



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, \_\_\_\_\_

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Luis Ivan Cuellar Vargas, con C.C. No. 1094963751 \_\_\_\_\_,

Sergio Mauricio López Cruz, con C.C. No. 1083915406 \_\_\_\_\_,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o \_\_\_\_\_

Titulado: Evaluación Del Impacto De Los Escenarios De Variabilidad Climática (Enos)  
En El Cultivo De Café (Coffea Arabica) En El Departamento Del Huila, Colombia

presentado y aprobado en el año 2022 \_\_\_\_\_ como requisito para optar al título de

Ingeniero Agrícola;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
GESTIÓN DE BIBLIOTECAS**



**CARTA DE AUTORIZACIÓN**

**CÓDIGO**

**AP-BIB-FO-06**

**VERSIÓN**

**1**

**VIGENCIA**

**2014**

**PÁGINA**

**2 de 2**

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE: Luis Ivan Cuellar Vargas

Firma:

EL AUTOR/ESTUDIANTE: Sergio Mauricio López Cruz

Firma:

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:** Evaluación Del Impacto De Los Escenarios De Variabilidad Climática (Enos) En El Cultivo De Café (Coffea Arabica) En El Departamento Del Huila, Colombia.

**AUTOR O AUTORES:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Cuellar Vargas	Luis Ivan
López Cruz	Sergio Mauricio

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Romero Cuellar	Jonathan

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero Agrícola

**FACULTAD:** Ingeniería

**PROGRAMA O POSGRADO:** Ingeniería Agrícola

**CIUDAD:** Pitalito

**AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2022

**NÚMERO DE PÁGINAS:** 33

**TIPO DE ILUSTRACIONES** (Marcar con una X):

Diagramas \_\_\_ Fotografías \_\_\_ Grabaciones en discos \_\_\_ Ilustraciones en general \_\_\_ Grabados \_\_\_  
Láminas \_\_\_ Litografías \_\_\_ Mapas \_\_\_ Música impresa \_\_\_ Planos \_\_\_ Retratos \_\_\_ Sin ilustraciones \_\_\_ Tablas  
o Cuadros \_\_\_ X \_\_\_

**SOFTWARE** requerido y/o especializado para la lectura del documento: Word; Pdf



**MATERIAL ANEXO:**

**PREMIO O DISTINCIÓN** (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

**PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:**

Español

Inglés

- |                           |                     |
|---------------------------|---------------------|
| 1. Variabilidad Climática | Climate variability |
| 2. ENOS                   | ENSO                |
| 3. Balance Hídrico        | Water balance       |

**RESUMEN DEL CONTENIDO:** (Máximo 250 palabras)

La investigación se realizó mediante la implementación del modelo de balance hídrico agroclimático de Thornthwaite y Mather ajustado para las condiciones agroclimáticas de la zona cafetera del departamento, en cultivos de café a libre exposición solar, ubicados en la zona de influencia de 11 estaciones hidroclimáticas en los municipios de Pitalito, Acevedo, La Plata, Gigante, Colombia, Tello, Santa María, La Argentina, Oporapa, San Agustín y Palestina. Se empleó información agronómica propia de cada uno de los municipios e información hidroclimática a nivel diaria (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima), la cual fue procesada y analizada a nivel decadiario (cada 10 días). La información climática fue recolectada del Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y complementada con las bases de datos de la National Aeronautics and Space Administration (NASA). Las series de tiempo analizadas tiene una duración de 39 años (1980 – 2019). Diferentes técnicas estadísticas y matemáticas fueron aplicadas considerando los diferentes modos de variabilidad climática, con énfasis en la ocurrencia de la variabilidad climática extrema (efecto del fenómeno El Niño – La Niña) propuesto por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y las diferentes variables climáticas que influyen en el rendimiento de este cultivo. Se obtuvieron como resultados, el análisis de precipitación, déficit y exceso hídrico del suelo e índice hídrico, durante los años máximos de ocurrencia del ENOS de los últimos 22 años y el análisis de la precipitación, el índice hídrico y rendimiento del cultivo a partir del promedio histórico. Se concluye que los efectos de la variabilidad climática sobre las subregiones del sur y occidente del departamento son menores respecto a las subregiones del centro y norte, además, se evidencia un decaimiento significativo en el índice hídrico a partir del decadal 2 de junio hasta el decadal 2 de octubre, con algunas variaciones, en cada una de las cuatro subregiones y durante todos los escenarios. Los resultados del estudio pretenden acceder a una mejor comprensión de los efectos de la variabilidad climática a nivel decadiario en el departamento del Huila, con énfasis en los máximos históricos, los cuales juegan un papel fundamental tanto en el ciclo biológico del cultivo de café como en el ciclo del agua.



**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)

The research was carried out by implementing the Thornthwaite and Mather agroclimatic water balance model adjusted to the agroclimatic conditions of the coffee-growing area of the department, in coffee crops with free solar exposure, located in the area of influence of 11 hydroclimatic stations in the municipalities of Pitalito, Acevedo, La Plata, Gigante, Colombia, Tello, Santa María, La Argentina, Oporapa, San Agustín and Palestina. Agronomic information from each municipalities and daily hydro-climatic information (precipitation, maximum and minimum temperature) was used, which was processed and analysed at decadal level (every 10 days). Climate data was collected from the National Coffee Research Centre (CENICAFE), the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM) and supplemented with databases from the National Aeronautics and Space Administration (NASA). The time series analysed has a duration of 39 years (1980 - 2019). Different statistical and mathematical techniques were applied considering the different modes of climate variability, with emphasis on the occurrence of extreme climate variability (El Niño - La Niña effect) proposed by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and the different climatic variables that influence the yield of this crop. The results were obtained from the analysis of precipitation, soil water deficit and excess and water index during the maximum years of ENSO occurrence in the last 22 years, and the analysis of precipitation, water index and crop yield from the historical average. It is concluded that the effects of climate variability on the sub-regions of the south and west of the department are lower than in the sub-regions of the centre and north, in addition, a significant decay in the water index is evident from decadal 2 June to decadal 2 October, with some variations, in each of the four sub-regions and during all scenarios. The results of the study aim to access a better understanding of the effects of climate variability at the decadal level in the department of Huila, with emphasis on historical maxima, which play a fundamental role in both the biological cycle of coffee cultivation and the water cycle.

**APROBACION DE LA TESIS**

Nombre Jurado: Jaime Izquierdo Bautista

Firma:

Nombre Jurado: Marlio Bedoya Cardoso

Firma:

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LOS ESCENARIOS DE  
VARIABILIDAD CLIMÁTICA (ENOS) EN EL CULTIVO DE CAFÉ  
(*COFFEA ARABICA*) EN EL DEPARTAMENTO DEL HUILA,  
COLOMBIA.**

Trabajo de grado presentado al departamento de Ingeniería Agrícola  
como requisito para optar al título de: Ingeniero Agrícola

Autores

Luis Ivan Cuellar Vargas: 20162152342

Sergio Mauricio López Cruz: 20162151739

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA**

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Agrícola

Sede Pitalito, Huila, Colombia. 2022

Firma

---

Director: Dr. Jonathan Romero Cuellar

Nota de aceptación

---

Firma

---

Jurado: Dr. Jaime Izquierdo Bautista

Firma

---

Jurado: Dr. Marlio Bedoya Cardozo

# **EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LOS ESCENARIOS DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA (ENOS) EN EL CULTIVO DE CAFÉ (*COFFEA ARABICA*) EN EL DEPARTAMENTO DEL HUILA, COLOMBIA.**

## **RESUMEN**

En Colombia, el Huila es el mayor productor de café a nivel nacional, con una producción de 197.370,95 ton en el 2020, sin embargo, esta productividad se puede ver afectada por diferentes fuentes de variabilidad climática, que determinan la distribución de las áreas cafeteras y su vulnerabilidad. Por lo tanto, este trabajo analiza los efectos de la variabilidad climática (ENOS) sobre las zonas cafeteras del Huila. La investigación se realizó mediante la implementación del modelo de balance hídrico agroclimático de Thornthwaite y Mather ajustado para las condiciones agroclimáticas de la zona cafetera del departamento, en cultivos de café a libre exposición solar, ubicados en la zona de influencia de 11 estaciones hidroclimáticas en los municipios de Pitalito, Acevedo, La Plata, Gigante, Colombia, Tello, Santa María, La Argentina, Oporapa, San Agustín y Palestina. Se empleó información agronómica propia de cada uno de los municipios e información hidroclimática a nivel diaria (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima), la cual fue procesada y analizada a nivel decadiario (cada 10 días). La información climática fue recolectada del Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y complementada con las bases de datos de la National Aeronautics and Space Administration (NASA). Las series de tiempo analizadas tienen una duración de 39 años (1980 – 2019). Diferentes técnicas estadísticas y matemáticas fueron aplicadas considerando los diferentes modos de variabilidad climática, con énfasis en la ocurrencia de la variabilidad climática extrema (efecto del fenómeno El Niño – La Niña) propuesto por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y las diferentes variables climáticas que influyen en el rendimiento de este cultivo. Se obtuvieron como resultados, el análisis de precipitación, déficit y exceso hídrico del suelo e índice hídrico, durante los años máximos de ocurrencia del ENOS de los últimos 22 años y el análisis de la precipitación, el índice hídrico y rendimiento del cultivo a partir del promedio histórico. Se concluye que los efectos de la variabilidad climática sobre las subregiones del sur y occidente del departamento son menores respecto a las subregiones del centro y norte, además, se evidencia un decaimiento significativo en el índice hídrico a partir del decadal 2 de junio hasta el decadal 2 de octubre, con algunas variaciones, en cada una de las cuatro subregiones y durante todos los escenarios.

Los resultados del estudio pretenden acceder a una mejor comprensión de los efectos de la variabilidad climática a nivel decadiario en el departamento del Huila, con énfasis en los máximos históricos, los cuales juegan un papel fundamental tanto en el ciclo biológico del cultivo de café como en el ciclo del agua.

**Palabras clave:** Variabilidad Climática, ENOS, Balance Hídrico

# **ASSESSMENT OF THE IMPACT OF CLIMATE VARIABILITY SCENARIOS (ENSO) ON COFFEE CULTIVATION (COFFEA ARABICA) IN THE DEPARTMENT OF HUILA, COLOMBIA.**

## **ABSTRACT**

In Colombia, Huila is the largest coffee producer at national level, with a production of 197,370.95 tons in 2020, however, this productivity can be affected by different sources of climate variability, which determine the distribution of coffee areas and their vulnerability. Therefore, this document analyses the effects of climate variability (ENSO) on the coffee-growing areas of Huila. The research was carried out by implementing the Thornthwaite and Mather agroclimatic water balance model adjusted to the agroclimatic conditions of the coffee-growing area of the department, in coffee crops with free solar exposure, located in the area of influence of 11 hydroclimatic stations in the municipalities of Pitalito, Acevedo, La Plata, Gigante, Colombia, Tello, Santa María, La Argentina, Oporapa, San Agustín and Palestina. Agronomic information from each municipalities and daily hydro-climatic information (precipitation, maximum and minimum temperature) was used, which was processed and analysed at decadal level (every 10 days). Climate data was collected from the National Coffee Research Centre (CENICAFE), the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM) and supplemented with databases from the National Aeronautics and Space Administration (NASA). The time series analysed has a duration of 39 years (1980 - 2019). Different statistical and mathematical techniques were applied considering the different modes of climate variability, with emphasis on the occurrence of extreme climate variability (El Niño - La Niña effect) proposed by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and the different climatic variables that influence the yield of this crop. The results were obtained from the analysis of precipitation, soil water deficit and excess and water index during the maximum years of ENSO occurrence in the last 22 years, and the analysis of precipitation, water index and crop yield from the historical average. It is concluded that the effects of climate variability on the sub-regions of the south and west of the department are lower than in the sub-regions of the centre and north, in addition, a significant decay in the water index is evident from decadal 2 June to decadal 2 October, with some variations, in each of the four sub-regions and during all scenarios.

The results of the study aim to access a better understanding of the effects of climate variability at the decadal level in the department of Huila, with emphasis on historical maxima, which play a fundamental role in both the biological cycle of coffee cultivation and the water cycle.

**Keywords:** *Climate variability, ENSO, Water balance*

## INTRODUCCIÓN

En Colombia, en el 53% de los municipios del país se cultiva café, el cual genera más de 900.000 empleos rurales directos y aproximadamente 2 millones entre directos e indirectos (Losada et al., 2020). Actualmente existen más de 4.570 millones de árboles de café en más de 877.000 hectáreas, y 541.000 productores. De acuerdo con información del DANE durante el 2017 la participación del café en el PIB agropecuario de Colombia fue del 12,1%, y en el PIB nacional del 0,8%. De igual forma, la actividad cafetera representa el primer renglón de exportaciones agrícolas del país, exportando aproximadamente el 92% del total de café que se produce en Colombia. Durante el 2018 se exportaron 12.751 sacos de 60 kg de café verde, lo que representó un ingreso de divisas a la economía colombiana de 2.614 millones de dólares (Losada et al., 2020).

Entendiendo la importancia del sector cafetero en la economía y la sociedad colombiana, se hace de suma importancia conocer los posibles factores que inciden en las pérdidas de productividad, en este sentido, de acuerdo con (Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), 2001) el incremento de los costos socioeconómicos relacionados con los daños ocasionados por fenómenos meteorológicos y variaciones regionales del clima indica que somos cada vez más vulnerables a los cambios climáticos.

En referencia a Colombia, algunos productos de vital importancia para la economía del país, tendrían un impacto aun mayor debido a dichos fenómenos, por ejemplo, según la (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2018), el café arábico, producto con gran importancia económica y social, se verá afectado por el aumento de temperatura y los cambios en la frecuencia e intensidad de las lluvias, dejando grandes extensiones fuera de su zona apta para el cultivo. De acuerdo con (Malyadri, 2016), la variabilidad climática siempre ha sido el principal factor responsable de las fluctuaciones de los rendimientos de café en el mundo. De igual forma (Jayakumar et al., 2017), demostró que, el área y la producción de café están aumentando, mientras que el rendimiento del café tiene una tendencia decreciente.

A nivel regional, el Huila es el departamento con mayor producción de café en Colombia, con una producción para el año 2020 de 197.370,95 ton, muy por encima de los departamentos de Antioquia y Tolima, que tuvieron una producción de 118.166,85 ton y 91.226,7 ton, respectivamente (Agronet, 2020); el cultivo está presente en 35 de los 37 municipios del departamento, lo que convierte al cultivo en el 53% de las exportaciones departamentales, generando aproximadamente 10.100 empleos directos, del cual el 74% de la población rural total hace parte (FNC, 2022); los municipios de Pitalito y Acevedo son los principales productores de café en el país y por tanto del departamento, obtuvieron un área cosechada para el año 2021 de 13.827,62 ha y 10.882,25 ha, respectivamente, sumado a esto, los municipios de la Plata y garzón están dentro de los 15 municipios de mayor producción en el país, estos últimos obtuvieron un área cosechada para el año 2021 de 9.079,39 ha y 7.506,49 ha, respectivamente (UPRA, 2021).

En concordancia con lo sustentado por (Malyadri, 2016) y de acuerdo con los estudios realizados por (Havlin et al., 1999), entre los factores climáticos y geográficos que influyen en el cultivo del café se encuentran la precipitación, la temperatura, la humedad relativa, la radiación y el brillo solar, la velocidad y la dirección del viento, la altitud y la latitud. De

igual forma (Ritchie, 1991), concluye que, estas variables determinan la disponibilidad de agua y energía, que juegan un papel relevante en la producción y son necesarias para el crecimiento y el desarrollo de la planta.

Sumado a lo anterior, investigaciones realizadas por (Bento et al., 2010) sostienen que, para el café arábica los valores óptimos de temperatura media anual del aire oscilan entre 18 y 23 °C. Por encima de los 23 °C, el desarrollo y la maduración de los frutos se aceleran, lo que a menudo conduce a una pérdida de calidad. La exposición continua a temperaturas diarias de hasta 30 °C podría resultar no solo en un crecimiento deprimido sino también en anomalías como el amarillamiento de las hojas (Damatta et al., 2006). Por otro lado, se ha demostrado que la baja humedad del suelo puede reducir el crecimiento inicial de café hasta en 50% (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2021). Sumado a lo anterior, según conclusiones de (Gay et al., 2006) y (Sachs et al., 2015), el café es muy sensible a los cambios del clima. Estos estudios estimaron un aumento de temperatura de 2 °C y pérdidas de productividad de hasta 34 % para México y 20 % para Brasil, respectivamente, para 2020.

Debido a los diferentes impactos del clima sobre el departamento, la apuesta investigativa sobre el cultivo por parte de diferentes instituciones ha hecho que la producción y el rendimiento hayan aumentado desde el año 2011, sin embargo, no se ha podido alcanzar un umbral óptimo en el rendimiento como los alcanzados en los años 2006 o 2007 (1.5 ton/ha) ; por tanto, se ha hecho necesario seguir incorporando avances en estudios científicos que ayuden al sector cafetero en la toma de decisiones respecto a la incidencia de la variabilidad climática en los efectos negativos sobre el rendimiento del cultivo y su respuesta frente a los cambios extremos.

En respuesta a la necesidad investigativa, desde mayo de 2012, la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM) y la Gobernación del Huila con apoyo de USAID, ha venido desarrollando el proyecto “*Huila: 2050: Preparándose para el cambio Climático*” con el fin de formular e implementar un Plan de Acción de Cambio Climático para esta región, que incluya medidas de adaptación y mitigación, teniendo en cuenta una visión de adaptación para el año 2050 (Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM), 2014). De la misma manera, para el año 2015 la alcaldía de Pitalito enmarcado dentro del plan Huila 2050, desarrolló el informe “*Ruta De Cambio De Pitalito 2030*”, el plan propone cinco grandes estrategias incluyendo el agua como eje central, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, la producción agropecuaria y la seguridad alimentaria, los recursos energéticos y los entornos resilientes (Alcaldía de Pitalito, 2015).

Para el año 2017, se realizó el estudio titulado “*Trend in Coffee Production and Consumption in Colombia*” (Ocampo L & Alvarez H, 2017), donde se concluye que la producción cafetera se ha afectado por la variabilidad climática, pero los impactos del cambio climático podrían ser más severos.

Así mismo, Cenicafé presenta para el año 2020 su avance técnico número 512 titulado “*Vulnerabilidad de la caficultura de Huila a la broca del café en diferentes eventos climáticos*” (Giraldo J et al., 2020), donde se evidencian los distintos efectos de la variabilidad climática sobre el cultivo en el departamento.

De igual forma, para el año 2009 se presentó la investigación “*Efecto De El Niño – La Niña – Oscilación Del Sur (Enso) Sobre La Variabilidad Del Balance Hídrico Agroclimático En*

*Cultivos De Café (Coffea Arabica L.)*” (Gómez M, 2009), el estudio se realizó a una escala de tiempo mensual y sobre una estación en cada uno de los 14 departamentos de la zona cafetera estudiados, los resultados arrojaron que en todas las estaciones estudiadas se tiene en diferente grado efectos del fenómeno ENSO sobre la variación de la precipitación.

En este panorama, sobre el análisis de la variabilidad climática en el departamento del Huila hasta el momento no se había evaluado en un espacio temporal tan reducido (cada 10 días), sino a nivel mensual, lo que dificulta la interpretación de los comportamientos mensuales, de igual forma, no se había analizado el comportamiento de la variabilidad en cada una de las cuatro subregiones que componen el departamento, lo que supone un problema fundamental, ya que como lo evidencia la literatura, el fenómeno ENSO influye de manera diferente sobre cada zona estudiada, por tanto, este estudio permite un mejor conocimiento del clima departamental y una mayor comprensión de los efectos del ENOS en la caficultura, al integrar un análisis hidroclimatológico en 11 de los municipios con mayor importancia cafetera en el departamento a una escala de tiempo decadiario, de tal manera que se pueden involucrar los resultados en la toma de decisiones que conlleven a definir estrategias efectivas de adaptación que aseguren la sostenibilidad económica y social.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Zona de Estudio

La ubicación geográfica de la zona de estudio comprende las cuatro subregiones del departamento del Huila, Colombia y sus zonas cafeteras, como se observa en la tabla 1, donde se muestra la ubicación de las 11 Estaciones meteorológicas de influencia representativas de las subregiones Sur, Occidente, Centro y Norte, ver anexo 1 y 2.

*TABLA 1. estaciones meteorológicas de influencia del departamento del Huila.*

Municipio	Nombre de la estación	Latitud	Longitud	Altura (msnm)
Pitalito	Sevilla	1.84	-76.13	1320
Acevedo	Acevedo	1.76	-75.94	1470
Palestina	Palestina	1.72	-76.13	1530
San Agustín	Parque Arqueológico	1.89	-76.29	1800
Oporapa	Oporapa	2.03	-76.10	1614
La Argentina	La Argentina	2.2	-75.97	1500
La Plata	Simón Campos	2.35	-75.88	1754
Gigante	Jorge Villamil	2.37	-75.55	1440
Santa María	Santa María	2.94	-75.59	1300
Tello	Hato Milagro	3.07	-75.17	548
Colombia	Miraflores	3.48	-74.74	1049

### Información Climática

De las estaciones meteorológicas presentadas en la tabla 1 se utilizó información a nivel diario de: precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, para cada estación a nivel diario. Los datos de estas variables se obtuvieron de las estaciones Sevilla, Simón Campos, Jorge Villamil y Acevedo por medio de Cenicafé para series de tiempo que van desde 1980 hasta 2019 según la estación. El tratamiento y completación de datos faltantes se hizo por medio del método de regresión lineal tomada de (Caldera et al., 2016), mediante bases de datos descargadas del IDEAM y de la plataforma Giovanni NASA, estos últimos obtenidos por medio de imágenes satelitales. Para las estaciones de Palestina, Parque Arqueológico, Oporapa, La Argentina, Santa María, Hato Milagro y Miraflores se descargaron los datos por medio del IDEAM y de la plataforma Giovanni NASA para los años de máximo efecto del ENOS según la NOAA: 2011, 2013 y 2015, considerados como años La Niña, Neutro y El Niño, respectivamente.

### Información de Suelos

La información de suelo fue suministrada por la gobernación del departamento del Huila (Beltrán, 2019); de esta base de datos se tomó la textura del suelo de los 11 municipios que hacen parte del estudio, con el triángulo de clasificación textural de suelos propuesto por la FAO y desarrollado por la (Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ), 2022), se conocen los porcentajes de Arenas, arcillas y limos que a su vez son utilizados en el software Soil Water Characteristics del (Departamento de Agricultura de los EE.UU (USDA), 2022), para obtener la humedad gravimétrica a capacidad de campo (% CC) y la humedad gravimétrica a punto de marchitez permanente (% PMP), ver tabla 2.

*TABLA 2. información de suelos del departamento.*

Mapa UPRA		GIZ y FAO			Soil Water Characteristics USDA	
Municipio	Textura	% Arena	% Arcilla	% Limo	% CC	% PMP
Pitalito	Franco	40	20	40	28	13.7
Acevedo	Arcilloso	20	60	20	45.7	35
Palestina	Franco limosa	22	11	67	28.8	8.8
San Agustín	Franco limosa	22	11	67	28.8	8.8
Oporapa	Arenosa Franca	85	0	15	14.2	8.6
La Argentina	Franco limosa	22	11	67	28.8	8.8
La Plata	Franco	40	20	40	28	13.7
Gigante	Franco Arcilloso	32	35	33	35.6	21.8
Santa María	Franco Arcillo					
María	Arenoso	60	27	13	27.8	17.7
Tello	Arenoso	92	3	5	8.4	3.8
Colombia	Franco Arenoso	63	10	27	18.4	8.1

### **Información de Producción Cafetera**

El área cosechada, producción y rendimiento del cultivo de café se obtuvo por medio del portal (Sistema de Información Regional (SIR), 2022) en la web oficial de la Gobernación del Huila y las diferentes alcaldías involucradas, la base de datos comprende registros anuales desde el año 2002 hasta el 2018 de los municipios de Pitalito, Acevedo, La Plata y Gigante.

### **Herramientas informáticas: Software**

se utilizaron hojas de cálculo Microsoft Excel para posibilitar la completación de los datos faltantes en las series de tiempo de las variables climáticas de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.

Además, Se utilizo un entorno de desarrollo integrado para el lenguaje de programación R mediante el programa Rstudio, el cual se usó para desarrollar dos funciones principales: 1. Cálculo de evapotranspiración potencial a nivel diario a partir de datos diarios de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima de cada una de las 11 estaciones. 2. Cálculo de balance hídrico del suelo a partir de las variables de precipitación y evapotranspiración potencial a nivel decadiario. Sumado a lo anterior, se desarrollaron siete funciones principales de salida, de donde se obtuvieron en formato grafico las diferentes variables analizadas.

### **Diseño experimental**

En la figura 1, se muestra la ruta investigativa desarrollada para los efectos de este trabajo, se inició con la elección de las 11 estaciones en el departamento, las cuales dotaron a la investigación de los datos de entrada necesarios para el desarrollo del software y suministradas por las diferentes instituciones colaborativas, luego se procedió a la implementación de los diferentes métodos matemáticos propuestos por los diferentes sectores investigativos, posteriormente se aplicó la separación de los datos en función de los

escenarios de variabilidad climática para terminar con la obtención de las siete variables de respuesta.

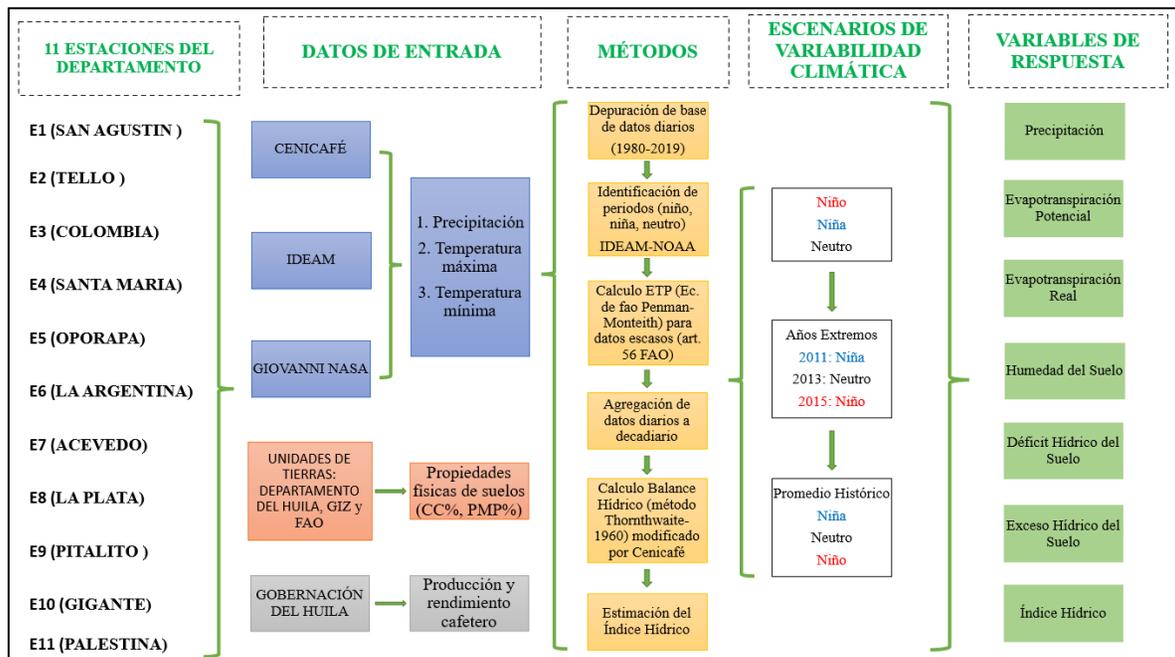


FIGURA 1. Diseño experimental.

## Evapotranspiración Potencial

La evapotranspiración potencial o de referencia ( $ET_o$ ) se estimó mediante la fórmula de FAO Penman-Monteith, presentada por (G. Allen et al., 2006):

$$ET_o = \frac{0,408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (1)$$

Donde:  $ET_o$ = evapotranspiración de referencia (mm/día);  $R_n$ = radiación neta en la superficie del cultivo ( $MJ/m^2 \cdot día$ );  $G$ = flujo del calor de suelo ( $MJ/m^2 \cdot día$ );  $T$ = temperatura media del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}C$ );  $U_2$ = velocidad del viento a 2 m de altura (m/s);  $e_a$ = presión real de vapor (kPa);  $e_s$ = presión de vapor de saturación (kPa);  $\Delta$ = pendiente de la curva de presión de vapor ( $kPa/(^{\circ}C)$ );  $\gamma$ = constante psicrométrica ( $kPa/(^{\circ}C)$ ).

## Cálculo de Evapotranspiración Potencial a Partir de Datos Climáticos Faltantes

Si no se dispone de alguno de los datos climáticos requeridos o estos no pueden ser calculados, se recomienda la estimación de estos datos con uno de los procedimientos siguientes para con ello aplicar la ecuación de FAO Penman-Monteith para el cálculo de  $ET_o$  (G. Allen et al., 2006).

## HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa (HR) expresa el grado de saturación del aire como el cociente entre la presión real de vapor ( $e_a$ ) a una temperatura dada y la presión de saturación de vapor ( $e^{\circ}(T)$ ) a la misma temperatura (T):

$$HR = \frac{e_a}{e^\circ(T)} * 100 \quad (2)$$

Donde: HR: humedad relativa (%);  $e_a$ = presión real de vapor;  $e^\circ(T)$ = presión de saturación de vapor.

En caso en que los datos de humedad no estén disponibles o sean de calidad cuestionable, se puede llevar adelante una estimación de la presión real de vapor ( $e_a$ ), si se asume que la temperatura del punto de rocío ( $T_{rocío}$ ) es similar a la temperatura mínima diaria ( $T_{min}$ ). Se asume implícitamente que, a la salida del sol, cuando la temperatura del aire está alrededor de ( $T_{min}$ ), el aire está casi saturado con vapor de agua y que la humedad relativa es de alrededor de 100%. Si ( $T_{min}$ ) se utiliza para representar ( $T_{rocío}$ ) entonces:

$$e_a = e^\circ(T_{min}) = 0,61 * \exp \left[ \frac{17,27 * T_{min}}{T_{min} + 273,3} \right] \quad (3)$$

Donde:  $e_a$ : presión real de vapor;  $e^\circ(T_{min})$ = presión de saturación de vapor a temperatura mínima.

#### RADIACIÓN SOLAR DERIVADA DE LAS DIFERENCIAS TÉRMICAS

La diferencia entre temperatura del aire máxima y mínima ( $T_{max} - T_{min}$ ) se puede utilizar como indicador de la fracción de la radiación extraterrestre que alcanza la superficie de la tierra. Este principio ha sido utilizado por Hargreaves y Samani para desarrollar estimaciones de  $ET_o$  usando solamente datos de temperatura del aire. La ecuación de radiación de Hargreaves, ajustada y validada en varias estaciones meteorológicas en una amplia variedad de condiciones climáticas, está dada por:

$$R_s = K_{R_s} * \sqrt{(T_{max} - T_{min})} * R_a \quad (4)$$

Donde:  $R_s$ = radiación extraterrestre ( $MJ/m^2 * día$ );  $T_{max}$ = temperatura máxima del aire ( $^{\circ}C$ );  $T_{min}$ = temperatura mínima del aire ( $^{\circ}C$ );  $K_{R_s}$ = coeficiente de ajuste ( $^{\circ}C^{-0,5}$ ).

para las localidades «interiores», en donde la masa de tierra domina y las masas de agua no están influenciadas fuertemente por un cuerpo grande del agua,  $K_{R_s} \approx 0,16$ .

#### DATOS FALTANTES DE VIENTO

En caso de no tener disponibilidad de datos de viento dentro de la misma región, un valor de  $2 m s^{-1}$  se puede utilizar como estimación temporal. Este valor es el promedio de 2000 estaciones meteorológicas en todo el mundo.

#### Separación de años El Niño, La Niña y Neutro

Una vez procesada y depurada la información de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, además de calculada la  $ET_o$  diaria se procedió a separar la información para años La Niña, El Niño y Neutro según lo establecido por la (NOAA, 2022): Cuando el Índice Oceánico de El Niño es menor o igual a - 0.5 son períodos La Niña; cuando el Índice Oceánico de El Niño es mayor o igual a + 0.5 son períodos de El Niño y si están entre - 0.5 y + 0.5 es una condición Neutra, ver anexo 3.

## Balance Hídrico Climático

Este balance permite conocer las condiciones hídricas medias en una zona y se utiliza principalmente para clasificaciones climáticas. Su cálculo se puede realizar para periodos mensuales o decadales (IDEAM, 2006). Además, de acuerdo con Silva (citado por SARMIENTO H et al., 2018), el balance hídrico es de gran importancia para el seguimiento de la dinámica del agua en los ecosistemas agrícolas y naturales. Indica, en el espacio y tiempo, las condiciones de humedad bajo las cuales las plantas crecen y se desarrollan, siendo útil en las interpretaciones del comportamiento de la planta durante periodos que difieren de las condiciones climáticas normales del lugar en cuestión, tales como periodos de exceso de agua o déficit.

## Cálculo de Balance Hídrico

Para realizar el proceso de cálculo se utilizó el programa Rstudio, donde se programó la metodología de cálculo desarrollada por Thornthwaite y Matter y aplicado por (IDEAM, 2006), (Gómez M, 2009) y (Ramírez B et al., 2010). Para el análisis de los datos de forma decadiaria, se precisó analizar a nivel diario todas las tres variables de entrada (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima) y la evapotranspiración potencial o de referencia; luego estos datos a nivel diario procedieron a ser calculados y analizados a nivel decadiario (cada 10 días) para el posterior análisis decadiario del balance hídrico.

### ALMACENAMIENTO MÁXIMO ( $A_{máx}$ )

El cálculo del balance hídrico considera algunas propiedades físicas de retención de agua en el suelo como son la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente para el cálculo del almacenamiento de agua de cada suelo, el cual varía dependiendo de su textura, contenido de materia orgánica y la profundidad radicular efectiva del cultivo.

$$A_{max} = \left( \frac{CC - PMP}{100} \right) * Pre * 10 \quad (5)$$

Donde:  $A_{max}$ = almacenamiento máximo (mm);  $Pre$ =profundidad radicular efectiva del cultivo (cm);  $CC$ = humedad gravimétrica a capacidad de campo (%);  $PMP$ = humedad gravimétrica en punto de marchitez permanente (%);  $10$ =factor de conversión a milímetros.

### SALDO

Se calcula el saldo de agua en el suelo o disponibilidad hídrica como la diferencia entre la  $Pd$  y la  $ETod$ . La precipitación decadal es igual a la precipitación efectiva en la escala decadiaria.

$$saldo = Pd - ETod \quad (6)$$

Donde:  $Pd$ =precipitación a nivel decadiario (mm);  $ETod$ =evapotranspiración de referencia a nivel decadiario (mm).

### NEGATIVO ACUMULADO ( $N_a$ )

Es un valor intermedio de la metodología y hace referencia a la cantidad de agua en mm que faltan en el suelo para que éste se encuentre a capacidad de campo (CC) y se calcula así: Si el saldo es mayor o igual a cero, el Na es igual a cero, de lo contrario será igual al Saldo.

#### ALMACENAMIENTO ACTUAL (Aa)

Es la cantidad de agua en mm que tiene el suelo, es decir la humedad actual. Para la primera década el Aa es igual al Amax; y a partir de la segunda década se calcula con la siguiente expresión:

$$Aa_2 = Amax * e^{\frac{Na}{Amax}} \quad (7)$$

Donde: Aa<sub>2</sub>= Almacenamiento actual del segundo decadal (mm); Na=Negativo acumulado (mm); Amax= almacenamiento máximo (mm).

#### VARIACIÓN DEL ALMACENAMIENTO ACTUAL (VarAa)

Hace referencia a la cantidad de agua en el suelo entre el Almacenamiento actual de cualquier decadal y el inmediatamente anterior a éste.

$$VarAa = Aa_2 - Aa_1 \quad (8)$$

Donde: VarAa: Variación del Almacenamiento actual (mm); Aa<sub>(i-1)</sub>: Almacenamiento actual del decadal anterior (mm); Aa<sub>(i)</sub>: Almacenamiento actual del decadal trabajado(mm).

#### EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (ETr)

Si el saldo es mayor o igual a cero, la Evapotranspiración real decadal (ETrd) es igual a la ETod de lo contrario se calcula con la siguiente expresión:

$$ETrd = Pd + |VarAa| \quad (9)$$

Donde: ETrd= Evapotranspiración real a nivel decadal (mm); Pd= precipitación a nivel decadal (mm); VarAa= Variación del Almacenamiento actual (mm).

#### DÉFICIT HÍDRICO (Def)

Si el saldo es mayor a cero el Déficit Hídrico (Def) es igual a cero, de lo contrario se calcula con la siguiente expresión:

$$Def = ETod - ETrd \quad (10)$$

Donde: ETrd= Evapotranspiración real a nivel decadal (mm); ETod= evapotranspiración de referencia a nivel decadiario (mm).

#### EXCESO HÍDRICO (Exc)

Si el saldo es menor a cero el Exceso Hídrico (Exc) es igual a cero, de lo contrario se calcula con la siguiente expresión:

$$Exc = Pd - ETod + VarAa \quad (11)$$

## ÍNDICE HÍDRICO

De acuerdo con (IDEAM, 2006), el índice hídrico puede ser considerado como un indicador agroclimático que permite identificar zonas y/o periodos con excesos o deficiencias de agua.

Este índice fluctúa entre 0 y 1.0 alcanzando su máximo valor (1.0) cuando el suelo tiene adecuada disponibilidad hídrica, de tal forma que la tasa de evapotranspiración real (ETR) es igual a la tasa de evapotranspiración potencial (ETP); la disminución de este valor se traduce como una disminución en la cantidad de agua presente en ese momento en el suelo. Este índice es una de los resultados que más se utiliza en las investigaciones (Gómez M, 2009).

Según la continuidad deficitaria o de exceso, en concordancia con los índices de humedad del suelo expuesto por (SARMIENTO H et al., 2018), se definieron tres estados que describen la condición del índice, a partir de los cuales se pueden analizar y generar recomendaciones del cultivo. Cuando el índice hídrico se encuentra entre 0.3 y 0.6, el suelo se encuentra en una condición normal, es decir, que es adecuada para el cultivo, para los periodos en que el índice esté por debajo de 0.3 se considera que el suelo mantiene un estado deficitario y, por el contrario, si el índice hídrico se encuentra por encima de 0.6 se considera que el suelo mantiene un estado de exceso.

$$IH = \frac{ETrd}{ETod} \quad (12)$$

A partir del segundo decadal para el cálculo del Amax se tienen en cuenta los datos del decadal anterior razón por la cual se calcula el valor intermedio de C1 y de C2 si es necesario y se calcula de la siguiente manera:

$$C1 = Amax * e^{\frac{Na[i]}{Amax}} + Saldo[i] \quad (13)$$

Donde: C1: Almacenamiento máximo del decadal [i] (mm); Na\_i: Negativo acumulado del decadal [i] (mm); Saldo\_i: Saldo del decadal [i] (mm)

Si C1 es mayor que Amax C2 es igual a Amax; de lo contrario C2 es igual C1. Y si el Saldo [i] es mayor o igual a cero Na[i] se calcula con la siguiente expresión:

$$Na_i = Amax * \log \frac{C2_i}{Amax} \quad (14)$$

de lo contrario se calcula con la siguiente expresión:

$$Na_i = Na_{i-1} + Saldo_i \quad (15)$$

El almacenamiento actual a partir del segundo dato se calcula con la expresión:

$$Na_i = Amax * e^{\frac{Na[i]}{Amax}} \quad (16)$$

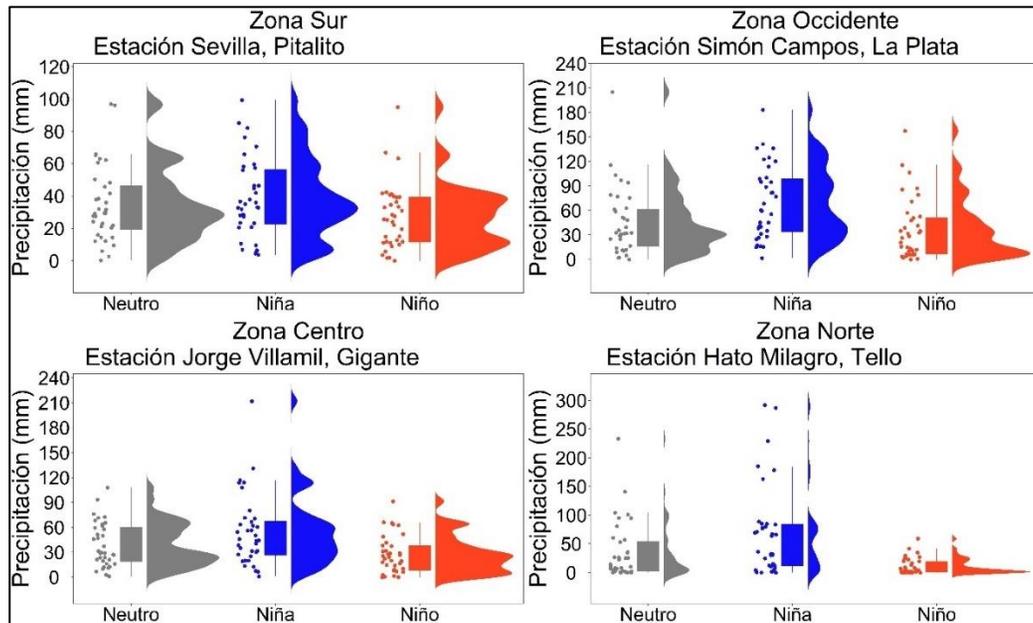
Para el cálculo de la variación del almacenamiento actual (VarAa) a partir del segundo dato será:

$$\text{Var}Aa_i = Aa_i - Aa_{i-1} \quad (17)$$

Por último, las expresiones de ETrd, Def, Exc e IH aplica para todos los datos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

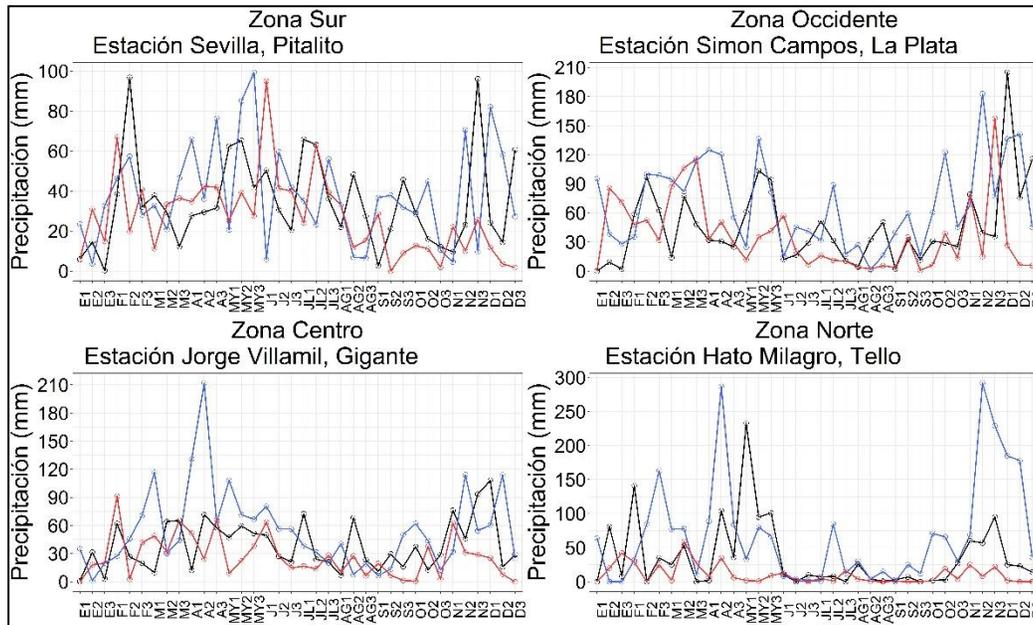
**Precipitación:** En la figura 2, se observa la distribución de la precipitación durante los años máximos (2013, 2015 y 2011) en los últimos 22 años para cada evento, Neutro, El Niño y La Niña, respectivamente, para las cuatro subregiones del departamento del Huila. Se evidencia una similitud en las cuatro zonas del departamento durante las condiciones Neutro y La Niña, en donde no difieren de manera significativa los regímenes de lluvia, sin embargo, la condición El Niño evidencia una variación importante en dichos regímenes respecto a las otras dos condiciones. Se aprecia de igual forma que los eventos de La Niña y El Niño impactan más en las subregiones centro y norte que en las zonas sur y occidente respecto a la condición neutra. Sumado a lo anterior, se resalta la menor incidencia del fenómeno ENOS sobre los regímenes de precipitación en la zona Sur en comparación con la zona Norte.



**FIGURA 2.** Distribución de la precipitación en las cuatro subregiones del departamento.

En la figura 3, se presenta la precipitación a escala decadiaria para los 36 periodos de los años máximos en los últimos 22 años para cada evento, Neutro, El Niño y La Niña durante los años 2013, 2015 y 2011, respectivamente, para las cuatro subregiones del departamento del Huila. En esta figura se puede observar un comportamiento similar en los regímenes de precipitación durante los tres eventos en el Sur del departamento y no se presentan periodos de larga duración sin presencia de precipitaciones, ya que se evidencian solo 3 decadales con 0 mm de lluvia. De igual forma, en el Occidente, se vuelve a presentar un comportamiento parecido al de la región Sur, presentando nuevamente poca diferencia en la cantidad de milímetros precipitados durante cada evento, teniendo los máximos de precipitación entre los decadales de noviembre dos y diciembre uno antes de comenzar con una nueva caída para

finales del año. Por otra parte, en las subregiones centro y norte, las precipitaciones evidenciadas durante un año con presencia del fenómeno El Niño tienden a disminuir drásticamente respecto a los eventos Neutro y La Niña, generando periodos de sequía consecutivos en los decadales que van desde abril hasta septiembre, a su vez, La Niña registra picos de lluvia extrema durante en algunos decadales y vuelve a presentarse una gran diferencia entre las precipitaciones registradas durante un evento La Niña respecto a los eventos Neutro y El Niño.



**FIGURA 3.** Comportamiento de los regímenes de precipitación durante los 36 decadales en cada uno de los tres eventos en las cuatro subregiones del departamento.

*Nota:* En el eje X se presentan los 36 decadales del año, desde el primer decadal de Enero (E1) hasta el tercer decadal de Diciembre (D3) donde la letra significa el mes y el número que la acompaña equivale al decadal de dicho mes. El comportamiento de la precipitación a lo largo del año se representa con una línea de color azul para un año La Niña, una línea de color negro para un año Neutro y una línea de color rojo para un año El Niño.

**Exceso hídrico:** En la figura 4, se presenta la distribución del exceso del recurso hídrico disponible en el suelo en las cuatro subregiones del departamento durante la presencia de condiciones (La Niña, Neutro y El Niño) para los años máximos del fenómeno en el último siglo (2011, 2013 y 2015), respectivamente. El aumento en la cantidad de agua durante el fenómeno La Niña es evidente en cada una de las cuatro zonas respecto a la condición neutra. En cuanto a la condición El Niño, se puede observar que el exceso disminuye en la zona norte mientras que en la zona occidente se marca la mayor cantidad de decadales con exceso.

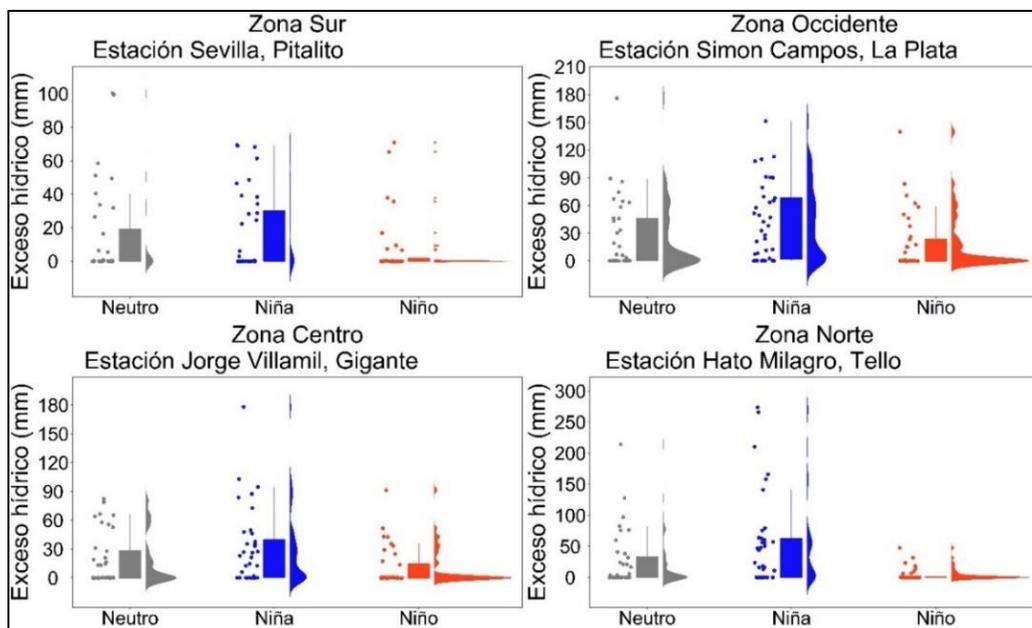
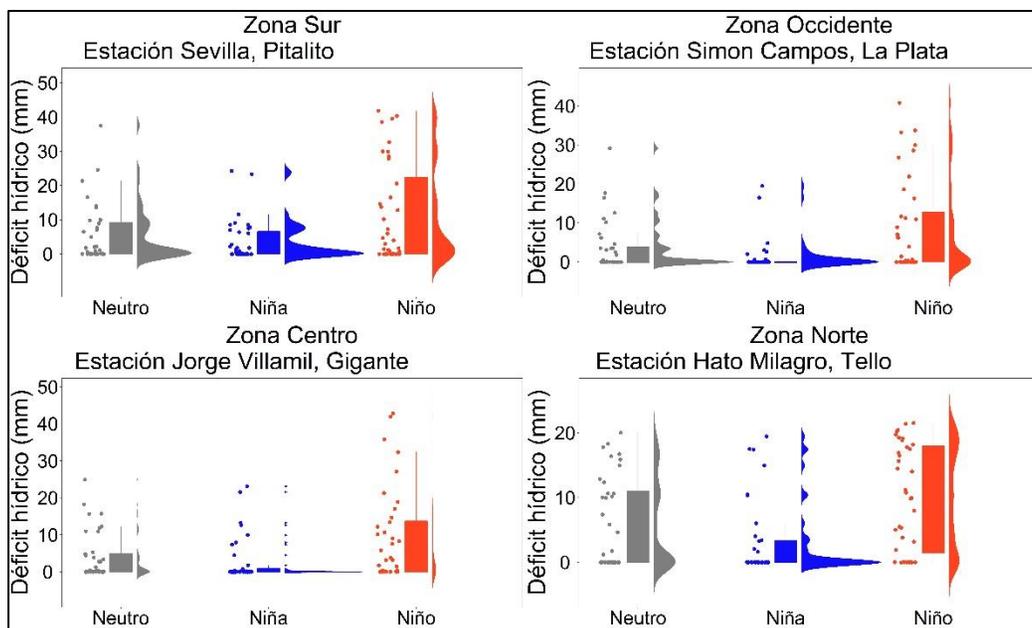


FIGURA 4. Distribución del exceso hídrico en las cuatro subregiones del departamento

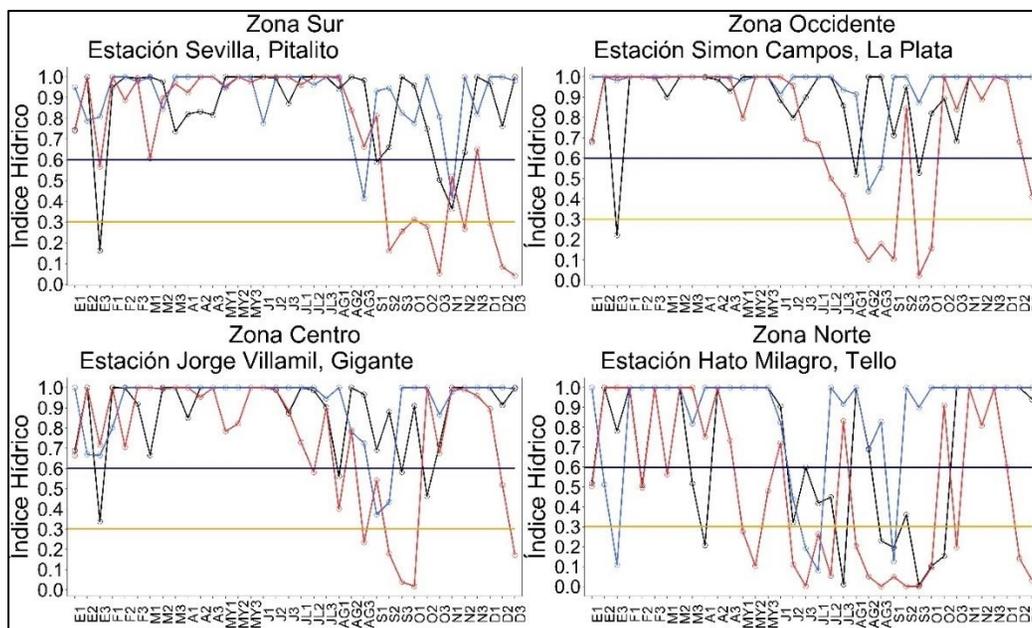
**Déficit hídrico:** En la figura 5, se presenta la distribución del déficit del recurso hídrico disponible en el suelo en las cuatro subregiones del departamento durante la presencia de condiciones (La Niña, Neutro y El Niño) en las cuatro subregiones del Huila, para los años máximos del fenómeno en el último siglo (2011, 2013 y 2015), respectivamente. La disminución en la cantidad de agua durante el fenómeno El Niño se hace evidente en cada una de las cuatro zonas respecto a la condición neutra, especialmente en la subregión norte. En cuanto a la condición La Niña, se observa que el déficit disminuye significativamente en la zona centro y occidente mientras que en la zona sur y norte se observa un déficit mucho mayor.



*FIGURA 5. Distribución del déficit hídrico en las cuatro subregiones del departamento.*

**Índice hídrico:** En la figura 6, se presenta el comportamiento a través de los 36 decadales, desde enero 1 hasta diciembre 3, para las tres condiciones (La Niña, Neutro y El Niño) en las cuatro subregiones del Huila, para los años máximos del fenómeno en el último siglo (2011, 2013 y 2015), respectivamente. De igual forma, se definen tres estados hídricos (déficit:  $< 0.3$ , normal: entre  $0.3$  y  $0.6$ , exceso:  $> 0.6$ ), basados en los lineamientos expuestos por (SARMIENTO H et al., 2018).

En la zona sur, se observa una caída en el índice durante los tres eventos a inicio de año en enero 3, seguido por una leve estabilización con un índice por encima de  $0.7$  manteniéndose en un estado de exceso hasta el decadal agosto 2 en donde se vuelve a presentar una caída mucho mayor durante los tres eventos (precipitándose al estado de normalización), acentuándose en el fenómeno El Niño el cual alcanza un estado deficitario, teniendo su punto máximo de déficit al finalizar el año; el comportamiento de los tres eventos en esta parte del departamento se torna repetitivo con ciertas variaciones a través del tiempo, sin embargo, en la gráfica del histórico promedio en ninguno de los tres casos el índice llega a un estado de déficit, ver anexo 4. En la zona occidente, se observa la presencia de una caída en el índice durante la condición Neutro hasta alcanzar un estado de déficit en enero 3 y se mantiene en exceso con algunas variaciones durante el fenómeno La Niña y El Niño hasta julio 1, a partir del decadal julio 2 se inicia una caída del índice de forma general durante los tres eventos, en donde se vuelve a presentar una caída mucho mayor durante el fenómeno El Niño, el cual alcanza un estado deficitario desde el decadal de agosto 1 hasta el decadal de octubre 1; en el comportamiento del occidente del departamento en su promedio histórico (ver anexo 5) se ve reflejado un índice hídrico cercano a uno durante casi todo el inicio del año y confirma un comportamiento repetitivo respecto a los años máximos expuestos, con algunas variaciones, de los tres fenómenos durante mediados y finales del año. En la zona centro, se observa una variación parecida al de la zona sur durante al inicio y mediados de año, desde el decadal de julio 2 se presentan caídas mucho más fuertes en el índice durante los 3 eventos, teniendo mayor incidencia el fenómeno El Niño, el cual alcanza un estado deficitario desde el decadal de agosto 3 hasta el decadal de octubre 1, con variaciones en el decadal de septiembre 1; nuevamente, el histórico promedio para esta región (ver anexo 6) presenta un patrón repetitivo durante el fenómeno La Niña y El Niño con una caída del índice a inicios de año, diferente al evento Neutro, que mantiene un índice sin mucha variación, sin embargo, para mediados y finales del año, el patrón de comportamiento frente a los años máximos vuelve a presentarse, pero esta vez sin mucha variación en los tres eventos. En la zona norte, se observa una mayor presencia del índice en su estado deficitario durante todo el año, aumentando a su estado de exceso durante el fenómeno La Niña a partir del decadal de febrero 1 hasta el decadal de mayo 2, después inicia una caída general del índice durante los tres eventos hasta el decadal de octubre 1, en donde se inicia una estabilización en el estado de exceso del índice.



**FIGURA 6.** Comportamiento del índice hídrico en las cuatro subregiones del departamento.

*Nota:* En el eje X se presentan los 36 decadales del año, desde el primer decadal de Enero (E1) hasta el tercer decadal de Diciembre (D3), donde la letra significa el mes y el número que la acompaña equivale al decadal de dicho mes. Los límites del Índice hídrico se presentan en el valor de 0,3 del eje Y de forma constante con una línea de color amarillo en sentido horizontal para separar el estado de déficit ( $IH < 0.3$ ) del estado ideal ( $0.3 > IH < 0.6$ ), la línea de color azul en 0.6 del eje Y representa el límite del estado de exceso Hídrico en el suelo ( $IH > 0.6$ ). El comportamiento del Índice Hídrico a lo largo del año se representa con una línea de color azul para un año La Niña, una línea de color negro para un año Neutro y una línea de color rojo para un año El Niño

Los municipios de Colombia y Santa María, ubicados en la subregión norte del departamento, presentan particularidades y similitudes en el comportamiento del índice hídrico a través del año y según cada evento presentado; en los anexos 7 y 8 se puede observar la variación del índice y las precipitaciones durante cada uno de los eventos en sus años más fuertes, 2011 para el caso de La Niña, 2013 para el caso de un evento Neutro y 2015 para el caso de El Niño; en ambos municipios se presenta una reducción importante en el régimen de precipitaciones durante el fenómeno de El Niño, mientras que durante el fenómeno La Niña se presenta un aumento significativo durante cada uno de los 36 decadales respecto al evento Neutro y El Niño, en cuanto al índice hídrico el municipios de Santa María durante los eventos Neutro y La Niña mantiene un estado de exceso la mayoría del año, sin embargo, durante el fenómeno El Niño hay una caída del índice durante mediados del año, teniendo su punto de mayor déficit a finales del mes de septiembre, similitud que mantiene con el municipio de Colombia.

Para la subregión sur, en la estación Parque Arqueológico del municipio de San Agustín (ver anexo 9), el comportamiento del IH se presenta como el más uniforme de las 11 estaciones en estudio y mantiene un estado de exceso a través de todo el año durante cada uno de los eventos, al igual que en la estación de Palestina (ver anexo 10); así mismo, la precipitación se distribuye a lo largo de los 36 decadales sin presentar una amplia variabilidad en sus extremos, mientras que, en los municipios de Oporapa y en Acevedo se observan entre tres y cuatro decadales con altas lluvias, principalmente durante el evento El Niño (ver anexos 11 y 12). Es preciso señalar que el IH y las precipitaciones a escala decadiaria en esta subregión

no evidencian cambios relevantes entre un evento Neutro y un evento La Niña, sin embargo, se manifiesta una alteración, aunque muy leve en el comportamiento de la variabilidad climática durante un evento El Niño, con oscilaciones no muy significativas en los registros de precipitación e índice hídrico respecto a los otros dos eventos.

En cuanto a la subregión occidente, el comportamiento del IH y de la lluvia se correlaciona con los resultados de la zona sur. Esto se demuestra en el comportamiento registrado en la estación del municipio de La Argentina (ver anexo 13), en este municipio se observa que el IH expone el decadal septiembre 3 como único valor por debajo de 0.6 en un año con evento El Niño, y en los eventos Neutro y La Niña se mantiene todo el año en exceso hídrico como también se observa en los municipios de San Agustín y Palestina.

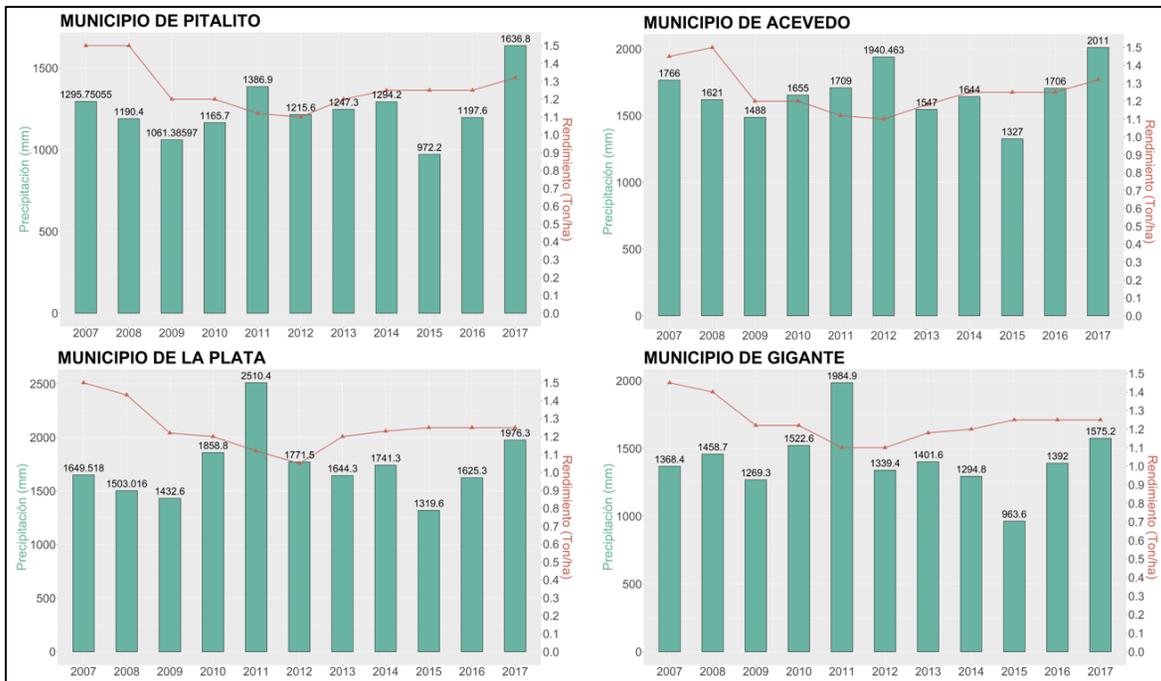
De forma general, se puede observar que el IH en el departamento fluctúa durante la presencia de los tres eventos de forma particular en cada uno de los 11 municipios estudiados, sin embargo, la incidencia del fenómeno ENSO en cada subregión impacta de manera más drástica tanto en la subregión norte como en el centro, generando regímenes de precipitación e índices hídricos mucho más altos durante el fenómeno La Niña y mucho más bajos durante el fenómeno El Niño respecto a los eventos neutros, mientras que, en las subregiones sur y occidente, el fenómeno impacta de manera mucho más leve, conservando un régimen de precipitaciones y unos índices hídricos altos y con poca variabilidad independientemente del evento que se esté presentando.

De igual forma, los índices hídricos que se evidencian durante los escenarios afectados por el fenómeno La Niña se mantienen muy cercanos a uno en las cuatro zonas, indicando problemas de exceso hídrico, además, se puede observar que sin importar el evento que se esté presentando, en todo el departamento, se genera con algunas variaciones una caída en el índice hídrico a partir del decadal de junio 2 hasta finales del año.

**Rendimiento:** En la figura 7, se presenta el rendimiento en ton/ha del cultivo de café desde el año 2007 hasta el año 2017 frente al comportamiento en la cantidad de precipitaciones anuales en mm en cuatro de los municipios de mayor producción del grano en todo el departamento.

Se puede observar que entre el año 2007 y 2008 el rendimiento en el municipio de Pitalito se mantuvo en 1.5 ton/ha, mientras que en el municipio de Acevedo aumentó de 1.45 a 1.5 ton/ha, sin embargo, para los municipios de la Plata y Gigante hubo una disminución en la producción del grano a 1.43 ton/ha y a 1.22 ton/ha, respectivamente, durante la misma serie de tiempo.

De igual forma, se puede evidenciar que a partir el año 2009 hasta el año 2012 se presenta una caída general en el rendimiento del cultivo mientras que ocurre un aumento en las precipitaciones en cada uno de los cuatro municipios, a partir del año 2013 comienza un repunte gradual en el rendimiento, esto debido a diferentes acciones sobre el manejo del cultivo tomadas por (CENICAFÉ, 2012), además de una caída en las precipitaciones durante el año 2015, lo que ayudo que para el año 2017 se alcanzara nuevamente un rendimiento de 1.32 ton/ha para los municipios de Pitalito y Acevedo y de 1.25 ton/ha para los municipios de La Plata y Gigante.



**FIGURA 7.** Comportamiento de las precipitaciones y el rendimiento cafetero a nivel anual en cuatro de los municipios de mayor producción del departamento, desde el año 2007 hasta el año 2017

## **CONCLUSIONES**

El fenómeno ENSO en sus fases fría (“La Niña”) y cálida (“El Niño”), afectan en diferente grado a cada una de las 11 estaciones evaluadas en el estudio, sin embargo, las diferencias presentadas en las estaciones conjuntas de cada subregión se muestran mínimas, lo que evidencia un patrón común de afectación para las subregiones Sur y Occidente y otro patrón común de afectación para las subregiones Norte y Centro.

El efecto de la variabilidad climática incide en un grado mucho menor sobre las precipitaciones y el índice hídrico en la parte alta del departamento en las subregiones Sur y Occidente, lo que explica la ventaja competitiva que tienen estas dos subregiones a nivel productivo del grano de café en el departamento, mientras que en la parte baja del departamento las subregiones del Norte y Centro se ven afectadas en gran medida por la presencia del fenómeno ENSO.

Al analizar el índice hídrico en las cuatro subregiones, se refleja un decaimiento general a partir del decadal Junio 2 en las cuatro zonas y en todos los escenarios, teniendo como puntos máximos de caída entre los decadales de Septiembre 3 a Octubre 3.

El índice hídrico presentado durante los escenarios La Niña se mantiene muy cercano a uno en las cuatro subregiones, lo que confirma la percepción de los caficultores del departamento de ser afectados por problemas de exceso hídrico en sus suelos.

La variabilidad climática afectó el rendimiento en el cultivo de café a partir del año 2008 hasta el 2012 en las cuatro subregiones departamentales, sin embargo, se deben analizar otras variables que influyen en este decaimiento.

## **AGRADECIMIENTOS**

La producción de este trabajo se debe en gran parte a los grandes esfuerzos y colaboraciones hechas por las diferentes instituciones en el aporte de las variables de información, un especial agradecimiento al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), al equipo de trabajo de Cenicafe, principalmente al Dr. Juan Carlos García, Responsable de Plataforma/Líder Agroclimatología y finalmente a todas las Alcaldías y dependencias de la Gobernación del Huila por su gran apoyo y confianza.

## REFERENCIAS

Agronet. (2020, June 12). *Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo*. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1> [consultado agosto 16 de 2021].

Alcaldía de Pitalito. (2015). *RUTA DE CAMBIO DE PITALITO 2030*.

Bento, M., de Camargo, P., & Camargo, M. B. P. *The impact of climatic variability and climate AGROMETEOROLOGIA THE IMPACT OF CLIMATIC VARIABILITY AND CLIMATE CHANGE ON ARABIC COFFEE CROP IN BRAZIL (1) RESUMO IMPACTO DA VARIABILIDADE E DA MUDANÇA CLIMÁTICA NA PRODUÇÃO DE CAFÉ ARÁBICA NO BRASIL* (Issue 1). (2010).

<https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000100030>

Caldera, H. P. G. M., Piyathisse, V. R. P. C., & Nandalal, K. D. W. A Comparison of Methods of Estimating Missing Daily Rainfall Data. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, 49(4), 1. (2016).

<https://doi.org/10.4038/engineer.v49i4.7232>

CENICAFÉ. *Informe anual Cenicafe 2012*. 15–16. (2012).

<https://doi.org/https://doi.org/10.38141/10783/2012>

Centro Nacional de Investigaciones de Café. *Informe Anual Cenicafe 2021*. (2021).

<https://doi.org/10.38141/10783/2021>

Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM). *PLAN DE CAMBIO CLIMÁTICO HUILA 2050: PREPARÁNDOSE PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO*. (2014).

Damatta, F. M., Cochicho Ramalho, J. D., Damatta, F. M., & Ramalho, J. D. C. Impact of drought and temperature stress on coffee physiology and production: A review. In *Braz. J. Plant Physiol* (Vol. 18, Issue 1). (2006).

<https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100006>

Departamento de Agricultura de los EE.UU (USDA). *Soil Water Characteristics*. (2022).

<https://www.ars.usda.gov/research/software/download/?softwareid=492&modecode=80-42-05-10> [consultado febrero 16 de 2022].

FNC. *Café de Huila*. (2022). <https://huila.federaciondecafeteros.org/cafe-de-cauca/> [consultado agosto 21 de 2021].

Gay, C., Estrada, F., Conde, C., Eakin, H., & Villers, L. Potential Impacts of Climate Change on Agriculture: A Case of Study of Coffee Production in Veracruz, Mexico. *Climatic Change*, 79(3–4), 259–288. (2006).

<https://doi.org/10.1007/s10584-006-9066-x>

Giraldo Jaramillo, M., Montoya, E. C., Sarmiento Herrera, N., Quiroga Mosquera, A., Espinosa Osorio, J. C., García López, J. C., Duque Orrego, H., & Benavides Machado, P. Vulnerabilidad de la caficultura de Huila a la broca del café en diferentes eventos climáticos. *Avances Técnicos Cenicafé*, 512, 1–8. (2020).

<https://doi.org/10.38141/10779/0512>

Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. *Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management*. 6, 499. (1999).

Hugo Ramírez Builes, Jaramillo Robledo, Á., & Arcila Pulgarín, J. *ÍNDICES PARA EVALUAR EL ESTADO HÍDRICO EN LOS CAFETALES* (Vol. 61, Issue 1). (2010).

IDEAM. *Índice de disponibilidad hídrica (IDH): Metodología de cálculo y aplicación en Colombia*. (2006).

Jayakumar, M., Rajavel, M., Surendran, U., Gopinath, G., & Ramamoorthy, K. Impact of climate variability on coffee yield in India—with a micro-level case study using long-term coffee yield data of humid tropical Kerala. *Climatic Change*, 145(3–4), 335–349. (2017).

<https://doi.org/10.1007/s10584-017-2101-2>

Losada, C., Hernán, O., Víctor, G., Sierra, H., & Jakeline, C. *ANÁLISIS DE LA COMPETITIVIDAD DE LAS EXPORTACIONES DEL CAFÉ DEL HUILA 1 ANALYSIS OF THE COMPETITIVENESS OF HUILA COFFEE EXPORTS ANÁLISE DA COMPETITIVIDADE DAS EXPORTAÇÕES DE CAFÉ HUILA*. 2. (2020).

<https://doi.org/10.22267/rtend.202102.139>

Malyadri, P. STATUS OF COFFEE PLANTATION IN INDIA: A HIGH TIME FOR INNOVATION AND SUSTAINABILITY TOWARDS MAKE IN INDIA. *VSRD International Journal of Business and Management Research*. (2016).

[https://doi.org/10.1007/978-3-64220256-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-64220256-8_2)

Manuela Victoria Beltrán, & Equipo Técnico POPSPR Huila. UNIDADES DE TIERRAS DEPARTAMENTO DEL HUILA. In *Piso 1 Sec.agricultura@huila.gov.co Teléfono* (Issue 8). (2019). <https://www.huila.gov.co/documentos/1283/evaluacion-de-tierras/> [consultado abril 17 de 2022].

NOAA. *Climate Prediction Center - ONI*. (2022).

[https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php) [consultado febrero 26 de 2021].

Ocampo Lopez, O. L., & Alvarez-Herrera, L. M. Tendencia de la producción y el consumo del café en Colombia. *Apuntes Del Cenes*, 36(64), 139–165. (2017).

<https://doi.org/10.19053/01203053.v36.n64.2017.5419>

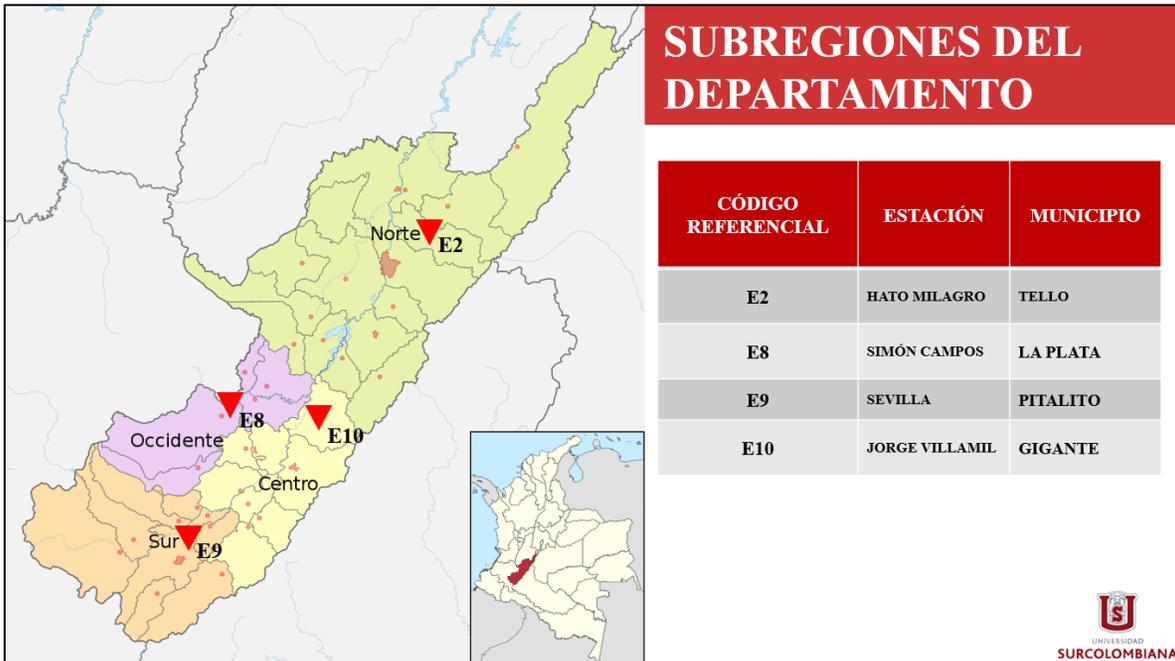
Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). *Cambio climático y seguridad alimentaria y nutricional América Latina y el Caribe*. (2018).

- OSCAR FERNANDO GÓMEZ MORALES. *Efecto De El Niño – La Niña – Oscilación Del Sur (ENSO) Sobre La Variabilidad Del Balance Hídrico Agroclimático En Cultivos De Café (Coffea arabica L)*. (2009).
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). *Cambio climático 2001: Informe de síntesis*. (2001).
- Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, & Martin Smith. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de agua de los cultivos. *Fao*, 297. (2006).
- Ritchie, T. J. Specifications for the ideal model for predicting crop yields. *Muchow, R.S*, 97–122. (1991).
- Sachs, J., Rising, J., Foreman, T., Simmons, J., & Brahm, M. *Chapter 5: Empirics of production*. (2015).
- SARMIENTO H, RAMIREZ C, JARAMILLO R, RESTREPO A, & GARCIA L. *MONITOREO CLIMÁTICO: HERRAMIENTA AL SERVICIO DE LA CAFICULTURA COLOMBIANA*. (2018).
- Sistema de Información Regional (SIR). *Agropecuaria - SIR*. (2022). <https://www.sirhuila.gov.co/socio-economica-economicas-agropecuaria-agropecuaria/> [consultado marzo 17 de 2022].
- Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ). *Sustainable energy solutions for agriculture*. (2022). <https://www.giz.de/en/worldwide/38429.html> [consultado junio 22 de 2022].
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA)*. (2021). <https://www.upra.gov.co/web/guest/eva-2021> [consultado marzo 26 de 2022].

## ANEXOS



*ANEXO 1. Localización geográfica de las estaciones.*



*ANEXO 2. Subregiones del departamento del huila.*

# HISTÓRICO DEL ÍNDICE OCEÁNICO

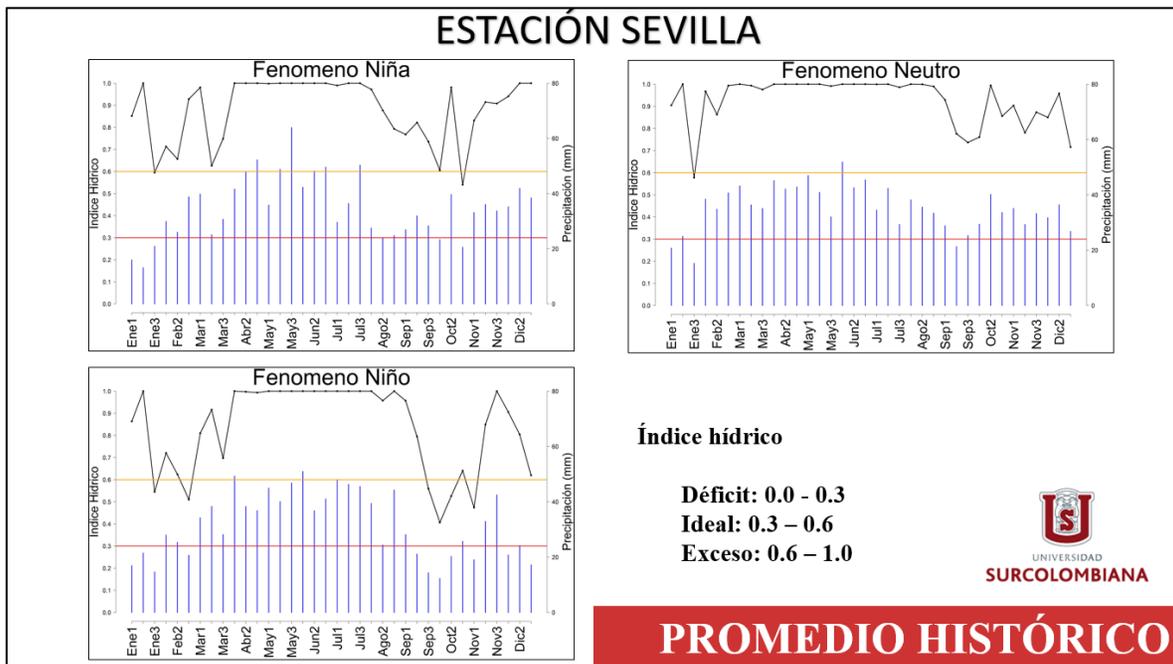
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	0.9	0.9
2007	0.7	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.1	-1.3	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.5	-1.3	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.8	-0.6	-0.3	0.0	0.3	0.5	0.6	0.7	1.0	1.4	1.6
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0	-1.1
2012	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7
2015	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6
2016	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0

<b>LA NIÑA</b>	<b>NEUTRO</b>	<b>EL NIÑO</b>
<b>T &lt; -0.5 °C</b>	<b>-0.5 °C &lt; T &lt; 0.5 °C</b>	<b>T &gt; 0.5 °C</b>

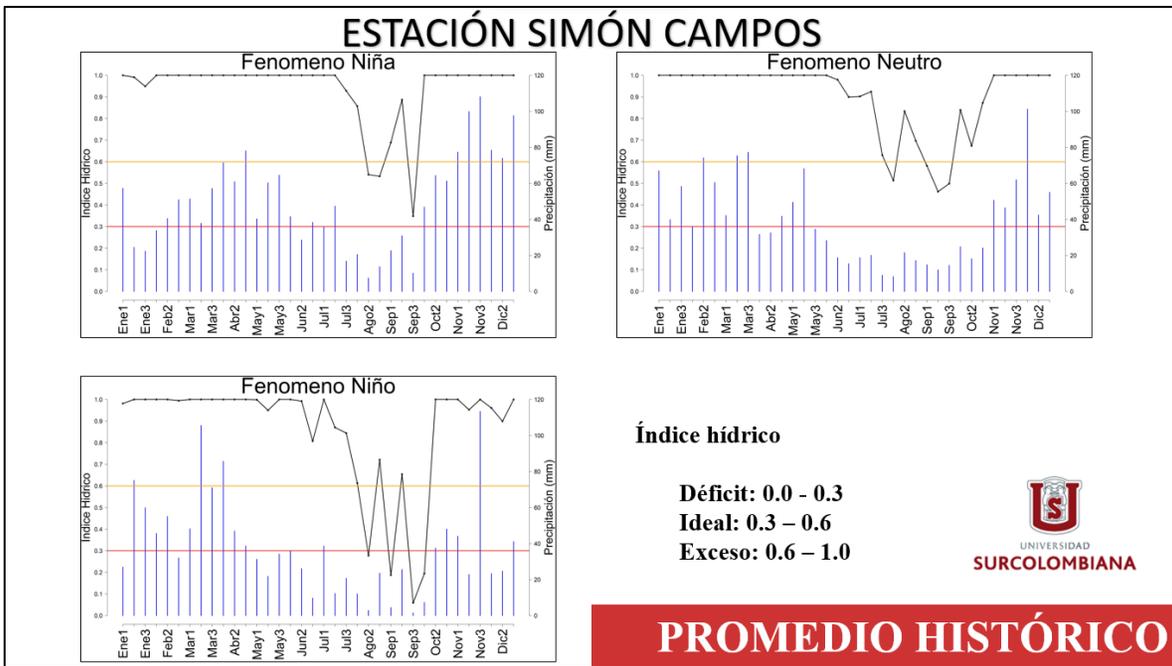
Fuente: Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica. NOAA



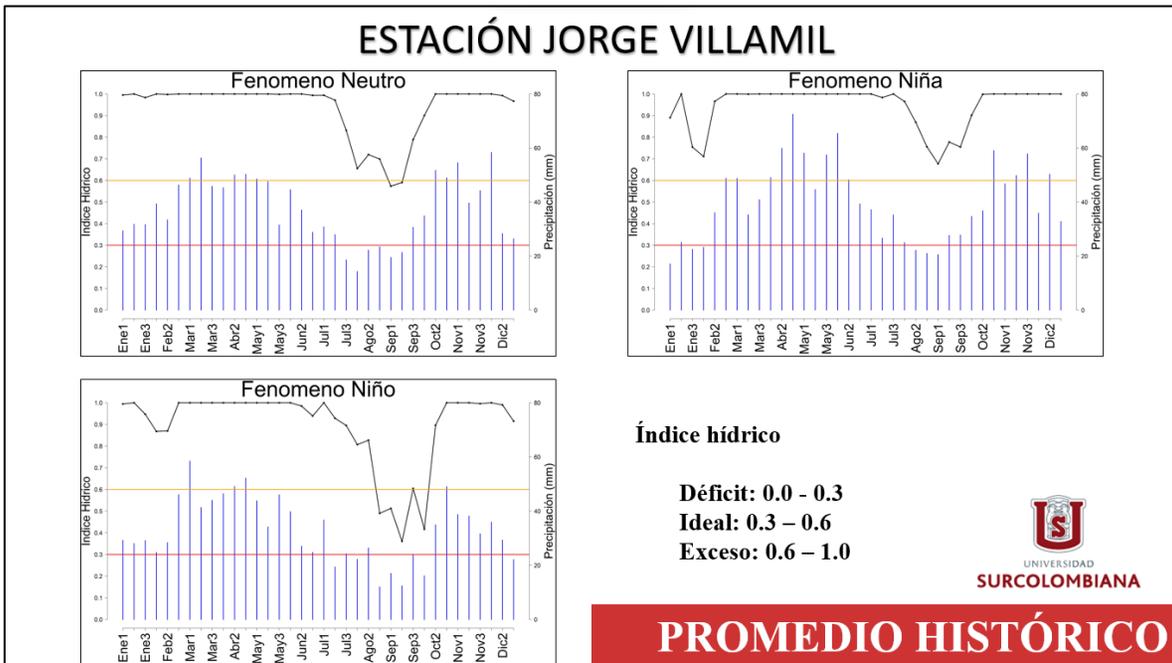
ANEXO 3. Histórico del índice oceánico (2000-2017).



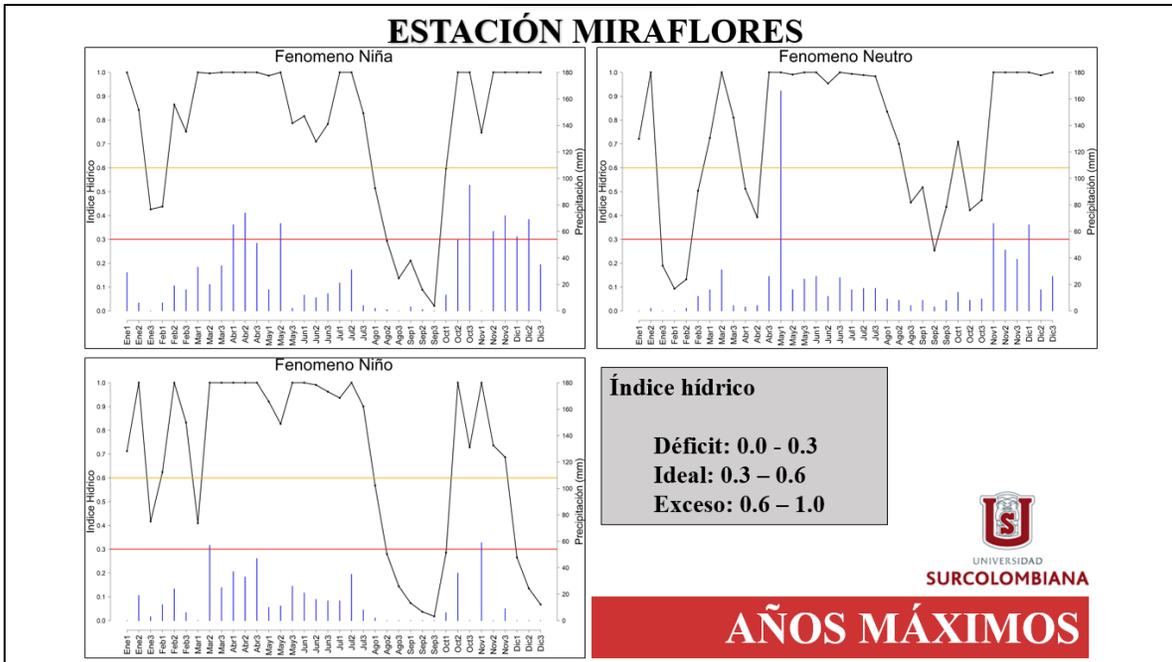
ANEXO 4. Índice hídrico histórico promedio estación Sevilla.



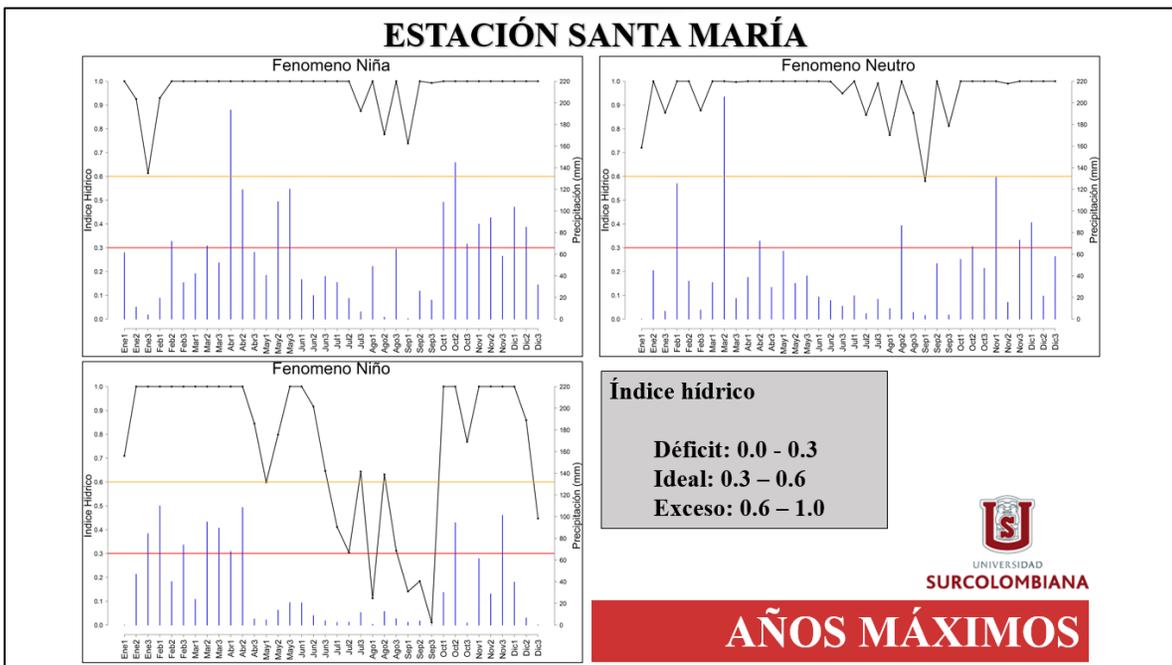
*ANEXO 5. Índice hídrico histórico promedio estación Simón Campos.*



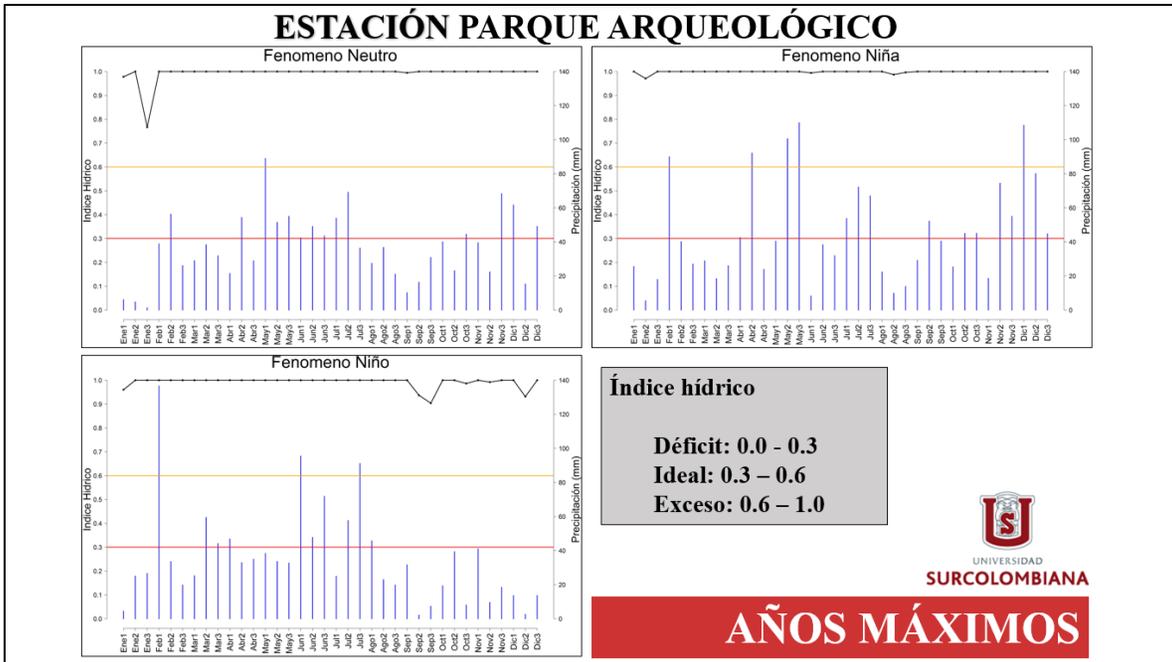
*ANEXO 6. Índice hídrico histórico promedio estación Jorge Villamil.*



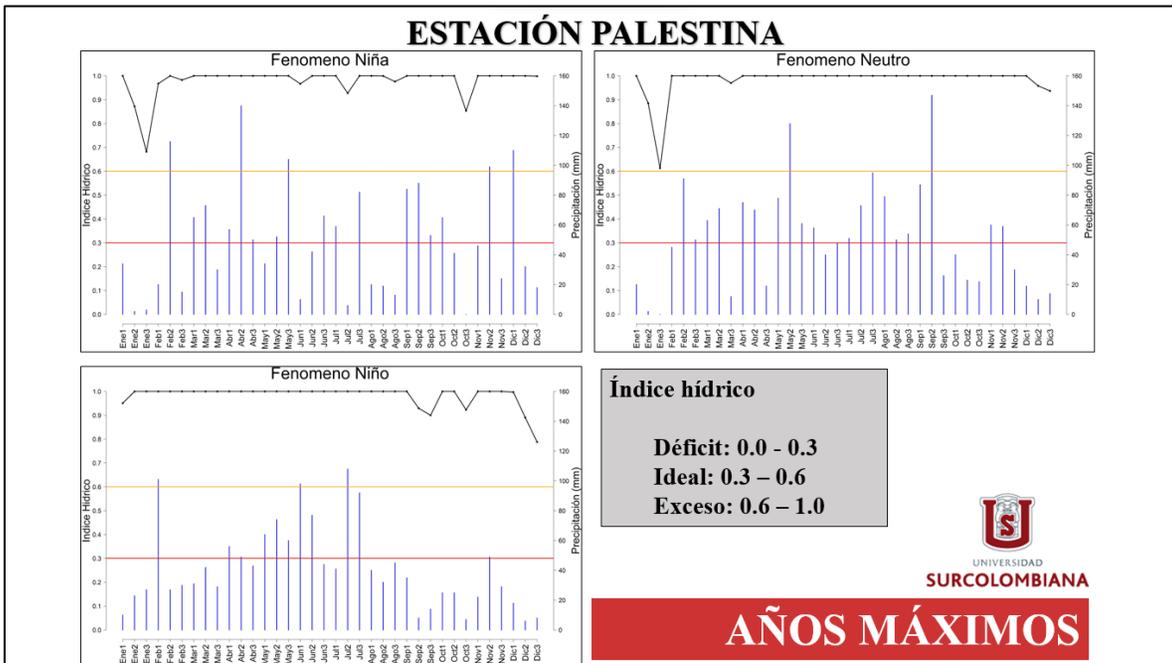
*ANEXO 7. Índice hídrico en años máximos, estación Miraflores.*



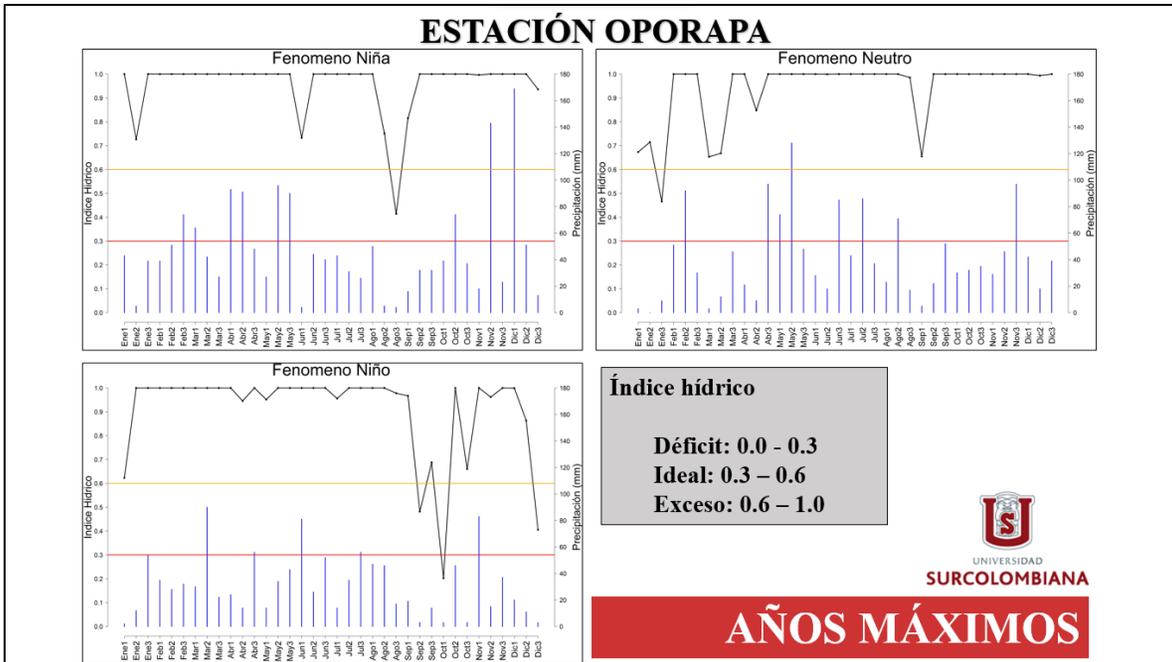
*ANEXO 8. Índice hídrico en años máximos, estación Santa María.*



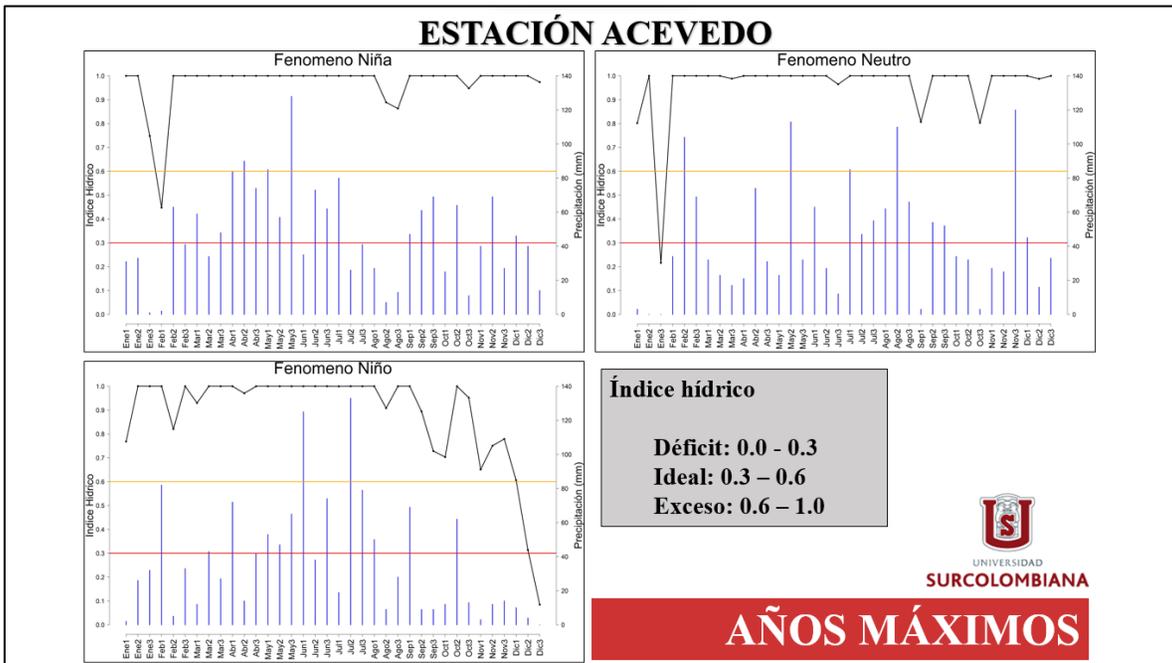
*ANEXO 9. Índice hídrico en años máximos, estación Parque Arqueológico.*



*ANEXO 10. Índice hídrico en años máximos, estación Palestina.*

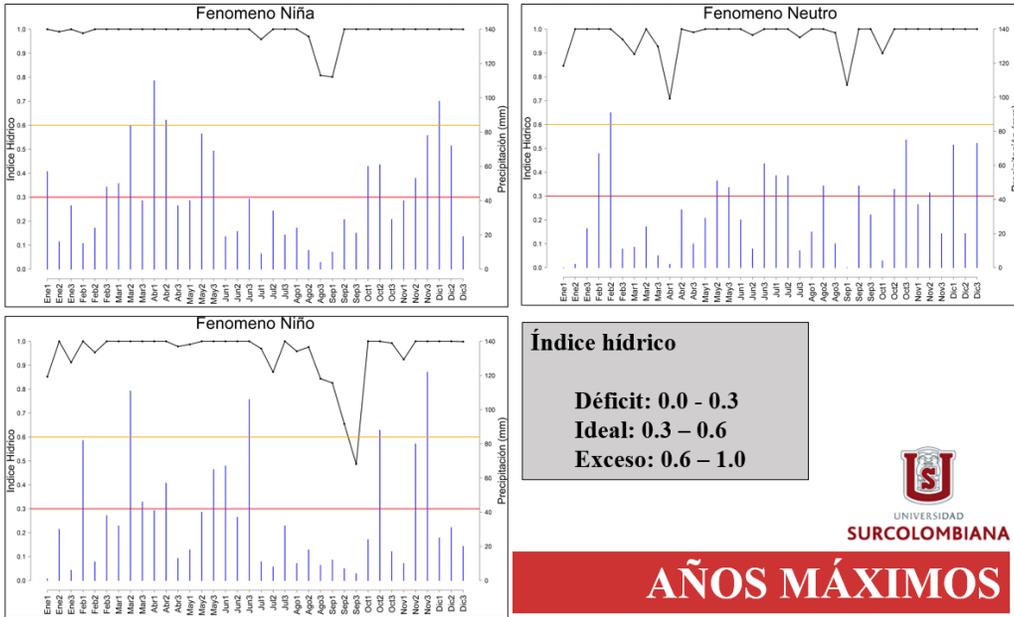


*ANEXO 11. Índice hídrico en años máximos, estación Oporapa.*



*ANEXO 12. Índice hídrico en años máximos, estación Acevedo.*

# ESTACIÓN LA ARGENTINA



ANEXO 13. Índice hídrico en años máximos, estación La Argentina.