciudadana para el Clima, 2022). En ingeniería ambiental, los modelos climáticos se utilizan para evaluar riesgos ambientales y apoyar la planificación de recursos naturales (Fajardo Vázquez & Quilli Quezada, 2019). Son esenciales para evaluar la vulnerabilidad y la resiliencia de los sistemas naturales y humanos frente al cambio climático (Qiao et al., 2013), ayudando a planificar infraestructuras y sistemas de mitigación y adaptación, como sistemas de drenaje, control de inundaciones y gestión de recursos en épocas de estiaje (Lu et al., 2021). Además, los modelos climáticos permiten evaluar la eficacia de estrategias de mitigación y adaptación, como la implementación de tecnologías de energía renovable y la reforestación, ayudando a reducir la huella de carbono y aumentar la resiliencia de los ecosistemas (Fajardo Vázquez & Quilli Quezada, 2019).

Metodología

La cuenca del río Sonso se encuentra en jurisdicción del departamento del Valle de Cauca, el cual geográficamente está ubicado en la macrocuenca Magdalena–Cauca, en zona hidrográfica del Cauca, esta cuenca tiene un área de 14.141 Ha (CVC,2015); limita al norte con la cuenca del río Guadalajara, al sur y al oriente con la cuenca del río Guabas y al occidente con el río Cauca. El río Sonso nace en las estribaciones de la cordillera central, flanco occidental, a una altura cercana a los 2.500 msnm, en inmediaciones de la cuchilla denominada “Chafalote”. Desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Cauca, sirve de límite entre los municipios de Buga y Guacarí, corre en sentido oriente occidente y su cauce tiene una longitud de aproximadamente 26,4 kilómetros. En los primeros 15 kilómetros de recorrido se le conoce con el nombre de río Sonsito y una vez concluye la quebrada Gualí, toma el nombre de río Sonso (CVC, 2017).

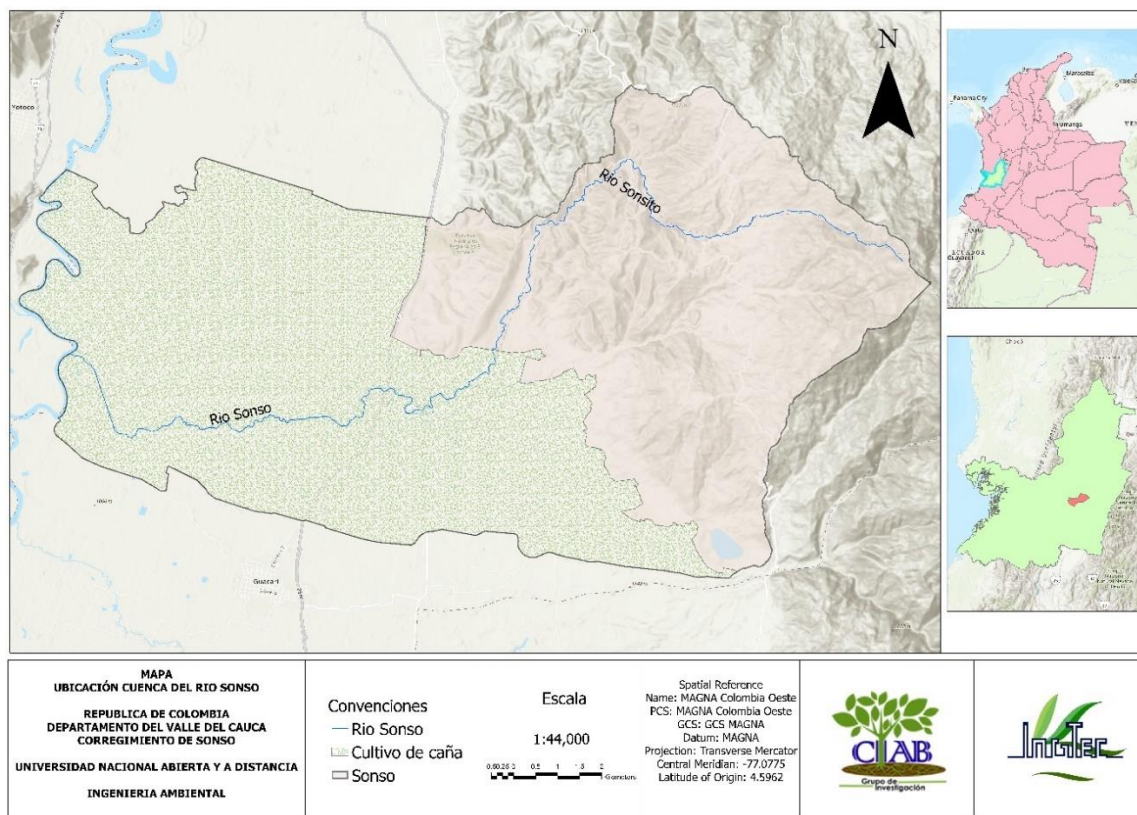
Es importante destacar que esta distribución del uso del suelo no es homogénea en toda la cuenca, ya que la zona consumidora muestra una distribución ligeramente diferente. Aquí, los cultivos permanentes dominan con un impresionante 69% del área total, subrayando la importancia de la producción agrícola sostenible. Los pastos para ganadería representan el 15%, mientras que los cultivos transitorios ocupan el 9%. La vegetación boscosa y las áreas de protección natural abarcan el 5%, y los cuerpos de agua e infraestructura residencial ocupan el 1% cada uno. (CVC, 2017)

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-FAO (2012) el requerimiento de agua para un cultivo de caña de azúcar con objetivo de producción de azúcar y panela oscila entre 15000 y 20000 m³/hectárea por año, en comparación con cultivos como la uva, el sorgo, el maíz y el aguacate que consumen

entre 7000-8500, 5000-10000, 6000-12000 y 5000-20000 m³/hectárea por año respectivamente, lo mencionado se trata de un valor medio mundial, las demandas de agua pueden variar según el tipo de cultivo y la zona geográfica donde estén sembrados (CENICAÑA, 2018).

Figura 1

Ubicación cuenca río Sonso.



Nota. Ubicación geográfica de la cuenca del río sonso con el área sembrada de caña.

Fuente: Elaboración propia.

Objetivo 1

Para el desarrollo de este primer objetivo se inicia con la realización del inventario, localización geográfica y caracterización de las estaciones meteorológicas presentes en la cuenca que cuentan con la información necesaria y relevante para hacer el tratamiento de datos.

Se obtiene y analiza información que permita la selección de estaciones meteorológicas, posterior a esto, se aplican los siguientes tres criterios con el fin de ordenar y verificar la información recolectada de las estaciones:

Criterio de antigüedad, el cual se realiza para las estaciones activas o inactivas, luego se aplica el criterio de modalidad, este tiene en cuenta los registros históricos pertenecientes a años modales. Por último, se procede a realizar el criterio de confiabilidad, este se aplica en función de la disponibilidad de datos faltantes de la estación. Finalmente, si la estación supera cada uno de los criterios planteados, ésta es aceptada.

Se procede a realizar la estimación de datos faltantes aplicando el método de Proporciones Normales (Loaiza et al., 2014; Jiménez, 1992; Aparicio, 1982) y posteriormente el Análisis Exploratorio de Datos (AED). También se relacionan las estaciones a las que se le hacen el proceso y se verifica si cumplen con los criterios de antigüedad, modalidad y confiabilidad.

El software LocClim es una herramienta invaluable para obtener datos climáticos promedio en lugares donde no existen estaciones meteorológicas que proporcionen observaciones directas, su utilización se justifica en que una de las principales ventajas de LocClim es su capacidad para estimar las condiciones climáticas en áreas carentes de registros meteorológicos. Esto resulta especialmente útil en el campo de la

agroclimatología, donde es fundamental conocer las condiciones ambientales para optimizar el rendimiento de los cultivos.

Además, en regiones donde la cantidad de estaciones meteorológicas es escasa, el software LocClim se convierte en una herramienta crucial para obtener información climática confiable. En estas áreas, la falta de observaciones directas puede dificultar la toma de decisiones relacionadas con la agricultura y otros sectores.

Una aplicación específica del software LocClim es en el programa Cropwat, que se utiliza para calcular la precipitación efectiva y la evapotranspiración en la zona de estudio. Los datos de temperaturas máximas y mínimas obtenidos a través de LocClim son fundamentales para alimentar este programa y obtener estimaciones precisas de la evapotranspiración en las zonas de cultivo de caña de azúcar en el área de estudio.

Se relaciona la expresión teórica para la estimación de la precipitación por medio del método de Isoyetas.

Expresión para la determinación de la Precipitación media por el método Isoyetas.

$$Pm = \frac{\sum_{j=1}^n Pj * Aj}{A} \quad (1)$$

Donde en la ecuación (1),

A_j = Área de la franja i – ésima determinada por isoyetas consecutivas (m²).

P_j = Precipitación media de la franja i ésima (mm/mes).

A = Área total de la cuenca o zona (m²).

Se determina la precipitación efectiva con el fin de establecer el balance hídrico dentro de la divisoria de la Cuenca, el cual se analiza posteriormente para definir la demanda hídrica para el cultivo de la caña de azúcar.

Cálculo Precipitación efectiva.

$$Pe = Pm * \left(\frac{125 - (0.20 * Pm)}{125} \right) \quad Pm < 250mm/mes \quad (2)$$

$$Pe = 125 + (0.1 * Pm) \quad Pm > 250 mm/mes$$

Donde en la ecuación (2),

Pe = Precipitación efectiva (mm/mes).

Pm = Precipitación media mensual multianual (mm/mes).

Se utiliza el método Penman – Monteith para estimar la evapotranspiración media mensual potencial (ETP).

Método Penman – Monteith para la estimación de la evapotranspiración media mensual potencial.

$$ETP = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (3)$$

Dónde en la ecuación (3),

ETP = evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹).

R_n = radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹).

G = flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹).

T = temperatura media del aire a 2 m de altura (°C).

u₂ = velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹).

e_s = presión de vapor de saturación (kPa).

e_a = presión real de vapor (kPa).

e_s-e_a = déficit de presión de vapor (kPa).

Δ = pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹).

γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

La evapotranspiración media se estima a partir de la aplicación del método anterior con datos alternativos (Lobo, 2004), temperatura máxima, temperatura mínima y ubicación geográfica de las estaciones, aplicando la herramienta CROPWAT 8.0.

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura científica y estudios relevantes sobre el cultivo de caña de azúcar. Esta revisión se enfocó en investigaciones que abordaran el coeficiente de cultivo (K_c) y los métodos de riego aplicables a la zona de estudio. Se seleccionaron fuentes que proporcionaran datos empíricos y modelos teóricos pertinentes, asegurando la inclusión de una amplia gama de estudios para obtener una visión completa de las prácticas y recomendaciones actuales en el manejo hídrico del cultivo de caña de azúcar. Esta revisión permitió identificar los valores más apropiados del coeficiente de cultivo y los métodos de riego que maximizarían la eficiencia del uso del agua en la región de la cuenca del río Sonso.

Basándose en los estudios previos y considerando que no se trabajarían con estados vegetativos específicos del cultivo, se seleccionó el coeficiente de cultivo (K_c) mayor de 1.39 como el valor más apropiado para el cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso. Este valor representa la máxima tasa de extracción de agua por parte del cultivo, asegurando así que se consideren las necesidades hídricas más exigentes del mismo.

Para determinar el método de riego más adecuado para el cultivo de caña de azúcar en la zona de estudio, se evaluaron diversas opciones. Este proceso incluyó un análisis detallado de las características agroclimáticas de la cuenca y las necesidades hídricas del cultivo. Tras una evaluación comparativa de diferentes métodos de riego, se optó por el método de riego por aspersión. Este método implica aplicar agua al cultivo en forma de una fina llovizna, lo que permite una distribución uniforme del agua y reduce las pérdidas por evaporación y escorrentía. Se estimó que el método de riego por aspersión podría alcanzar eficiencias de aplicación entre el 80% y el 85%, lo cual es crucial para una gestión eficiente del agua en la agricultura (Cenicaña, 1995).

Adicional, a partir de la precipitación media y la evapotranspiración obtenida para la Cuenca, se procedió a realizar la demanda hídrica en función del cultivo de la caña de azúcar, con el fin de definir exceso hídrico y/o déficit hídrico.

Para hallar esta demanda se utiliza:

Demanda de uso para el sector agrícola.

$$DUA = [(ETP * Kc) - Pe] * \text{Área (ha)} / Ef \quad (4)$$

Donde en la ecuación (4),

DUA = Demanda de uso para el sector agrícola

Pe = Precipitación efectiva

ETP = Evapotranspiración potencial

Kc = Coeficiente de uso del agua del cultivo

Ef = Eficiencia del sistema de riego empleado

Objetivo 2

En la realización del segundo objetivo, se tomaron como referencia para la descarga de la información las mismas estaciones meteorológicas utilizadas en el objetivo número 1⁽²²⁾; junto a esto, se utiliza la herramienta Marcksim siendo esta una herramienta que utiliza downscaling estocástico basado en patrones climáticos para ajustar los resultados de los GCMs y proporcionar información climática detallada y local. Para comprender cómo el cambio climático afecta a áreas específicas, se empleó una técnica que resulta especialmente valiosa cuando los datos de estaciones meteorológicas locales son limitados. Esta técnica permitió realizar un análisis detallado del impacto climático en la región de estudio, integrando datos de modelos climáticos globales y regionales para proporcionar una perspectiva precisa sobre las variaciones climáticas esperadas. La metodología incluyó la calibración y validación de estos modelos con datos históricos disponibles, asegurando así la fiabilidad de las predicciones obtenidas.

En la descarga de la información se utilizan los Representative Concentration Pathways (RCP), que en español se traducen como "Escenarios Representativos de Concentración," para visualizar las posibles afectaciones en cada uno de los posibles sucesos frente a los cambios de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), estos son un conjunto de cuatro escenarios utilizados en la investigación climática para proyectar futuras concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Estos escenarios se desarrollaron para proporcionar una serie de trayectorias de emisiones y concentraciones de GEI que los científicos y los modelos climáticos pueden utilizar para evaluar los posibles impactos del cambio climático en diferentes contextos y bajo distintos niveles de acción.

Los cuatro RCPs son:

- **RCP2.6:** Este escenario representa un futuro en el que las emisiones de GEI se reducen significativamente y se estabilizan en la segunda mitad del siglo XXI. Se caracteriza por una disminución temprana y continua de las emisiones, lo que conduce a un aumento limitado de la temperatura global, con el objetivo de mantener el calentamiento por debajo de 2 grados Celsius con respecto a los niveles preindustriales.
- **RCP4.5:** Este escenario representa un futuro en el que las emisiones de GEI continúan aumentando hasta mediados de siglo, pero luego disminuyen gradualmente. Aunque implica una reducción en las tasas de emisión, todavía conduce a un aumento significativo en la temperatura global en comparación con los niveles preindustriales.
- **RCP6.0:** En este escenario, las emisiones de GEI aumentan hasta mediados de siglo y luego se estabilizan. Este camino conlleva un calentamiento global moderado, pero aún significativo, y se ubica en un rango intermedio en términos de impactos climáticos.
- **RCP8.5:** También conocido como "RCP alto," este escenario representa un futuro en el que las emisiones de GEI continúan aumentando sin restricciones a lo largo del siglo XXI. Como resultado, se prevé un aumento sustancial de la temperatura global y una serie de impactos climáticos graves.

Estos RCPs se utilizan en modelos climáticos para evaluar cómo diferentes trayectorias de emisiones de GEI pueden influir en las condiciones climáticas futuras.

Ayudan a los científicos y a los formuladores de políticas a comprender los posibles resultados del cambio climático en función de las decisiones tomadas en cuanto a las emisiones de GEI. Los RCPs también son fundamentales para el proceso de elaboración de informes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC 2023) y para la evaluación de los posibles impactos y adaptaciones necesarias en diferentes regiones del mundo.

Se relaciona la expresión teórica para la estimación de la precipitación por medio del método de Isoyetas.

Expresión para la determinación de la Precipitación media por el método Isoyetas.

$$P_m = \frac{\sum_{j=1}^n P_j * A_j}{A} \quad (5)$$

Donde en la ecuación (5),

A_j = Área de la franja i – ésima determinada por isoyetas consecutivas (m²).

P_j = Precipitación media de la franja i ésima (mm/mes).

A = Área total de la cuenca o zona (m²).

Se determina la precipitación efectiva con el fin de establecer el balance hídrico dentro de la divisoria de la Cuenca, el cual se analiza posteriormente para definir la demanda hídrica para el cultivo de la caña de azúcar.

Se utilizó la siguiente ecuación:

Cálculo Precipitación efectiva.

$$Pe = Pm * \left(\frac{125 - (0.20 * Pm)}{125} \right) \quad Pm < 250mm/mes$$

$$Pe = 125 + (0.1 * Pm) \quad Pm > 250 mm/mes$$
(6)

Donde en la ecuación (6),

Pe = Precipitación efectiva (mm/mes).

Pm = Precipitación media mensual multianual (mm/mes).

Para la estimación de la evapotranspiración se utiliza el método Penman – Monteith.

Método Penman – Monteith para la estimación de la evapotranspiración media mensual potencial.

$$ETP = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)}$$
(7)

Dónde en la ecuación (7):

ETP = evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹).

R_n = radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹).

G = flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹).

T = temperatura media del aire a 2 m de altura (°C).

u₂ = velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹).

e_s = presión de vapor de saturación (kPa).

e_a = presión real de vapor (kPa).

$e_s - e_a$ = déficit de presión de vapor (kPa).

Δ = pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹).

γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

La medición de la evapotranspiración real para la subzona hidrográfica del río Sonso, se estimó aplicando el Método Budyko (CARDER, 2014, CARDER & UNAL, 2010).

Expresión para la estimación de la evapotranspiración real.

$$ETR = \left[ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) \left(1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right) \right) \right]^{1/2} \quad (8)$$

Donde en la ecuación (8),

ETR= Evapotranspiración real (mm/mes)

P = Precipitación (mm/mes)

ETP = Evapotranspiración media potencial (mm/mes)

*: Por el período considerado, la cual se calcula aplicando el método de CENICAFÉ (UNAL, 2005).

La evapotranspiración media se estima a partir de la aplicación de los métodos anteriores con datos alternativos (Lobo, 2004), temperatura máxima, temperatura mínima y ubicación geográfica de las estaciones, aplicando la herramienta CROPWAT 8.0. Para establecer la temperatura, se usaron los registros históricos de las estaciones Climatológicas Principales Ginebra, Guacarí, al igual que la base de datos Terraclimate.

Para abordar la complejidad y la incertidumbre asociadas con las proyecciones climáticas, se implementó una metodología que aprovecha diversos modelos climáticos en el software disponible en (ILRI, 2010). La selección de modelos se basó en una revisión exhaustiva de la literatura científica y la consideración de su reconocimiento internacional, asegurando su calidad y confiabilidad (IPCC, 2013).

Cada modelo fue configurado con parámetros específicos, teniendo en cuenta la resolución espacial y temporal, así como las variables climáticas relevantes para nuestros objetivos. Posteriormente, las simulaciones climáticas se llevaron a cabo en escenarios particulares, permitiendo la comparación y el análisis de resultados para identificar patrones y tendencias (IPCC, 2014).

La metodología adoptada incluyó el uso de múltiples modelos climáticos para abordar la naturaleza incierta del cambio climático. Se seleccionaron diversos modelos climáticos debido a que la variabilidad climática y las proyecciones futuras pueden variar significativamente entre ellos, y la combinación de varios modelos proporciona un rango más completo de escenarios posibles (Knutti et al., 2010). Esta estrategia permitió abordar las limitaciones individuales de cada modelo y capturar respuestas a escalas regionales, proporcionando una visión más holística y robusta de los posibles impactos climáticos (Hawkins et al., 2009).

Esta estrategia no solo considera la incertidumbre climática, sino también la variabilidad en las emisiones y en los escenarios socioeconómicos. Utilizar varios modelos posibilita explorar esta variabilidad y proporciona información más robusta para la toma de decisiones (Van Vuuren et al., 2011).

En resumen, la implementación de esta metodología, respaldada por la utilización de múltiples modelos climáticos, busca mejorar la confianza en las proyecciones climáticas y proporcionar una base sólida para la planificación y la toma de decisiones en el contexto del cambio climático en la zona de estudio.

En el contexto del análisis, se lleva a cabo un proceso adicional conocido como geoproceso, específicamente la calculadora ráster. El objetivo primordial de este procedimiento es evaluar la discrepancia existente entre la demanda hídrica actual y aquella proyectada a través de los modelos climáticos, considerando los diversos escenarios de Concentración de Gases de Efecto Invernadero (RCP, por sus siglas en inglés).

La ejecución de la calculadora ráster se incorpora como un paso esencial en la metodología para obtener una comprensión más precisa de las variaciones en la demanda de agua. Este análisis comparativo se realiza para discernir las diferencias entre la demanda hídrica actual y las proyecciones derivadas de los modelos climáticos, basados en diferentes escenarios de Concentración de Gases de Efecto Invernadero (RCP). La calculadora ráster permite integrar y analizar datos espaciales, facilitando la evaluación detallada de cómo los cambios proyectados en el clima podrían afectar la demanda de agua en la región de estudio.

Este enfoque integrado no solo enriquece nuestra perspectiva sobre la demanda hídrica actual, sino que también proporciona información valiosa sobre cómo los cambios climáticos previstos podrían influir en las necesidades hídricas futuras. En última instancia, la combinación de la evaluación de modelos climáticos y el geoproceso de la calculadora ráster nos brinda una visión integral y fundamentada para abordar los desafíos relacionados con la gestión del agua en el contexto de las transformaciones climáticas.

Objetivo 3

Basado en los resultados obtenidos en el objetivo 2, donde se proyectaron diferentes escenarios de cambio climático y se evaluaron sus impactos en la demanda hídrica del cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso, se realizó una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica sobre estrategias de gestión sostenible del recurso hídrico en el contexto del cambio climático.

Revisión de Literatura Científica y Técnica

Para desarrollar estrategias eficaces de gestión sostenible del recurso hídrico en el cultivo de caña de azúcar, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica. Este proceso incluyó varias etapas clave:

Búsqueda y Selección de Fuentes

Fuentes Primarias y Secundarias: Se consultaron tanto fuentes primarias (artículos científicos revisados por pares, tesis doctorales, y documentos técnicos originales) como secundarias (revisiones de literatura, informes técnicos y resúmenes de investigación). Las bases de datos utilizadas incluyeron Google Scholar, PubMed, Scopus y Web of Science.

Criterios de Inclusión: Se incluyeron estudios que abordaran específicamente la gestión del recurso hídrico en la agricultura, el cultivo de caña de azúcar, y los impactos del cambio climático en sistemas agrícolas. También se consideraron estudios de caso de regiones con condiciones agroclimáticas similares a las de la cuenca del río Sonso.

Criterios de Exclusión

Se excluyeron estudios que no presentaran datos empíricos sólidos, aquellos publicados en revistas de baja calidad, y documentos que no fueran directamente relevantes para el tema en estudio.

Revisión y Síntesis de la Información

Análisis Crítico: Cada documento seleccionado fue revisado críticamente para evaluar la metodología, los resultados, y la relevancia de las estrategias propuestas. Se utilizaron herramientas como tablas de resumen y matrices de comparación para organizar la información.

Síntesis de Estrategias: A partir de la revisión crítica, se sintetizaron las estrategias más efectivas y pertinentes para la gestión del agua en el cultivo de caña de azúcar bajo condiciones de cambio climático. Estas estrategias incluyeron prácticas de riego eficientes, manejo integrado del recurso hídrico, y técnicas de agricultura de conservación (García Villanueva, Rodríguez Hernández, & López García, 2017).

Resultados

Objetivo 1

La recopilación de datos climáticos es un paso crucial en la evaluación de la demanda hídrica para el cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso. Este proceso ha involucrado la obtención de información de diversas fuentes, incluyendo la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar (Cenicaña), y fuentes particulares.

Las estaciones climáticas ubicadas estratégicamente en el área de la cuenca juegan un papel fundamental en esta recopilación de datos. Un total de 15 estaciones climáticas fueron identificadas dentro de la zona de estudio, proporcionando una red significativa para la captura de información climática relevante. Estos puntos de recolección de datos permiten una cobertura geográfica adecuada, abarcando diferentes áreas y microclimas presentes en la cuenca del río Sonso.

Los datos recopilados de estas estaciones, junto con la colaboración de entidades como la CVC, el IDEAM, y Cenicaña, son esenciales para calcular la demanda hídrica del cultivo de caña de azúcar en la región. Esta metodología integral garantiza la precisión y la representación completa de las condiciones climáticas en la cuenca, fundamentales para comprender y gestionar eficientemente los recursos hídricos en el contexto agrícola.

Tras un análisis exhaustivo de la disponibilidad y calidad de los datos históricos necesarios para el estudio, se seleccionaron cinco estaciones específicas para llevar a cabo un análisis detallado. Estas estaciones son: Costa Rica, La Patagonia, Guacarí, Acueducto

Buga y Mediacanoa-Alertas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Se determinó que estas estaciones tienen disponible los datos de precipitación en términos históricos y se encuentran dentro del buffer de 4 km que se estableció alrededor de la cuenca del río Sonso.

Tabla 1

Estaciones Seleccionadas.

Nombre	Código	Latitud	Longitud	Altura	Categoría	Entidad
Costa rica	2613100107	3.75499266	76.2308902	1205	Pluviografica	CVC
Guacarí	26090630	3.770138889	76.3319444	974	Pluviométrica	IDEAM
La Patagonia	2613200105	3.83963074	76.2100115	2074	Pluviografica	CVC
Acueducto buga	26090790	3.883333333	76.2666667	1190	Pluviografica	IDEAM
Media canoa-alertas	26080290	3.890888889	76.3508333	940	Pluviométrica	IDEAM

Nota. Estaciones meteorológicas seleccionadas dentro de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

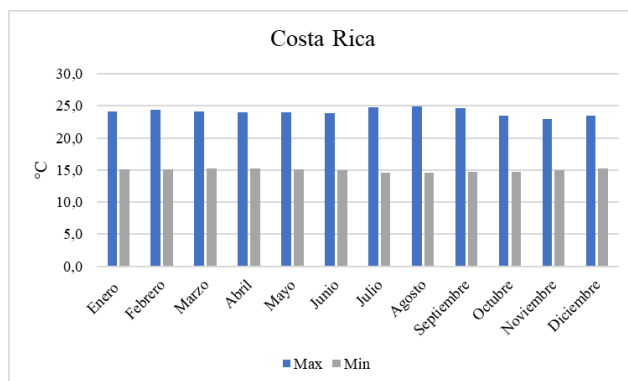
Para obtener los parámetros climáticos de temperaturas máximas y mínimas, se empleó el software LocClim, una herramienta que permite estimar las condiciones climáticas promedio en áreas donde no se dispone de observaciones directas. Este programa utiliza una base de datos actualizada llamada FAOCLIM, que contiene información climática de aproximadamente 30,000 estaciones en todo el mundo. Mediante LocClim, se

pudo obtener una caracterización detallada del clima en puntos individuales y generar mapas climáticos utilizando datos de estaciones proporcionados por el usuario o, en su ausencia, basándose en la base de datos FAOCLIM. Esta metodología amplía el alcance del análisis y brinda estimaciones fiables de las condiciones climáticas en la zona de estudio (FAO, s. f.).

Se generaron los gráficos por estación que representan los datos de temperaturas máximas y mínimas por cada mes del año.

Gráfica 1

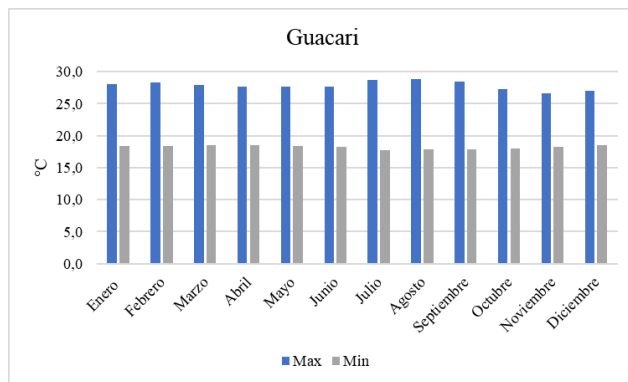
Temperaturas máximas y mínimas por estación – Costa Rica



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 2

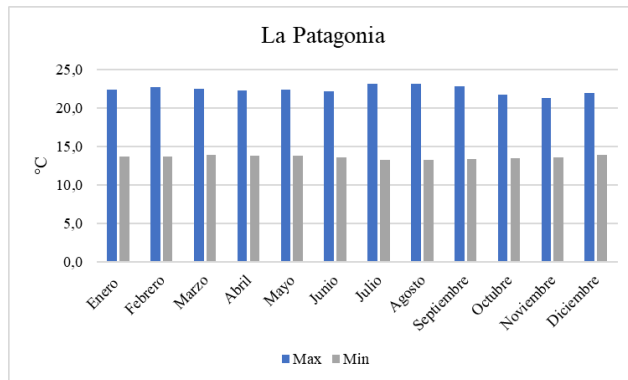
Temperaturas máximas y mínimas por estación – Guacarí



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3

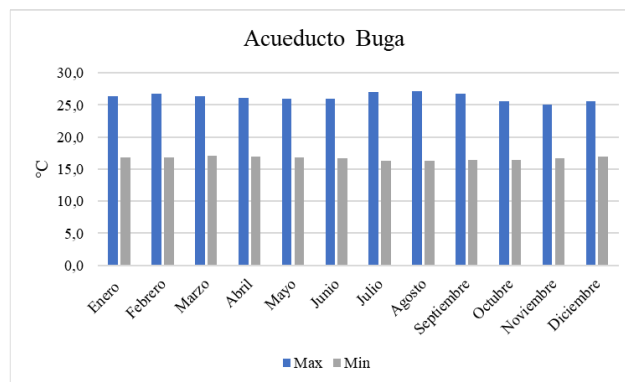
Temperaturas máximas y mínimas por estación – La Patagonia.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 4

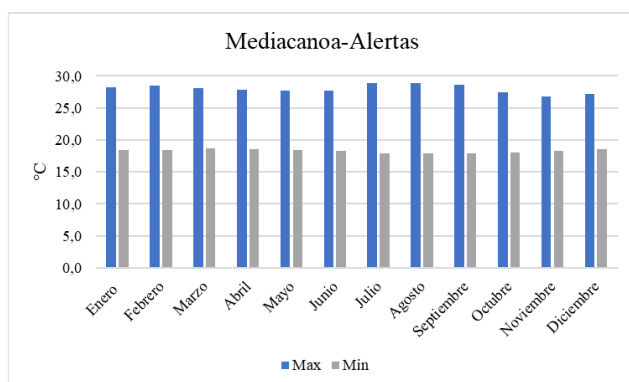
Temperaturas máximas y mínimas por estación – Acueducto Buga.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 5

Temperaturas máximas y mínimas por estación – Mediacanoa-Alertas.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta un análisis de las estaciones individuales y entre ellas y especificar que la cuenca es muy pequeña (Unidades en las gráficas)

La evapotranspiración potencial (ETP) se define como la cantidad máxima de agua que puede evaporarse en un determinado clima, considerando una cubierta vegetal continúa provista de agua. Este proceso combina la evaporación de distintos tipos de superficies, incluyendo agua, vegetación y suelo, junto con la transpiración de las plantas, durante un intervalo de tiempo específico en una región determinada. La ETP se expresa en milímetros de altura de agua (mm) (Allen et al., 2006).

La evapotranspiración está influenciada por una serie de factores que juegan un papel crucial en el ciclo hidrológico y en la gestión del agua en la agricultura. Estos incluyen condiciones meteorológicas como la radiación solar y terrestre, la temperatura del aire y de la superficie evaporante, la velocidad del viento, la humedad relativa del aire y la presión atmosférica. Además, las características del suelo, como el contenido de agua, las

propiedades físicas y la exposición, tienen un impacto significativo en la tasa de evapotranspiración. Asimismo, los atributos de la vegetación, como el sistema radicular, la extensión y la morfología del área foliar, juegan un rol determinante en la cantidad de agua que se evapora y se transpira desde la superficie del suelo (Allen et al., 2006).

Dado que medir directamente esta variable resulta complejo, generalmente se estima utilizando ecuaciones calibradas con datos reales obtenidos bajo condiciones controladas. En este estudio, como se ha mencionado se utilizó el software Cropwat, que integra diferentes parámetros climáticos para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) para cada mes del año en la cuenca del río Sonso.

El análisis de la evapotranspiración en la cuenca mostró que existe una mayor tasa de evapotranspiración en las zonas más bajas, donde la cantidad de agua disponible debido a la lluvia es menor a 25 milímetros en los meses de enero, febrero, abril, julio y octubre. La identificación de las áreas con mayor evapotranspiración en la cuenca es fundamental para comprender el balance hídrico y la demanda de agua en diferentes momentos del año y en distintas áreas geográficas. Estas zonas de alta evapotranspiración pueden ser más vulnerables a la escasez de agua y, por lo tanto, requieren una atención especial en la planificación y gestión del recurso hídrico. Asimismo, esta información ofrece una visión más completa de cómo la evapotranspiración afecta a los cultivos de caña de azúcar y otros usos agrícolas en la cuenca, lo que permitirá implementar prácticas de riego más eficientes y sostenibles.

La discusión sobre el balance hídrico también debe tener en cuenta las necesidades agrícolas y ambientales en la cuenca. La demanda de agua para la irrigación de cultivos, incluida la caña de azúcar, es esencial para la producción agrícola, pero también es

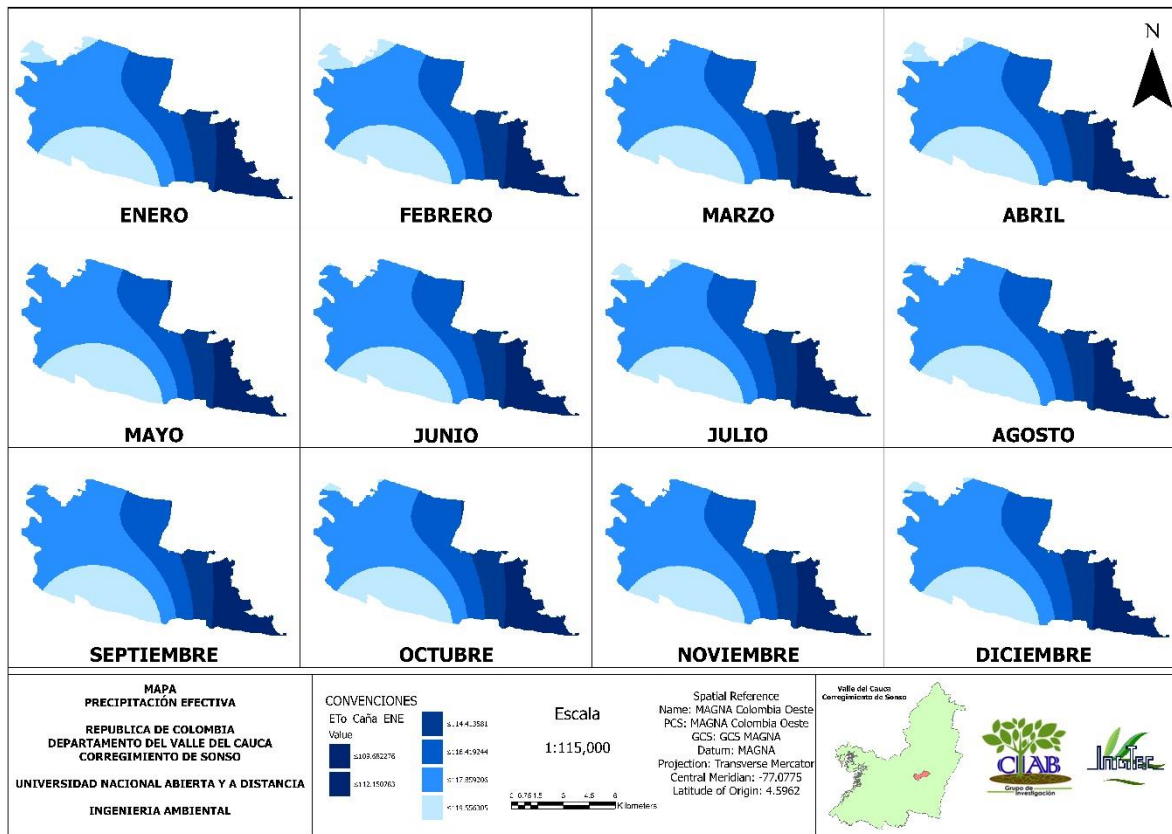
fundamental para la conservación de los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad en la región. Al entender cómo la evapotranspiración afecta la disponibilidad de agua en diferentes áreas y épocas del año, se pueden desarrollar estrategias de gestión más equitativas y sostenibles que consideren tanto las necesidades agrícolas como la conservación del ambiente.

En resumen, el análisis de la evapotranspiración en la cuenca del río Sonso proporciona información valiosa para comprender los patrones de demanda hídrica en diferentes áreas y momentos del año. Esta información es crucial para la planificación y gestión del recurso hídrico, permitiendo una distribución más equitativa y sostenible del agua para el cultivo de caña de azúcar y otros usos agrícolas, al tiempo que se considera la conservación del medio ambiente y los ecosistemas acuáticos en esta importante región.

El mapa resultante evidencia estas diferencias en la evapotranspiración y proporciona una visión integral de las condiciones agroclimáticas en la cuenca del río Sonso. Para comprender mejor estas variaciones, se deben considerar diferentes aspectos, como los usos del suelo que para esta zona tiene un total de 106 hectáreas entre bosque abierto, denso, fragmentado, de galería y ripario junto con arbustales y pastos enmalezados que permiten que el microclima y la cobertura vegetal e la zona. Se destaca la presencia de los relictos de bosque que colindan con la montaña lo que puede influir en los niveles de evapotranspiración (CVC,2017), ver (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** - **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 2

Evapotranspiración de la cuenca del río Sonso.



Nota. Evapotranspiración de la cuenca del río Sonso. Fuente: Elaboración propia.

Para obtener la precipitación efectiva, se calculó la precipitación media a partir de los datos de las estaciones seleccionadas. Esta precipitación media fue ingresada en el software Cropwat para obtener la precipitación efectiva, que se expresó en milímetros por mes (mm/mes).

Una vez introducidos los valores medios de precipitación de los diferentes años de las estaciones meteorológicas seleccionadas al software ArcGIS 10.8, se genera una interpolación para toda la zona de estudio permitiendo de esta forma, realizar un mapa que

muestra la distribución espacial de la precipitación en la cuenca del río Sonso, especialmente en las zonas de cultivo de caña (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). En dicho mapa, se puede observar una mayor precipitación en la parte alta de la zona de estudio, una precipitación más homogénea desde los meses de junio a septiembre y una baja precipitación hacia la parte occidental de la cuenca, en la desembocadura del río Sonso en el río Cauca.

En la representación cartográfica de la cuenca baja y media del río Sonso, se observa una característica distintiva en la distribución de la precipitación a lo largo del año. Las zonas con mayor precipitación se representan mediante tonos más intensos, mientras que las áreas con menor precipitación se presentan con tonos más claros. Específicamente, destaca una franja azul menos intensa en la parte occidental de la cuenca durante los meses de enero a abril y de octubre a diciembre. Esta observación coincide con los patrones climáticos identificados en la región.

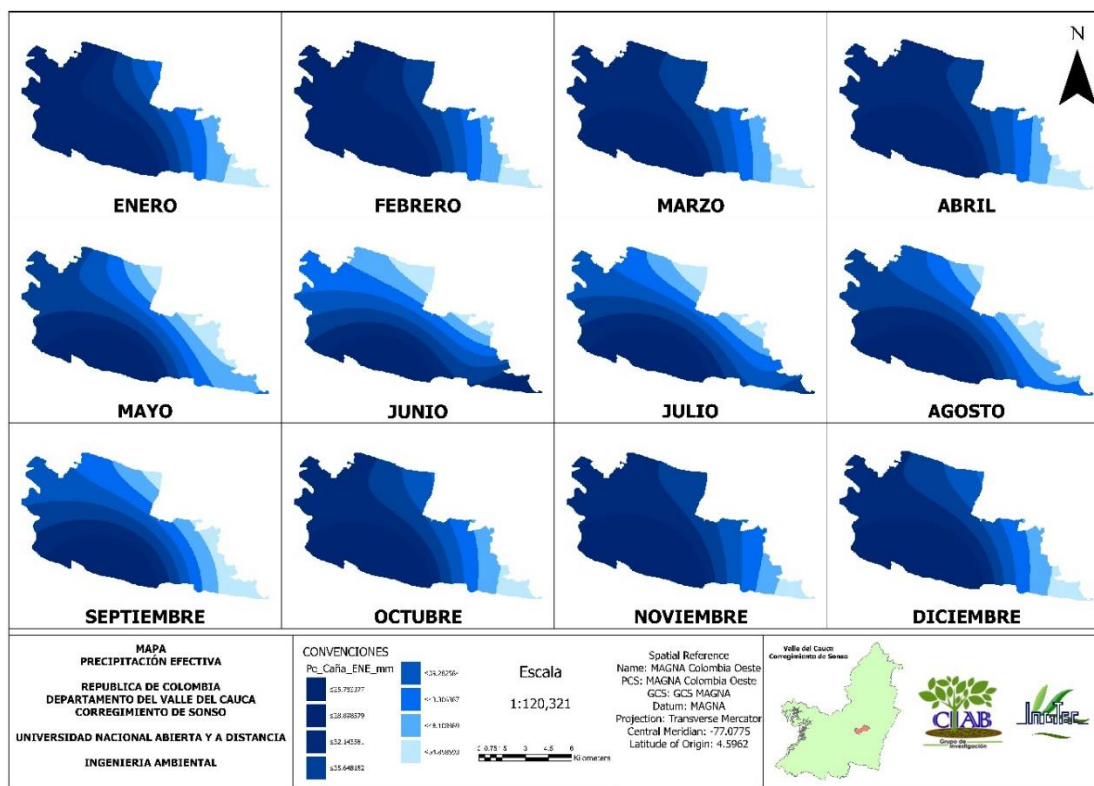
La presencia de una franja azul más intensa sugiere una menor concentración de precipitación durante los meses mencionados, lo cual se alinea con los patrones climáticos conocidos en la cuenca baja y media del río Sonso. La interpretación de la cartografía revela una estacionalidad en la distribución de la precipitación, resaltando meses específicos con una disminución relativa en la cantidad de lluvia. Esta información es fundamental para comprender y contextualizar los fenómenos climáticos en la zona de estudio, proporcionando una base para análisis más detallados y medidas de gestión del agua.

En la visualización cartográfica de las precipitaciones, la selección de tonos más claros para representar áreas con mayor cantidad de lluvia y tonos más intensos para señalar regiones con menor precipitación es una convención comúnmente utilizada.

El análisis realizado resalta una franja azul intensa en la parte occidental de la cuenca durante los meses de enero a abril y de octubre a diciembre y según estudios realizados por el IDEAM. La temporada seca principal abarca los meses de junio, julio y agosto, mientras que una temporada seca de menor intensidad se registra en diciembre, enero y febrero (*Características Climatológicas de Ciudades*. IDEAM, Sin fecha) concordando con los datos resultantes.

Figura 3

Precipitación efectiva de la cuenca del río Sonso.



Nota. Precipitación efectiva de la cuenca del río Sonso. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al coeficiente de cultivo (K_c), debido a que no se trabajará con estados vegetativos específicos, se utilizó el K_c mayor, que se estima en 1.39 según investigaciones previas, como el estudio realizado por Edgar Hincapié en 2016 titulado "Determinación de la evapotranspiración y de los coeficientes del cultivo de la caña de azúcar mediante lisímetros de pesaje". Este valor de K_c corresponde a la máxima tasa de extracción de agua por el cultivo de caña de azúcar.

Después de analizar el coeficiente de cultivo (K_c), se optó por utilizar el método de riego por aspersión para el cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso. Este método se caracteriza por aplicar agua al cultivo en forma de una fina llovizna, logrando una eficiencia de aplicación que oscila entre el 80% y el 85%. Sin embargo, su implementación requiere una inversión inicial significativa en sistemas de distribución y aplicación, así como costos adicionales relacionados con la mano de obra y el mantenimiento de los equipos (Ingenio Pichichi, 2018).

El riego por aspersión es recomendado especialmente para áreas de piedemonte y para el riego de germinación en cañas cultivadas en zonas templadas. Este método permite aplicar pequeñas cantidades de agua, generalmente no superiores a los 30 mm por riego, utilizando pistolas de riego que operan a presiones entre 85 y 125 psi (Ingenio Pichichi, 2018).

La elección del método de riego por aspersión se basó en un análisis exhaustivo de las características y condiciones específicas de la cuenca del río Sonso, así como en la información proporcionada por Cenicaña. Se consideraron elementos clave como el tipo de

suelo, el patrón de lluvias, la topografía y la disponibilidad de recursos hídricos. El riego por aspersión permite una distribución uniforme del agua en el cultivo de caña de azúcar, contribuyendo a un uso más eficiente del recurso hídrico y a una gestión del riego efectiva en la zona de estudio.

El valor de 0.6 para la eficiencia de riego fue seleccionado considerando múltiples factores que influyen en el proceso de riego y la cantidad de agua que llega efectivamente a las raíces del cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso.

Se tomaron en cuenta las condiciones climáticas locales, incluyendo la temperatura, humedad relativa y radiación solar, que afectan la cantidad de agua que se evapora antes de ser absorbida por las plantas, reduciendo la eficiencia del riego. El valor de 0.6 ajusta la cantidad de agua suministrada para asegurar que sea suficiente para las necesidades del cultivo.

Las características del sistema de riego, como el diseño y operación de los equipos, la uniformidad en la distribución del agua y las pérdidas por escurrimiento, también influyen en la eficiencia. Este valor refleja una estimación realista de la cantidad de agua que efectivamente se aprovecha para el riego.

Además, se consideraron las pérdidas por presión inadecuada en el sistema de riego y las pérdidas durante el traslado del agua desde la fuente de abastecimiento. El valor de 0.6 compensa estas pérdidas y ajusta la cantidad de agua suministrada.

Finalmente, se evaluaron las demandas energéticas asociadas al proceso de riego, asegurando que se utilice la cantidad mínima de energía necesaria para realizar el riego de manera efectiva.

Cálculo de la Demanda.

La ecuación empleada en los ráster generados previamente para representar la precipitación y evapotranspiración ofrece una valiosa comprensión de la demanda hídrica en la cuenca del río Sonso. Esta demanda se expresa en metros cúbicos por segundo (m^3/s) y se presenta de manera continua a lo largo de todos los meses del año. Al analizar la información resultante del cálculo y comparar las zonas previamente identificadas, se observa una coincidencia notable. Aquellas áreas con mayor evapotranspiración y menor precipitación se alinean con los picos de demanda hídrica más significativos, como se ilustra en la (Figura 4).

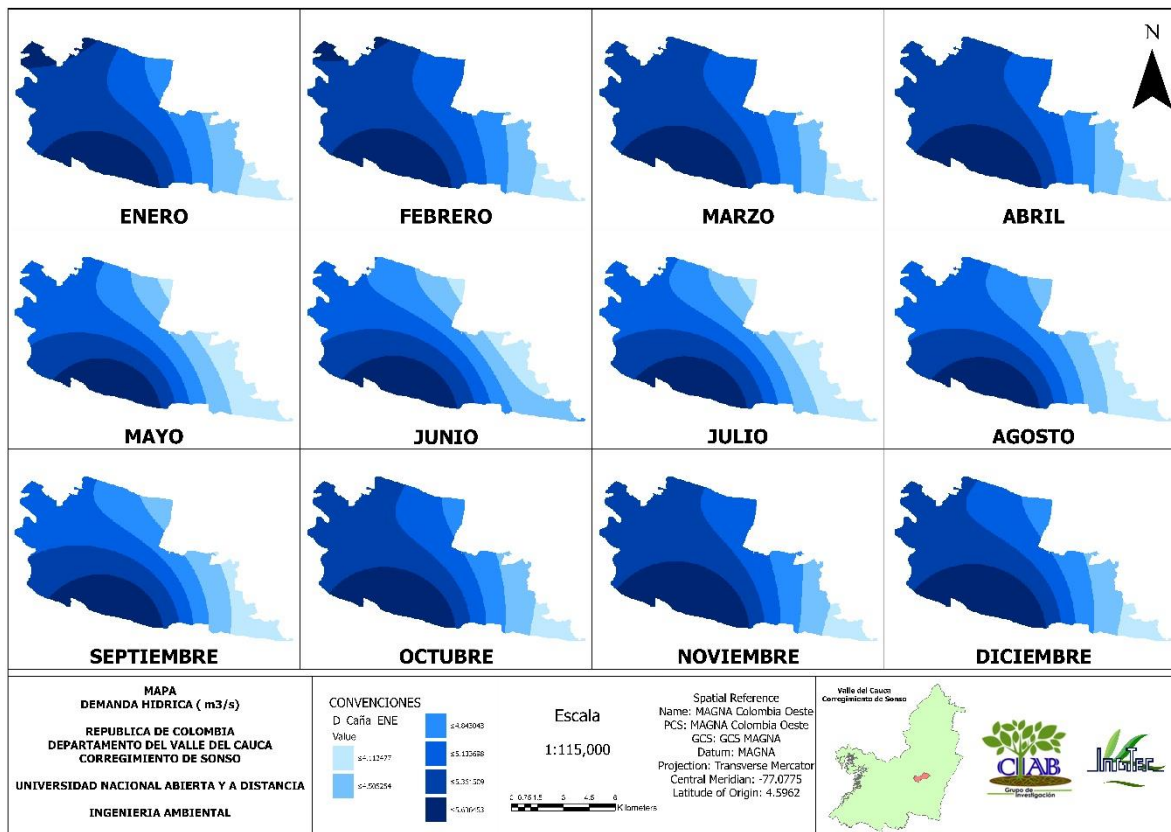
Específicamente, los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre destacan por presentar los picos más pronunciados de esta demanda. De acuerdo con la información proporcionada por CENICANÑA en 2018, las necesidades hídricas para el cultivo de caña de azúcar en la zona de estudio oscilan entre 10,000 y 14,000 m^3 /hectárea. Esto implica que, para el área de cultivo establecida en la región, que abarca 6,069 hectáreas, las necesidades hídricas varían entre 61,000 m^3 y 85,000 m^3 . Estos datos subrayan la importancia de comprender las variaciones estacionales en la demanda hídrica, especialmente durante los meses mencionados, para garantizar una gestión eficiente del recurso hídrico en la cuenca del río Sonso

El conocimiento de la demanda hídrica en metros cúbicos por segundo para cada mes del año es esencial para una gestión óptima del recurso hídrico en la cuenca del río Sonso. Estos resultados permitirán implementar estrategias adecuadas de riego y manejo del agua, considerando las variaciones estacionales y las necesidades específicas del cultivo de caña de azúcar y otros usos agrícolas en la zona. Con esta información detallada sobre la

demanda hídrica en cada período mensual, se podrá planificar de manera más eficiente la disponibilidad y distribución del recurso hídrico para garantizar un uso sostenible y equitativo en la cuenca del río Sonso.

Figura 4

Demanda Hídrica de la cuenca del río Sonso.



Nota. Demanda Hídrica de la cuenca del río Sonso. Fuente: Elaboración propia.

Objetivo 2:

La proyección de escenarios de cambio climático se ha convertido en una herramienta indispensable para la planificación y gestión agrícola, especialmente en áreas cruciales para la producción de cultivos clave, como la caña de azúcar. Este estudio se enfoca en la cuenca del río Sonso, una región estratégica para la producción de caña de azúcar. Nuestro principal objetivo es anticipar y comprender los posibles impactos del cambio climático en este cultivo crucial, considerando diferentes horizontes de tiempo.

Es fundamental destacar que todos los países serán afectados por estos fenómenos, y Colombia no es una excepción. En el país, existe una elevada preocupación en diversos niveles del Estado, en instituciones, sectores socioeconómicos, entidades territoriales y la comunidad nacional en general.

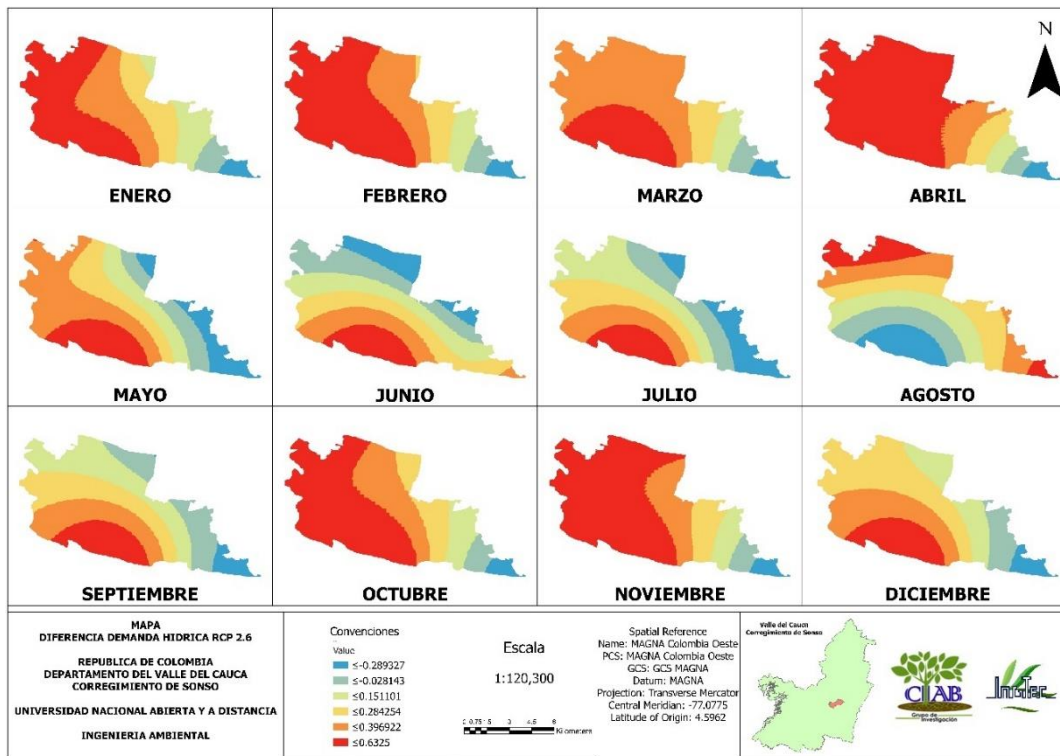
Este enfoque integral refleja la urgencia y la importancia de abordar las implicaciones del cambio climático en la producción de caña de azúcar y en el desarrollo de estrategias para la gestión del recurso hídrico en las zonas de cultivo para de esta forma garantizar la continuidad de la producción siendo esta un pilar vital para la economía de la zona y la seguridad alimentaria.

Escenarios de cambio climático

RCP 2.6.

Como paso inicial, se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo de la diferencia de demanda en la cuenca del río Sonso bajo el escenario RCP 2.6. Este escenario proyecta un futuro en el cual se implementan medidas significativas para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. Nos enfocamos especialmente en la variación de la demanda de agua, un factor esencial para el cultivo de caña de azúcar.

El Mapa de Diferencia de Demanda para el año 2028 (Figura 5) ofrece una visión clara de las áreas que podrían experimentar cambios con respecto a la demanda identificada en el objetivo anterior, marcando el punto de partida para identificar posibles modificaciones en las necesidades futuras de la zona de estudio. Las tonalidades rojas indican las mayores diferencias en comparación con la demanda inicial, mientras que las azules representan las diferencias menos pronunciadas. Para el escenario RCP 2.6, observamos que, a lo largo de todos los meses del año, la diferencia varía entre -0.8 y 1.07 m³/s, siendo este último especialmente notable en el mes de julio.

Figura 5*Diferencia demanda 2.6 – 2028.*

Nota. Demanda Hídrica de la cuenca del río Sonso. Fuente: Elaboración propia.

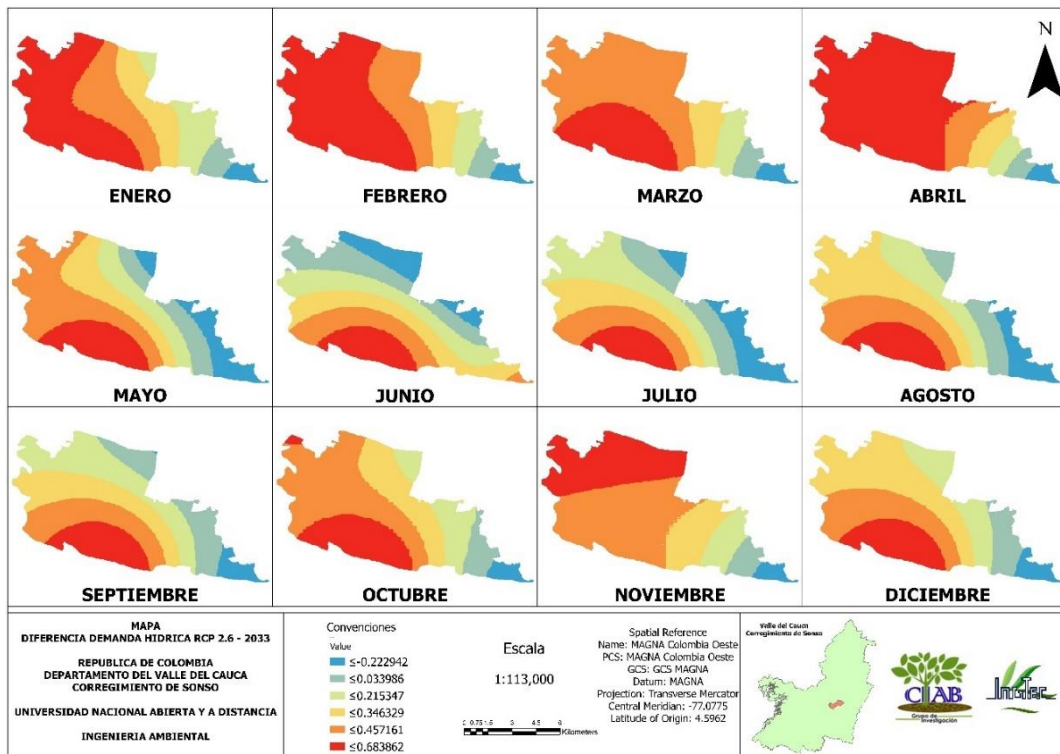
En un intento de comprender las dinámicas a largo plazo, extendemos nuestro análisis hacia el horizonte temporal de los años 2033 y 2038 bajo el escenario RCP 2.6. Esta proyección nos permite vislumbrar las posibles tendencias evolutivas en la demanda de agua para el cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso.

En el horizonte del año 2033 bajo el escenario RCP 2.6, (Figura 6), se proyecta una variación significativa en la demanda de agua para el cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso. En enero, donde la demanda oscila entre -0.2 y 0.6 m^3/s , se identifican áreas con nula necesidad de agua, mientras que otras presentan requerimientos moderados o

bajos. Febrero muestra un rango de 0.1 a 0.7 m³/s, indicando una variación similar en la demanda. Marzo, con diferencias entre -0.4 y 0.3 m³/s, resalta la diversidad de necesidades hídricas a considerar teniendo en cuenta que las necesidades siguen siendo nula o muy baja. La tendencia continúa a lo largo del año, siendo julio el período más crítico con valores entre 0.3 y 1.1 m³/s, donde áreas con demanda nula coexisten con aquellas con necesidades moderadas o bajas. Estos resultados enfatizan la importancia de estrategias adaptativas y sostenibles frente a las proyecciones de cambio climático en la región, donde es crucial diferenciar entre zonas con demanda nula y aquellas con necesidades menores o moderadas.

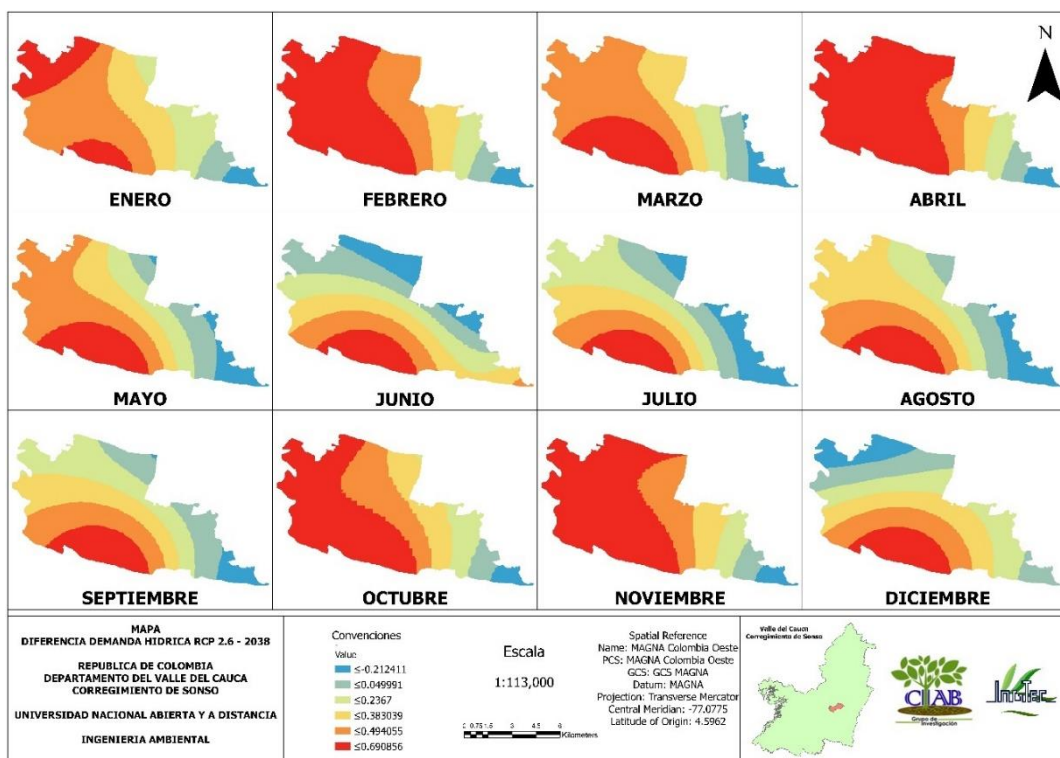
Figura 6

Diferencia demanda 2.6 – 2033.



Nota. Diferencia demanda 2.6 – 2033. Fuente: Elaboración propia.

En la proyección al año 2038 (Figura 7), se evidencia una variación similar respecto a los horizontes anteriores en la demanda de agua para el cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso. El análisis mensual revela una diversidad de necesidades hídricas, donde zonas con demanda nula coexisten con aquellas que presentan requerimientos moderados o bajos. En enero, por ejemplo, se identifican áreas con valores entre -0.21 y $0.69 \text{ m}^3/\text{s}$, indicando la presencia de nula demanda y necesidades moderadas. Este patrón se mantiene a lo largo del año, destacando la importancia de estrategias adaptativas y diferenciadas para la gestión del recurso hídrico, donde la coexistencia de áreas con diferentes niveles de demanda subraya la complejidad del desafío. Este análisis proporciona una base sólida para la implementación de medidas específicas y sostenibles en la planificación agrícola, considerando la variabilidad climática y las necesidades específicas de cada región en la cuenca del río Sonso.

Figura 7*Diferencia demanda 2.6 – 2038.*

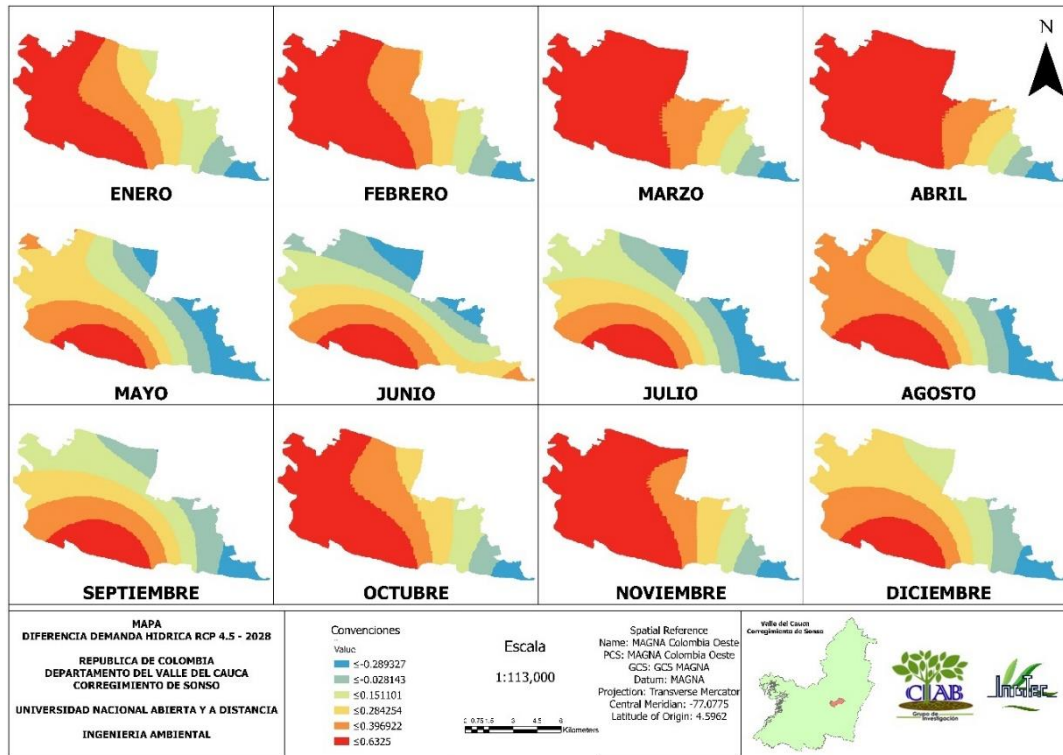
Nota. Diferencia demanda 2.6 – 2038. Fuente: Elaboración propia.

RCP 4.5

Es un escenario climático que representa un futuro donde las concentraciones de gases de efecto invernadero siguen aumentando, pero con intervenciones significativas para limitar esas emisiones. En este escenario, se anticipan medidas de mitigación y políticas que conducen a una estabilización relativa de las emisiones hacia la mitad del siglo XXI. Aunque aún implica un aumento en las temperaturas globales, el RCP 4.5 busca moderar el cambio climático (Chivelet.J.2019) en comparación con escenarios más extremos. Este escenario proporciona una visión de un futuro donde se toman acciones para mitigar el

impacto ambiental y climático, aunque no de manera tan agresiva como en los escenarios de emisión más bajos.

La exploración de los mapas de diferencia de demanda para los años 2028, 2033 y 2038 bajo el escenario RCP 4.5 revela patrones evolutivos en la necesidad de agua para el cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso. En el año 2028 (Figura 8), se observa una variación en la demanda que oscila entre -0.28 y 0.60 m^3/s para enero, evidenciando áreas con demanda nula y otras con necesidades moderadas o bajas. Este patrón se mantiene a lo largo del año, siendo junio, julio y agosto los períodos más críticos con valores entre 0.61 y 1.13 m^3/s , donde áreas con demanda nula coexisten como se presentan en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, con aquellas que requieren medidas de específicas para enfrentar demandas bajas que no alcanzan a llegar al m^3/s .

Figura 8*Diferencia demanda 4.5 – 2028.*

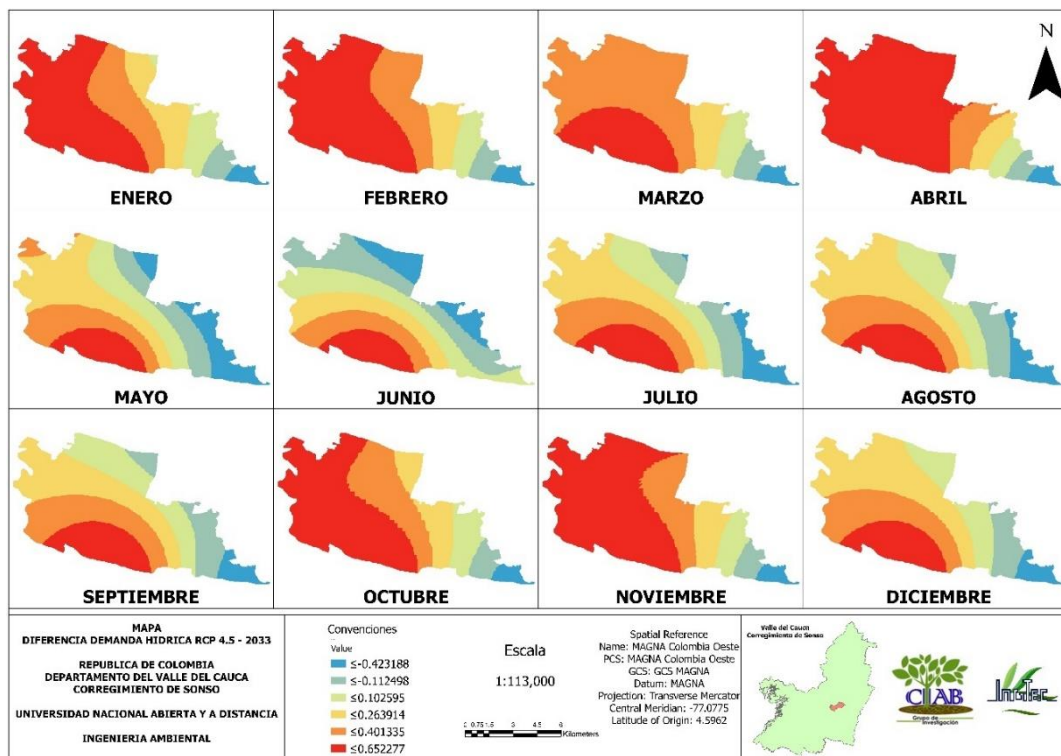
Nota. Diferencia demanda 4.5 – 2028. Fuente: Elaboración propia.

Al avanzar hacia el año 2033, se evidencia una tendencia hacia una mayor variabilidad en las demandas mensuales. En enero, por ejemplo, las diferencias oscilan entre -0.42 y 0.65 m^3/s , indicando la presencia de áreas con nula demanda y otras con requerimientos moderados o bajos. Sin embargo, este patrón se intensifica en marzo y noviembre donde se observa una mayor dispersión con valores entre -0.64 y -0.26 m^3/s y -1.20 y -0.06 m^3/s respectivamente, adicional, se continua con la tendencia al aumento de las necesidades hídricas del año 2028 en los meses de junio, julio y agosto con un máximo en

el mes de agosto de 1.19 m³/s en las necesidades hídricas en diferentes regiones de la zona de estudio.

Figura 9

Diferencia demanda 4.5 – 2033.



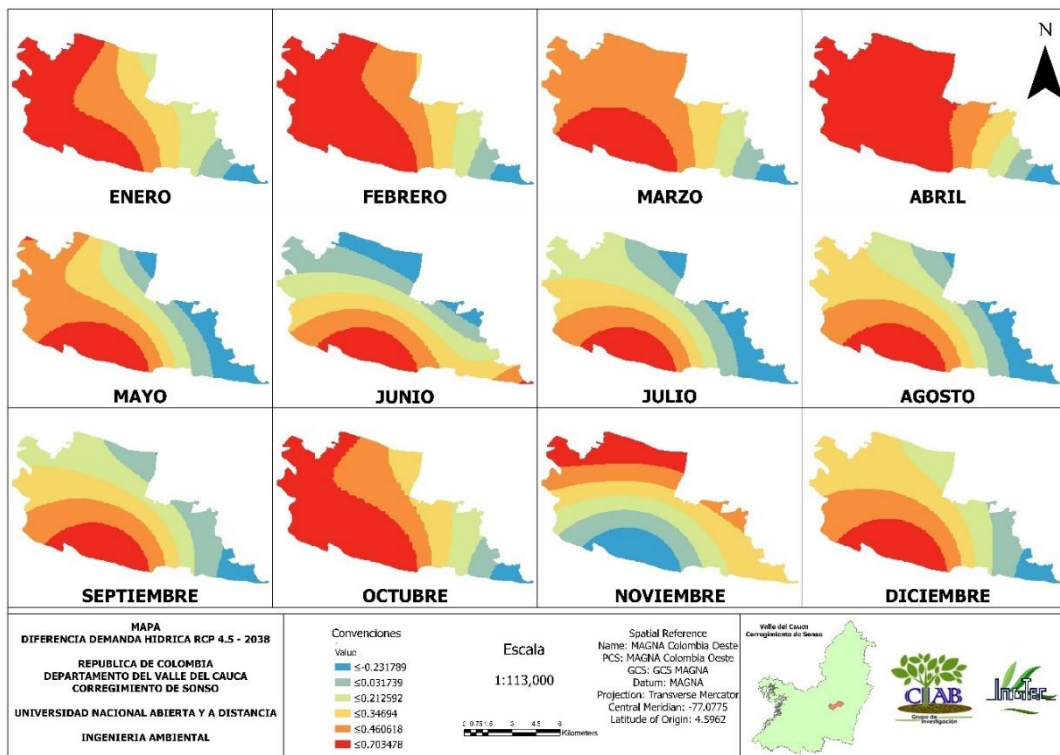
Nota. Diferencia demanda 4.5 – 2033. Fuente: Elaboración propia.

En el año 2038, la variación en la demanda continúa manifestando una mayor diversidad y desafíos en la gestión hídrica. En enero, la diferencia fluctúa entre -0.23 y 0.70 m³/s, mostrando nuevamente la coexistencia de áreas con demanda nula y otras con necesidades moderadas o bajas como es el caso de los meses de junio, julio y agosto que siguen presentando la mayor diferencia respecto a los otros meses con unas necesidades

que varían entre 0.77 y 1.14 m³/s. Sin embargo, en noviembre, se destaca una mayor variabilidad, con valores entre -2.40 y -0.58 m³/s, evidenciando la necesidad de estrategias adaptativas específicas para abordar condiciones extremas de posibles aumentos de caudal.

Figura 10

Diferencia demanda 4.5 – 2038.



Nota. Diferencia demanda 4.5 – 2038. Fuente: Elaboración propia.

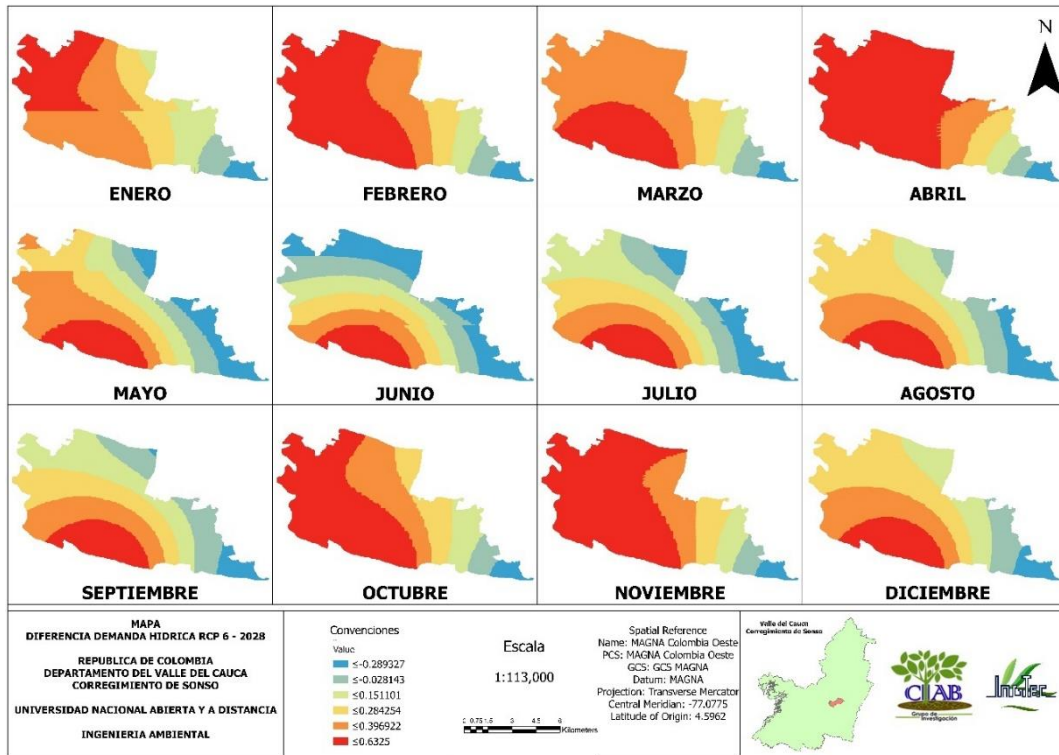
En todos los años analizados, la importancia de diferenciar entre zonas con demanda nula y aquellas con necesidades moderadas o bajas es crucial. Los resultados sugieren que, a medida que avanzamos en el tiempo, la variabilidad en las demandas hídricas se intensifica, subrayando la necesidad de estrategias para la gestión del recurso

hídrico flexibles y adaptativas para garantizar la sostenibilidad del cultivo de caña de azúcar y los diferentes actores presentes en la cuenca del río Sonso bajo el escenario RCP 4.5. La estabilización relativa de las emisiones en este escenario ofrece un marco para la planificación, pero la heterogeneidad en las necesidades de agua destaca la complejidad en la gestión del recurso en un contexto cambiante.

RCP 6

El RCP 6.0 es un escenario climático que representa un futuro donde las concentraciones de gases de efecto invernadero siguen aumentando, pero con intervenciones moderadas para limitar esas emisiones. Según Chivelet. 2019 estas son unas trayectorias de estabilización, Aunque implica un esfuerzo considerable para reducir las emisiones, este escenario aún prevé un aumento significativo en las temperaturas globales. Las medidas de mitigación en este escenario son menos intensivas en comparación con los escenarios de emisión más bajos, lo que resulta en un panorama donde se logra cierto control sobre el cambio climático, pero con desafíos considerables.

En los mapas de diferencia de demanda para los años 2028, 2033 y 2038 bajo el escenario RCP 6.0, se revelan patrones distintivos en la necesidad de agua para el cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso. En el año 2028, las variaciones en enero, con diferencias entre -0.15 y 0.77 m³/s, reflejan una diversidad de necesidades, desde áreas con demanda nula hasta aquellas con requerimientos más elevados. El mes crítico es junio, con valores entre 1.10 y 2.15 m³/s, donde se identifican áreas con demandas significativamente altas, destacando la importancia de estrategias adaptativas de gestión del recurso hídrico.

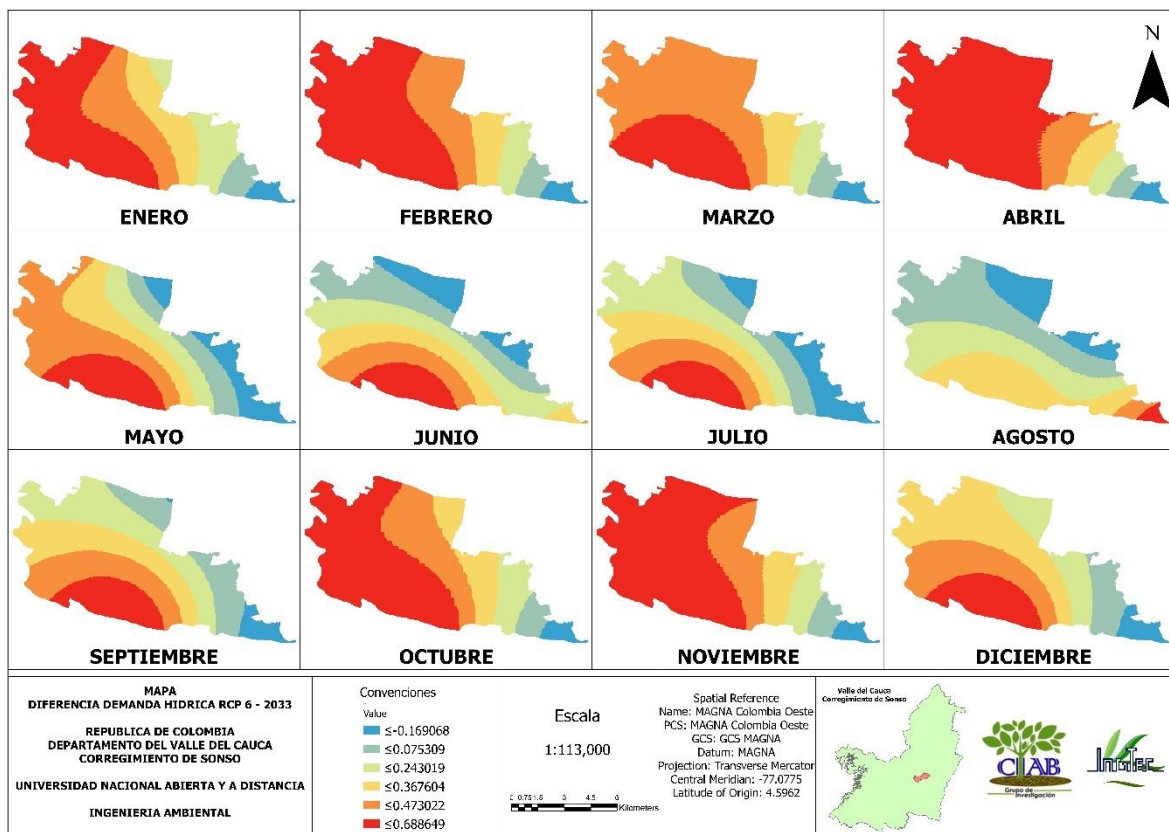
Figura 11*Diferencia demanda 6.0 – 2028.*

Nota. Diferencia demanda 6.0 – 2028. Fuente: Elaboración propia.

Avanzando al año 2033, las variaciones se intensifican, especialmente en marzo, con diferencias entre -0.56 y 0.16 m^3/s , indicando una mayor heterogeneidad en las necesidades hídricas. Mayo se destaca con valores entre 0.27 y 0.86 m^3/s , revelando la coexistencia de áreas con demanda nula y otras con requerimientos más pronunciados. El mes crítico sigue siendo junio, con valores entre 0.77 y 1.11 m^3/s , donde se manifiestan demandas significativas.

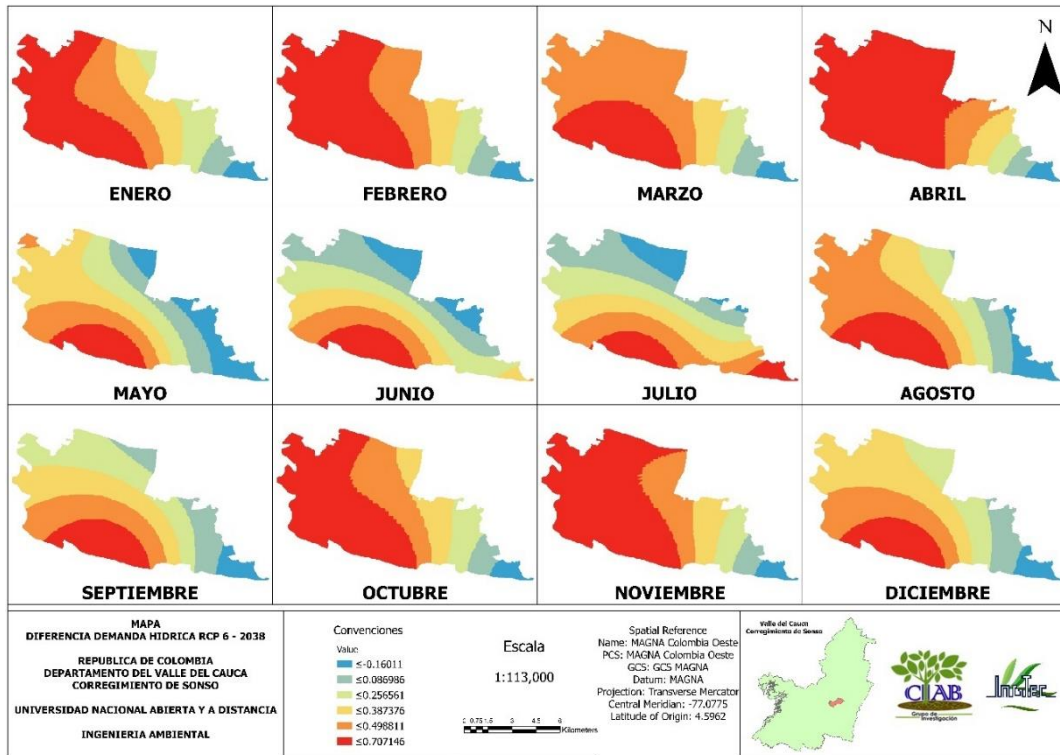
Figura 12

Diferencia demanda 6.0 – 2033.



Nota. Diferencia demanda 6.0 – 2033. Fuente: Elaboración propia.

Para el año 2038, enero muestra variaciones entre -0.16 y 0.70 m^3/s , manteniendo la tendencia de diversidad en las necesidades hídricas. Junio continúa siendo crítico, con valores entre 0.75 y 1.08 m^3/s , evidenciando áreas con demandas considerables. Destaca julio, con variaciones entre 0.95 y 1.73 m^3/s , indicando un aumento en las demandas en comparación con años anteriores, señalando la complejidad de la gestión hídrica en un contexto de cambio climático bajo el RCP 6.0.

Figura 13*Diferencia demanda 6.0 – 2038.*

Nota. Diferencia demanda 6.0 – 2038. Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, estos análisis sugieren que a medida que avanzamos en el tiempo bajo el RCP 6.0, la variabilidad en las demandas hídricas aumenta, con meses críticos que experimentan aumentos notables. La coexistencia de áreas con demanda nula y otras con requerimientos significativos resalta la necesidad de estrategias adaptativas y diferenciadas para asegurar la sostenibilidad del cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso. La moderada mitigación de emisiones en este escenario subraya la importancia de la adaptación continua en la gestión de recursos hídricos.

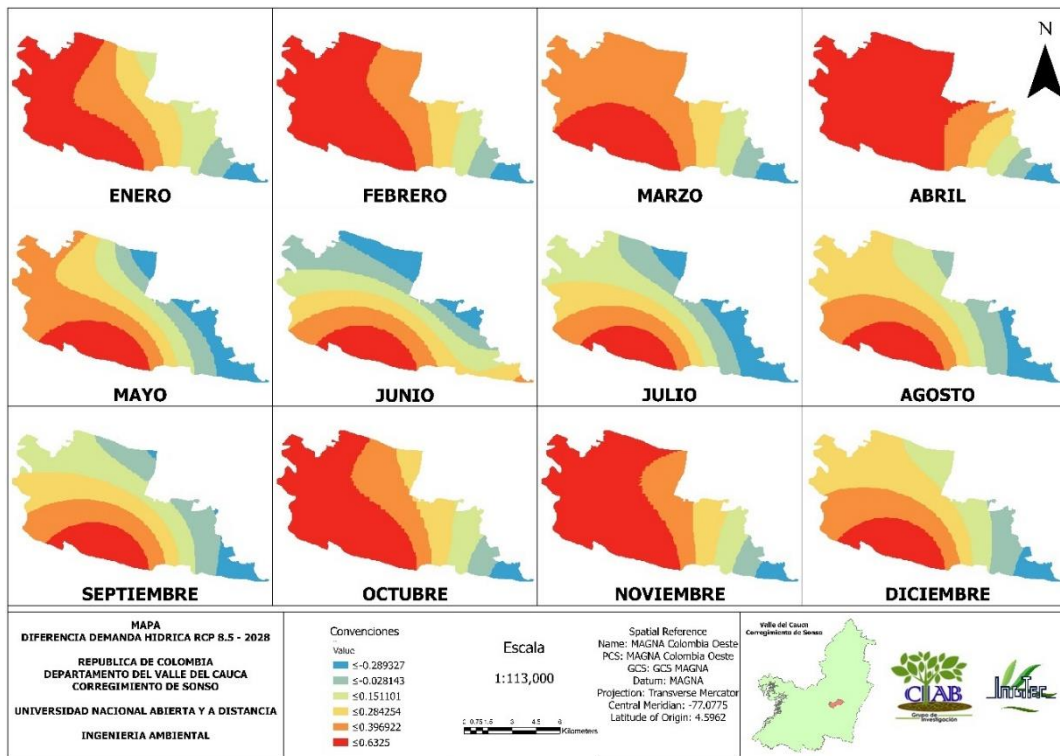
RCP 8.5

El RCP 8.5 proyecta un escenario climático en el cual las concentraciones de gases de efecto invernadero continúan aumentando sin intervenciones significativas para mitigar esas emisiones. Este escenario representa una trayectoria de altas emisiones y no implementa medidas extensas para limitar el cambio climático. Según diversas fuentes climáticas, como las evaluaciones del IPCC, el RCP 8.5 sugiere un futuro con un aumento considerable en las temperaturas globales, llevando a impactos significativos en el clima y el medio ambiente (IPCC 2023).

En el año 2028, los primeros meses presentan fluctuaciones moderadas, con enero mostrando diferencias entre -0.19 y 0.65 m³/s. Sin embargo, a medida que avanzamos hacia junio, se observa un aumento considerable, con valores entre 0.26 y 0.58 m³/s. Esto sugiere un cambio en la demanda hídrica, particularmente durante la temporada de crecimiento, lo que podría influir en la planificación agrícola.

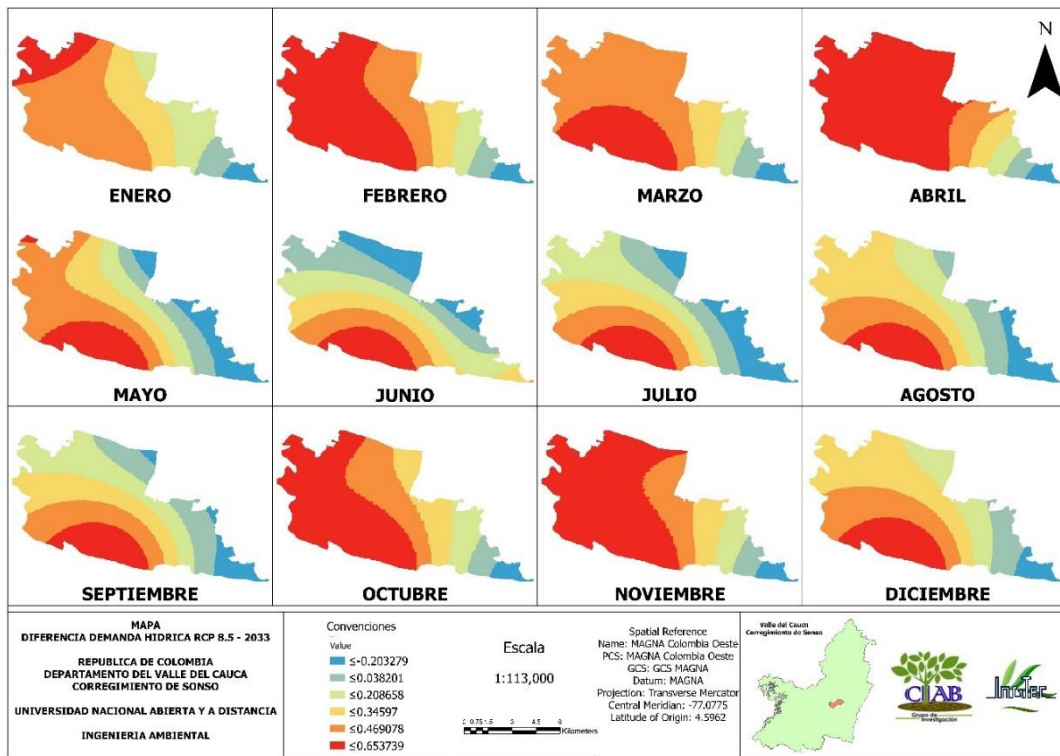
Figura 14

Diferencia demanda 8.5 – 2028.



Nota. Diferencia demanda 8.5 – 2028. Fuente: Elaboración propia.

En 2033, el análisis revela una amplificación de las variaciones, especialmente en mayo, con diferencias entre 0.17 y 0.73 m³/s. Este aumento en la variabilidad podría indicar desafíos adicionales en la gestión del agua, con zonas que experimentan necesidades significativamente diferentes. La coexistencia de áreas con demanda nula y otras con requerimientos más elevados destaca la complejidad en la adaptación a las condiciones cambiantes.

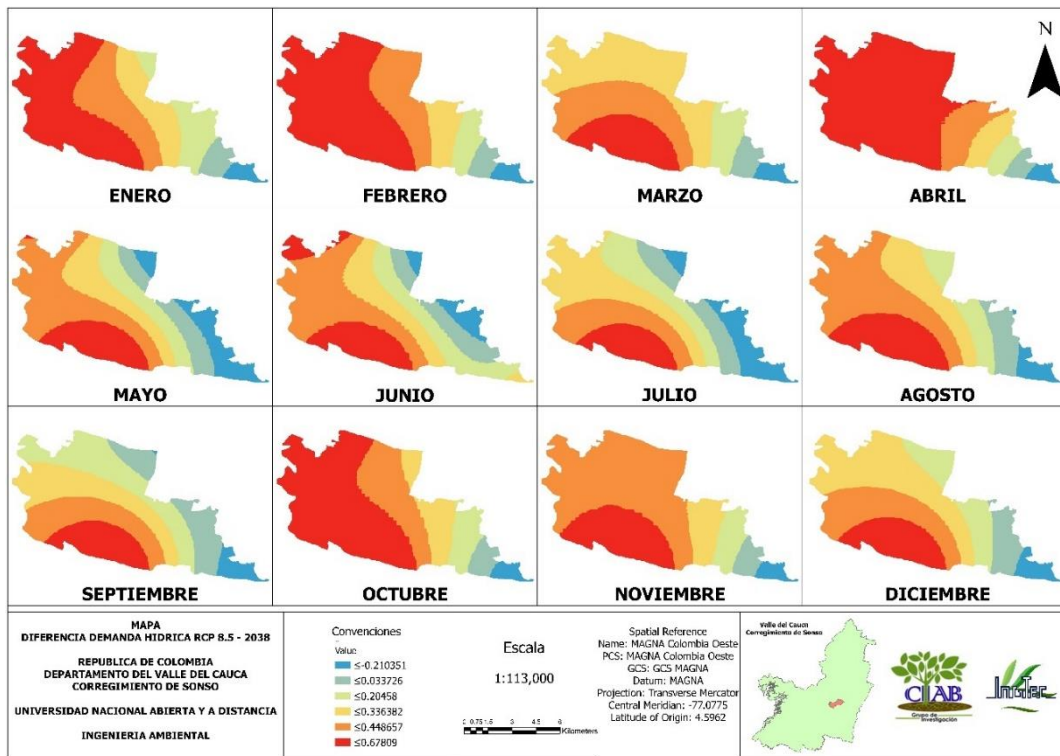
Figura 15*Diferencia demanda 8.5 – 2033.*

Nota. Diferencia demanda 8.5 – 2033. Fuente: Elaboración propia.

El año 2038, bajo el RCP 8.5, muestra una ampliación aún mayor en la variabilidad de la demanda. En julio, por ejemplo, las diferencias varían entre 0.54 y 1.30 m³/s, subrayando la presencia de áreas con demandas significativamente más altas en comparación con años anteriores. Esto podría indicar un escenario donde la gestión del agua se vuelve más desafiante, requiriendo estrategias adaptativas específicas para enfrentar condiciones extremas.

Figura 16

Diferencia demanda 8.5 – 2038.



Nota. Diferencia demanda 8.5 – 2038. Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, el RCP 8.5 proyecta un futuro donde las emisiones continúan sin restricciones significativas, impactando directamente en las demandas hídricas. La variabilidad aumentada, especialmente durante los meses críticos de crecimiento de los cultivos y aunque en los otros RCP de análisis se presentaron diferencias significativas frente a la demanda inicial, es en este escenario donde todas las diferencias son en tendencia a bajas – altas, resaltando de esta manera la necesidad de proponer de manera urgente estrategias de gestión del recurso hídrico que sean adaptables y consideren la

heterogeneidad de las condiciones en la cuenca del río Sonso en la zona de cultivo de caña de azúcar.

Objetivo 3:

Basado en los análisis realizados en el objetivo anterior, donde se proyectaron diferentes escenarios de cambio climático y se evaluaron sus impactos en la demanda hídrica del cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso, es fundamental desarrollar estrategias eficaces para la gestión sostenible del recurso hídrico. Estas estrategias deben estar orientadas a garantizar la viabilidad económica del cultivo, al tiempo que se protege el medio ambiente y se promueve un uso eficiente y equitativo del agua.

Estrategias Propuestas.

Los escenarios más severos, como el RCP 6.0 y especialmente el RCP 8.5, se proyectan aumentos significativos en la demanda hídrica, con variaciones más pronunciadas durante los meses de noviembre a enero que son las épocas de crecimiento del cultivo en la zona de estudio. Ante estos escenarios, se proponen las siguientes estrategias prioritarias:

Implementación de prácticas de riego eficientes y adaptativas

Una de las estrategias clave consiste en la implementación de prácticas de riego eficientes y adaptativas, como la instalación de sistemas de riego por goteo o microaspersión en áreas con mayor demanda hídrica proyectada, lo que permitirá un suministro preciso y localizado del agua. Además, se debe considerar la utilización de sensores de humedad del suelo y sistemas de control automatizados para ajustar la cantidad y frecuencia del riego según las necesidades reales del cultivo, minimizando las pérdidas por evaporación y escorrentía (Rodríguez-Díaz et al., 2012). Asimismo, es crucial capacitar

a los agricultores en técnicas de programación y manejo adecuado de los sistemas de riego para optimizar la eficiencia del uso del agua.

Gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca

Una estrategia fundamental es la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del río Sonso, lo que implica una coordinación efectiva entre los diferentes actores involucrados, como los productores de caña de azúcar, las autoridades ambientales, las organizaciones comunitarias y los gestores de recursos hídricos. Esta gestión integrada permitiría establecer una asignación equitativa del agua, considerando no solo las necesidades del cultivo de caña de azúcar sino también otros usos y necesidades ambientales (Salmoral et al., 2019). Acciones concretas incluyen la creación de una mesa de diálogo y coordinación entre los diferentes actores, el desarrollo de un plan de gestión integrada del agua en la cuenca, y la implementación de mecanismos de asignación equitativa del agua y resolución de conflictos por su uso.

Implementación de sistemas de monitoreo y alerta temprana

Además, es esencial promover la implementación de sistemas de monitoreo y alerta temprana para la gestión del riesgo climático. Esto implica la instalación de estaciones meteorológicas y de monitoreo de caudales en puntos estratégicos de la cuenca, el desarrollo de modelos hidrológicos y climáticos para la predicción de eventos extremos, y el establecimiento de un sistema de alertas tempranas que permita a los productores tomar medidas preventivas y adaptativas ante posibles déficits o excesos de agua (Kogan et al., 2019).

Para los demás escenarios de cambio climático que se evaluaron en el objetivo anterior, se proponen las siguientes estrategias

Adopción de técnicas de agricultura de conservación

El cultivo de caña de azúcar presenta características que lo hacen susceptible a problemas de erosión del suelo y pérdida de humedad (Airedo & Cavero, 2019; Romero et al., 2009). Por un lado, requiere largos períodos sin cobertura vegetal entre cosechas, dejando el suelo expuesto a la erosión por viento y agua (Panachuki et al., 2011). Además, al manejar el cultivo en cepas, se remueve la parte aérea después de cada cosecha, aumentando el riesgo de erosión y pérdida de humedad (Cheesman, 2004). En este contexto, la adopción de técnicas de agricultura de conservación como la labranza mínima o siembra directa puede ser muy beneficiosa, ya que evita la remoción excesiva del suelo y mantiene los residuos vegetales en la superficie, protegiéndolo contra la erosión y conservando mejor la humedad (Lamers et al., 2015).

Adicionalmente, la rotación de cultivos con especies de cobertura vegetal como leguminosas puede ser una excelente opción (Meier et al., 2021; Ramos et al., 2018). Estas leguminosas aportan nitrógeno al suelo y producen una densa cobertura que protege el suelo de la erosión, mejora su estructura y aumenta la infiltración de agua durante los períodos de lluvia. Asimismo, el establecimiento de franjas de vegetación nativa o cultivos de cobertura en los bordes de los campos de caña de azúcar puede ser muy útil para controlar la escorrentía y la erosión en estas áreas más susceptibles, actuando como barreras vivas que disminuyen la velocidad del agua y atrapan los sedimentos, evitando así la pérdida de suelo fértil y conservando mejor la humedad en los campos del cultivo (Panachuki et al., 2011).

Desarrollo de variedades de caña de azúcar resistentes al cambio climático

Por último, es fundamental fomentar la investigación y el desarrollo de nuevas variedades de caña de azúcar más resistentes a las condiciones climáticas cambiantes. Acciones clave incluyen la inversión en programas de mejoramiento genético para obtener variedades con mayor tolerancia a la sequía, altas temperaturas y otros estreses ambientales, el establecimiento de ensayos de campo para evaluar su rendimiento y eficiencia en el uso del agua, y la capacitación a los productores en el manejo y cultivo de estas nuevas variedades resistentes (Lakshmanan et al., 2005). Esto no solo contribuiría a mantener la productividad del cultivo, sino también a reducir su huella hídrica y mejorar la eficiencia en el uso del agua.

En resumen, las estrategias propuestas para la gestión del recurso hídrico en el cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso incluyen la implementación de prácticas de riego eficientes y adaptativas, la adopción de técnicas de agricultura de conservación, la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca, el establecimiento de sistemas de monitoreo y alerta temprana, y el desarrollo de variedades de caña de azúcar resistentes al cambio climático. Estas estrategias, implementadas de manera coordinada y basadas en un enfoque de sostenibilidad, permitirán enfrentar los desafíos planteados por los escenarios de cambio climático proyectados, garantizando la viabilidad económica del cultivo, protegiendo el medio ambiente y promoviendo un uso eficiente y equitativo del recurso hídrico en la cuenca del río Sonso.

Conclusiones

El presente trabajo de investigación analizó los efectos del cambio climático en la demanda hídrica del cultivo de caña de azúcar y su relación con los conflictos ambientales en la cuenca del río Sonso. A través de un enfoque integral que combinó el uso de herramientas tecnológicas, modelos climáticos y perspectivas desde la ingeniería ambiental, se obtuvieron importantes hallazgos y se propusieron estrategias para una gestión sostenible del recurso hídrico en la región.

En primer lugar, se determinó la demanda hídrica actual del cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso, utilizando datos climáticos recopilados de diversas fuentes y aplicando software especializado como LocClim y Cropwat. Este análisis reveló una variabilidad espacial y temporal significativa en la demanda de agua, con picos más pronunciados durante los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre.

Posteriormente, se proyectaron escenarios de cambio climático para diferentes horizontes de tiempo, empleando modelos climáticos y datos históricos. Los resultados obtenidos bajo los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 mostraron una tendencia general hacia un aumento en la variabilidad de la demanda hídrica, con áreas que experimentarían aumentos significativos en sus necesidades de agua, mientras que otras podrían ver disminuciones. Esta heterogeneidad en las proyecciones destaca la importancia de adoptar estrategias adaptativas y diferenciadas para la gestión del recurso hídrico en la cuenca.

Con base en estos hallazgos, se propusieron estrategias integrales para la gestión del recurso hídrico en el cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso. Estas estrategias incluyen la implementación de prácticas de riego eficientes y adaptativas, como sistemas de

riego por goteo o micro-aspersión, y el uso de sensores de humedad del suelo y control automatizado. Además, se sugirió la adopción de técnicas de agricultura de conservación, como la labranza mínima, la rotación de cultivos y el uso de coberturas vegetales, para mejorar la retención de humedad en el suelo y reducir la erosión.

Otra estrategia clave es la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca, lo que implica una coordinación efectiva entre todos los actores involucrados, como productores, autoridades ambientales, comunidades locales y gestores del agua. Esto permitiría establecer una asignación equitativa del recurso hídrico, considerando no solo las necesidades del cultivo de caña de azúcar, sino también otros usos y la conservación de los ecosistemas acuáticos.

Adicionalmente, se resaltó la importancia de implementar sistemas de monitoreo y alerta temprana para la gestión del riesgo climático, lo que permitiría anticipar y mitigar los impactos de eventos extremos como sequías o inundaciones. Finalmente, se enfatizó la necesidad de fomentar la investigación y el desarrollo de nuevas variedades de caña de azúcar más resistentes a las condiciones climáticas cambiantes, a través de programas de mejoramiento genético y ensayos de campo.

En conclusión, este estudio brinda una comprensión integral de los desafíos que enfrenta el cultivo de caña de azúcar en la cuenca del río Sonso ante el cambio climático y sus implicaciones en la demanda hídrica. Las estrategias propuestas, implementadas de manera coordinada y con un enfoque sostenible, permitirán garantizar la viabilidad económica del cultivo, proteger el medio ambiente y promover un uso eficiente y equitativo del recurso hídrico en la región, contribuyendo así a la sostenibilidad de la agroindustria de la caña de azúcar en el contexto del cambio climático.

Referencias Bibliográficas

- Airedo, D., & Cavero, J. (2019). La técnica de siembra directa en el cultivo de la caña de azúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(11), 811-817.
<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n11p811-817>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Rome: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
<https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Aparicio, F. 1982. Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa, México.
- Asocaña. (2017). Caña de azúcar, el gran motor de la economía en el Valle del Cauca. Asocaña. <https://www.asocana.org/modules/documentos/14167.asp>
- Azarte, D. A., Villanueva, W. F., Rodriguez, A. L., & Mario Rorher. (2019). Escenarios futuros de cambio climático desde modelos globales para localidades de los Andes centrales. *Anales Científicos*, 80(2), 476-494. DOI:
<http://dx.doi.org/10.21704/ac.v80i2.1482>
- Banco Mundial. (2022, abril 01). Agricultura y alimentos. Banco Mundial.
<https://www.bancomundial.org/es/topic/agriculture/overview>
- Bao, Y., Song, Z., & Qiao, F. (2020, 05 5). FIO-ESM Version 2.0: Model Description and Evaluation. *Advancing Earth and Space Science*, (6), 125.
<https://doi.org/10.1029/2019JC016036>
- Ben-Daoud, M., Mahradi, B. el, Elhassnaoui, I., Moumen, A., Sayad, A., ELbouhadioui, M., Moroşanu, G. A., Mezouary, L. el, Essahlaoui, A., & Eljaafari, S. (2021). Integrated water resources management: An indicator framework for water management

- system assessment in the R'Dom Sub-basin, Morocco. *Environmental Challenges*, 3(January), 100062. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100062>
- Bustamante, W. O., Ibarra, E. S., Covarrubias, M. Í., & Martínez, M. M. (2011, 02). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*, 45(1).
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000100001
- Carbonell González, J., Amaya Estévez, A., Ortiz Uribe, B. V., Torres Aguas, J. S., Quintero Durán, R., & Isaacs Echeverry, C. H. (2001). Zonificación agroecológica para el cultivo de caña de azúcar en el Valle del Río Cauca: tercera aproximación (No. Doc. 16405/2001) CO-BAC, Bogotá).
- Centro de Investigación de la caña de azúcar de Colombia. (2018). CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR agua. CENICANA.
https://www.cenicana.org/pdf_privado/historieta/uso_agua.pdf
- Cheesman, O. D. (2004). *Environmental impacts of sugar production*. CABI Publishing.
- Chivelet, J. (2019). *Memorias de un clima cambiante*.
- Claro, F. A. (1991). *Balance Hídrico*. Santa fe de Bogotá.
- Colinas-León, R., Velázquez-García, J. J., & Etchevers-Barra, J. D. (2022). Agricultura de Conservación: efectos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 8(25), 1-18.
- Coll, F. (2021, August 1). *Agricultura - Qué es, definición y concepto* | 2023. Economipedia. <https://economipedia.com/definiciones/agricultura.html>

Corporación Autónoma Regional Del Valle Del Cauca – CVC, 2015. Plan de Gestión Ambiental Regional – PGAR 2015-2036.

Fajardo Vázquez, M., & Quilli Quezada, L. A. (2019). Modelos climáticos como herramienta para la evaluación de riesgos ambientales y la toma de decisiones en la ingeniería ambiental. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(2), 177-188.

FAO. (2011). Gestión integrada de los recursos hídricos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

FAO. (Sin fecha). *LocClim: Software for the estimation of climate data*. Recuperado de <https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1032167/>

García Villanueva, D., Rodríguez Hernández, A., & López García, C. (2017). Técnicas de manejo y conservación del agua en la agricultura. *Revista de Agricultura*, 8(1), 45-56.

García Villanueva, J., Huahuachampi, J., & Soto, L. (2017). Determinación de la demanda hídrica del cultivo de quinua QML01 (*Chenopodium Quinoa Willd*) en la Molina. *Anales Científicos*, 78(2), 200-209. <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v78i2.1057>

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (1997, 02). Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC [Documento técnico II del IPCC]. <https://archive.ipcc.ch/pdf/technical-papers/paper-II-sp.pdf>

Hawkins, E., & Sutton, R. (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8), 1095-1107.

- Hawkins, E., & Sutton, R. (2009). The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8), 1095–1107.
- IDEAM. (Sin Fecha). *Características Climatológicas de Ciudades*.
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>
- ILRI. (2010). *Generador de archivos meteorológicos MarkSim® GCM - DSSAT*. Cgiar.org.
<http://gisweb.ciat.cgiar.org/MarkSimGCM/>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). CAPÍTULO 5 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA Autores MARÍA CARMENZA GONZÁLEZ GABRIEL DE JESÚS SALDARRIAGA OMAR JARAMILLO Conceptualización y dimensionamiento de la demanda hídrica sectorial. Estudio Nacional del Agua (p. 60). IDEAM.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- James, L., & Alzate, D. (2021, November 3). La caña de azúcar, una agroindustria que impulsa al Valle del Cauca. El País Cali. <https://www.elpais.com.co/contenido/la-cana-de-azucar-una-agroindustria-que-impulsa-al-valle-del-cauca.html>

Jaramillo Robledo, Á. (2005). La Precipitación. Clima Andino y café en Colombia (pp. 88-106). CENICAFÉ.

<https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/859/11/9.%20Precipitaci%c3%b3n.pdf>

Jones, P. G. and Thornton, P. K. (2013) Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications. *Agric. Systems*. 114 (2013) 1-5

Knutti, R., et al. (2010). Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. *Journal of Climate*, 23(10), 2739–2758.

Knutti, R., Furrer, R., Tebaldi, C., Cermak, J., & Meehl, G. A. (2010). Challenges in combining projections from multiple climate models. *Journal of Climate*, 23(10), 2739-2758.

Kogan, F., Alhassane, A., Saleh, N., Gobron, N. y Gessner, U. (2019). Monitoreo de cultivos con datos NOAA-AVHRR y Terra/Aqua MODIS. *Teledetección para Agricultura, Ecosistemas e Hidrología XXI*, 11149, 111490C.

Lakshmanan, P., Geijskes, RJ, Aitken, KS, Grof, CL, Bonnett, GD y Smith, GR (2005). Revisión invitada: Biotecnología de la caña de azúcar: los desafíos y oportunidades. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 41(4), 345-363.

Lamers, M., Anyar, W., Stuart, R., Oenema, O., & Sunarto. (2015). Tillage systems for better soil structure and surface drainage in sugarcane cultivation in Indonesia. *Soil and Tillage Research*, 153, 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.04.011>

Los escenarios climáticos nos permiten asomarnos al futuro. (2022, February 23).

Asamblea Ciudadana para el Clima.

<https://asambleaciudadanadelcambioclimatico.es/los-escenarios-climaticos-nos-permiten-asomarnos-al-futuro/>

Lu, W., Xiao, Q., Wu, W., & Zhang, H. (2021). Evaluación de la vulnerabilidad climática urbana y la planificación de la adaptación basada en los modelos climáticos. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126685

Magaña, V., Conde, C., Sánchez, Ó., & Gay, C. (1996). 9 EVALUACIÓN DE ESCENARIOS REGIONALES DE CLIMA ACTUAL Y DE CAMBIOCLIMÁTICO FUTURO PARA MÉXICO.

https://www.academia.edu/53008874/Evaluaci%C3%B3n_De_Escenarios_Regionales_De_Clima_Actual_y_De_Cambio_Clim%C3%A1tico_Futuro_Para_M%C3%A9xico#:~:text=Para%20regionalizar%20los%20escenarios%20de%20cambio%20clim%C3%A1tico%20global,esto%20se%20hace%20mediante

Meier, E. A., Thorburn, P. J., Wegener, M. K., & Basford, K. E. (2021). Nutrient management and crop residue retention in sugarcane production systems: A review. *Soil Research*, 59(1), 1-22. <https://doi.org/10.1071/SR20049>

Monterroso-Rivas, A. I., & Gomez-Díaz, J. D. (2021). Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *Terra Latinoamerica*, 39(e774), 1-19. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.774>

Monterroso-Rivas, A., & Gómez-Díaz, J. D. (2021). Impact of climate change on water resources for agriculture. *Agricultural Water Management*, 243, 106427.

Muñoz, S., Maza, M. T., López, F., & Melgarejo, J. (2019). Gestión integral de los recursos hídricos: un enfoque para la sostenibilidad en la agricultura. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 118(2), 163-173.

- Novara, A., Gristina, L., Guaitoli, F., Santoro, A. y Cerdà, A. (2019). Manejo de nitrato del suelo con cultivos de cobertura y franjas de protección en viñedos sicilianos. *Discusiones sobre Tierra Sólida*, 1-29.
- Odum, E. P. (1984). *Properties of Agroecosystems*. En: R. Lowrance, B. R. Stinner y G. J. House (eds.), *Agricultural Ecosystems. Unifying Concepts*. Nueva York: Wiley.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO. (n.d.). La importancia de la agricultura en la actualidad. La importancia de la agricultura en la actualidad. <https://www.fao.org/3/a0015s/a0015s04.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (n.d.). Necesidades de agua de riego. AQUASTAT - Sistema mundial de información de la FAO sobre el agua en la agricultura. <https://www.fao.org/aquastat/es/data-analysis/irrig-water-use/irrig-water-requirement>
- Panachuki, E., Sobrinho, T. A., Oliveira, P. T. S., Rodrigues, D. B. B., & Ceddia, M. B. (2011). Soil erosion and its mitigation in Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(3), 675-690. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300004>
- Perfetti, J. J., Hernández, A., Leibovich, J., & Balcázar, Á. (2013). Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia.
- Qiao, F., Song, Z., Bao, Y., Song, Y., Shu, Q., Huang, C., & Zhao, W. (2013, 06 25). Development and evaluation of an Earth System Model with surface gravity waves. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: OCEANS*, 118(4514-4524), 4514-4525. 10.1002/jgrc.20327
- Qiao, F., Song, Z., Bao, Y., Yajuan, S., Shu, Q., Huang, C., & Zhao, W. (2013, 8 8). Development and evaluation of an Earth System Model with surface gravity waves.

Advancing Earth and Space Science, 118(9), 4415-4524.

<https://doi.org/10.1002/jgrc.20327>

Qiao, Z., Zhou, H., & Wang, J. (2013). Modelos climáticos: un resumen y su aplicación en la ingeniería. *Revista internacional de gestión ambiental y desarrollo sostenible*, 2(2), 180-187.

Ramos, D. P., de Oliveira, A. F., da Costa Ceddia, M. B., de Almeida, C. O. R., & Cavallari, L. L. (2018). Soil physical properties under different management systems in sugarcane fields. *Revista Caatinga*, 31(1), 116-127.

<http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252018v31n114rc>

Reckmann, O. (n.d.). DEMANDA DE AGUA POR PARTE DE LOS CULTIVOS. In *Nodo Tecnológico de Riego en el Secano, Fase II* (pp. 51-71). Boletín INIA.

<https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/7272/NR36473.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

Restrepo, S., & Bedoya, D. El uso del agua en el cultivo de caña de azúcar. Una mirada desde la huella hídrica. Santiago de Cali [Internet]. Universidad del Valle. 2015; 165 p.

Rincón, C. Á., & Becerra, C. J. (2020). Respuesta agronómica de cuatro variedades de caña de azúcar en los Llanos Orientales de Colombia. *Acta Agronómica*, 69(2), 124-129. doi: <https://doi.org/10.15446/acag.v69n2.70649>

Rodriguez Roa, A. O. (2012). EVALUACIÓN DE LAS SIMULACIONES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBALES DEL PROYECTO CMIP5 CON EL CLIMA PRESENTE EN

- COLOMBIA. (IDEAM–METEO/147-2012 ed.). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM Subdirección de Meteorología.
- Rodríguez-Díaz, JA, Caparrini, N., Cid, E., Amin, O. y Knox, JW (2012). Benchmarking de sistemas de microirrigación en Chile. *Ingeniería de biosistemas*, 113 (2), 145-157.
- Romero, E.R., Scandalariis, J., Crespo, D., Murillo, N., Gobbee, E., & Fernández, C. (2009). Prácticas de conservación de suelos para la sustentabilidad de la agricultura actual. *Agricultural Sciences*, 26(2), 97-114.
- Sáenz, C. A. (2014, February 14). | Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. | Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
<https://inta.gob.ar/documentos/conocer-el-balance-hidrico-como-herramienta-para-optimizar-el-uso-del-agua>
- Salmoral, G., Amerasinghe, P., Loures, L., Sagardoy, JA y Van der Valk, M. (2019). Gestión Integrada de Recursos Hídricos: Herramientas relevantes para la adaptación al cambio climático. *Fronteras en las ciencias ambientales*, 7, 34.
- Sarandón, S. J. (2020). El papel de la agricultura en la transformación social-ecológica de América Latina. *Cuadernos de la Transformación*, 11.
- Song, Y., Zhao, Y., Yin, X., Bao, Y., & Qiao, F. (2020, 03 24). Evaluation of FIO-ESM v1.0 Seasonal Prediction Skills Over the North Pacific. *frontiers in Marine Science*, 8(504), 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00504>
- The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023
- Tojo Soler, C. M., Sentelhas, P. C., & Hoogenboom, G. (2007, 10). Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for

maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal of Agronomy*, 27(2-4), 165-177. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.03.002>

Torres Aguas, j. Riego en: CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali, CENICAÑA, 1995. P. 193-210

Universidad el Bosque. (2016, 5 2). Balance hídrico climático. Colombia.

<https://www.studocu.com/co/document/universidad-el-bosque/meteorologia-y-clima/balance-hidrico-climatico/5894142>

Van Vuuren, D. P., et al. (2011). The Representative Concentration Pathways: An Overview. *Climatic Change*, 109(1-2), 5–31.

Vargas, K. (2016, March 7). La agricultura colombiana en el contexto de la globalización • Periódico El Campesino – La voz del campo colombiano. Periódico El Campesino.

<https://elcampesino.co/la-agricultura-colombiana-en-el-contexto-de-la-globalizacion/>

Apéndices

Los apéndices pueden ser compartidos a solicitud al autor de este trabajo al correo:

lfprietol@unadvirtual.edu.co Los apéndices hacen referencia a la colección completa de capas en formato tipo SHP que proporcionan un mapeo espacial detallado de este estudio, los datos correspondientes a las estaciones seleccionadas, datos de las descargas de los modelos utilizados en la plataforma Marksim.