

Impacto de los fenómenos del Niño y la Niña sobre las coberturas de cultivo del departamento de Boyacá.

Ing. Luis Andrés Díaz Suárez



Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería Civil Énfasis en Hidroambiental

2025

Impacto de los fenómenos del Niño y la Niña sobre las coberturas de cultivo del departamento de Boyacá.

Ing. Luis Andrés Díaz Suárez

Proyecto de grado en modalidad “Proyecto de Investigación” presentado como requisito para obtener el título de Magister en Ingeniería Civil con Énfasis en Hidroambiental.

Directores:

***PhD. Carlos Andrés Caro Camargo.* Director Interno USTA.**

***PhD. José Julián Villate Corredor.* Director Externo UPTC.**



Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería Civil Énfasis en Hidroambiental

2025



AGRADECIMIENTOS

A mis directores Carlos Andrés Caro de la Universidad Santo Tomás y a José Villate de la Universidad Pedagógica Tecnológica de Colombia. Por su interés y guía en este proyecto ya que esta investigación es la continuación de su trabajo. Para mí ha sido un gran honor convertirme en un investigador y docente gracias a su ejemplo.

DEDICATORIA

A mi esposa Ludy Paola Martínez, A mi Hija María Sofia Diaz a mis Madre Mayito. Son mi motor para salir adelante. Los amo. Gracias Dios por permitirme seguir aprendiendo con humildad y estoicismo. Memento Mori, Memento Vivere.

A la Memoria de mi Padre Luis Antonio Q.E.P.D:

De mi padre aprendí a montar bicicleta. Y aún guardo en el alma el instante en que me soltó. Y al mirar atrás, lo vi sonriendo mientras pedaleaba solo por primera vez.

De mi padre aprendí que cuando el amor de tu vida llega, no hay por qué seguir buscando. Que un hombre sin su familia por delante no ha entendido lo que es ser un hombre.

Aprendí que corregir a un hijo no es dureza, es amor que mira lejos, que sueña conformar a un hombre de bien.

Aprendí a no rendirme, a no buscar excusas cuando los objetivos tiemblan. Aprendí que controlar mis emociones es cuidar lo que pienso y lo que digo, porque todo lo que se siembra crece.

Y lo aprendí de un hombre perfecto e imperfecto, amoroso, valiente, lleno de aciertos y errores, ingenuo y sabio, frágil y fuerte.



Nota aceptación:

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Tunja, 11 julio de 2025.

CONTENIDO

ABSTRACT	11
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1.PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO	14
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	15
<i>2.1. Objetivo general.....</i>	<i>15</i>
<i>2.2 Objetivos Específicos</i>	<i>15</i>
3. JUSTIFICACION DEL PROYECTO	16
4. MARCO REFERENCIAL	17
<i>4.1 Estado del Arte.</i>	<i>17</i>
<i>4.2 Marco Teórico.....</i>	<i>18</i>
<i>4.2.1 Cambio Climático</i>	<i>19</i>
<i>4.2.2 Variabilidad y Cambio Climático en Colombia.....</i>	<i>22</i>
<i>4.2.3 Fenómeno del niño/niña</i>	<i>24</i>
<i>4.2.4 Impacto de los fenómenos El Niño y La Niña en la producción agrícola.....</i>	<i>26</i>
<i>4.2.5 Impacto de la climatología sobre el cultivo de la papa en Boyacá</i>	<i>28</i>
<i>4.2.6 Efectos de los fenómenos climáticos en la hidrología.....</i>	<i>28</i>
<i>4.2.7 Análisis de datos Faltantes</i>	<i>30</i>
<i>4.2.8 Análisis estadístico de series de tiempo.</i>	<i>32</i>
<i>4.2.9 Función de Correlación</i>	<i>32</i>
<i>4.2.10 Comportamiento de los datos.</i>	<i>33</i>
5. MARCO METODOLOGICO	35
<i>5.1 Hidrología estadística aplicada al proyecto.</i>	<i>36</i>
<i>5.1.1 Datos Iniciales</i>	<i>37</i>
<i>5.1.2 Completado mediante Chac</i>	<i>38</i>
<i>5.1.3 Homogeneidad de la serie histórica.</i>	<i>39</i>
<i>5.1.4 Estadística de datos.....</i>	<i>41</i>
<i>5.1.5 Coeficiente de correlación de Spearman</i>	<i>43</i>
<i>5.1.7 Selección de las estaciones influenciadas por El Niño y La Niña.....</i>	<i>45</i>



5.1.8 Información geográfica de Coberturas.	47
5.1.9 Análisis de impactos espaciales y económicos.....	47
5.1.10 Incertidumbres en la investigación.....	48
6. PRECIPITACIONES Y TEMPERATURAS EN BOYACÁ.....	49
7. LOS EFECTOS MACROCLIMATICOS DEL NIÑO Y LA NIÑA EN BOYACA.	53
7.1 Índice de Niño Oceánico - ONI	53
7.2 Índice de Oscilación Sur - SOI	55
8. PROCESO PARA LA CREACION DE MAPAS DE COBERTURAS DE CULTIVOS EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACA.....	57
8.0 Obtención de conjunto de imágenes satelitales	57
8.1 Postproceso de imagen.....	57
8.2.1 Composición de bandas.....	57
8.2.2 Creación del mosaico.....	58
8.3 Extracción de la zona de interés.....	58
8.4 Creación del uso de suelo	58
8.4.1 Creación de marcas de clase	58
8.4.2 Creación de firmas	60
8.4.3 Clasificación por máxima verosimilitud.....	60
8.5 Filtro de mayoración	61
8.6 Conversión ráster a polígono.....	61
8.7 Extracción de atributos de interés	61
8.8 Creación de mapa de zona de cultivo	61
9. ANALISIS MULTITEMPORAL DE COBERTURA DE CULTIVOS EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	62
10. IMPACTO DE LOS FENOMENOS DEL NIÑO Y LA NIÑA EN LOS CULTIVOS PRINCIPALES DEL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ	65
10.1 Análisis del impacto climático sobre el cultivo de la papa en Boyacá.....	65
10.2 Análisis de impacto climático del cultivo de caña panelera en Boyacá.....	68
10.3 Análisis de impacto climático del cultivo de cebolla en rama en Boyacá.	70
10.4 Análisis de impacto climático del cultivo de arveja en Boyacá.....	73
10.5 Análisis de impacto climático del cultivo de café en Boyacá.....	75
10.6 Análisis de impacto climático del cultivo de cacao en Boyacá.....	78
10.7 Análisis de impacto climático del cultivo de maíz en Boyacá.	81

10.8 Análisis de la Influencia ENSO entre los cultivos, la temperatura y la precipitación considerando tiempos de rezago.....	83
11. ANALISIS ESPACIAL DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN BOYACÁ.....	86
11.1 Análisis de tendencias de temperaturas.....	86
11.2 Análisis de la precipitación en Boyacá.....	87
11.3 Influencia en la distribución espacial del impacto de los fenómenos sobre precipitación respecto a la Niña.	90
11.4 Influencia en la distribución espacial del impacto de los fenómenos de precipitación y temperatura respecto al Niño.....	92
11.5 Modelación de Tendencias Térmicas en Boyacá al 2040 asociado al fenómeno ENSO.	94
12. CONCLUSIONES.....	96
<i>Referencias</i>	<i>97</i>

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 – Conceptos estadísticos - Precipitación.....	41
Tabla 2 – Conceptos estadísticos - Temperatura.	42
Tabla 3 – Correlación de Spearman.	43
Tabla 4 – Estadístico Descriptivos de Precipitación	49
Tabla 5 – Estadístico Descriptivos de Temperatura	50
Tabla 6 – Datos de Producción de Cultivo de la papa en el departamento de Boyacá.....	66
Tabla 7 – Datos de Producción de Cultivo de caña panelera en el departamento de Boyacá.	68
Tabla 8 – Datos de Producción de Cultivo de cebolla de rama en el departamento de Boyacá.	71
Tabla 9 – Datos de Producción de Cultivo de arveja en el departamento de Boyacá.	73
Tabla 10 – Datos de Producción de Cultivo de café en el departamento de Boyacá.	76
Tabla 11 – Datos de Producción de Cultivo de cacao en el departamento de Boyacá.	79
Tabla 12 – Datos de Producción de Cultivo de maíz en el departamento de Boyacá.	81

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Metodología general del Proyecto	36
Ilustración 2 – Localización geográfica del departamento de Boyacá y de las estaciones climatológicas de precipitación en Boyacá usadas para el estudio.....	51
Ilustración 3 – Localización geográfica del departamento de Boyacá y de las estaciones climatológicas de temperatura en Boyacá usadas para el estudio.	52
Ilustración 4 Zona de Cultivo	59
Ilustración 5 Zona de Bosque	60
Ilustración 6 Análisis de temporalidad de coberturas de cultivo en el departamento de Boyacá 1987 a 2019.....	63
Ilustración 7 Análisis de tendencias de temperatura en el departamento de Boyacá	86
Ilustración 8 Análisis de precipitaciones máximas año 2010 en el departamento de Boyacá	88
Ilustración 9 Análisis de precipitaciones año 2011 en el departamento de Boyacá	89
Ilustración 10 Análisis con rango de precipitaciones máximas año 2010 en el departamento de Boyacá.	90
Ilustración 11 Influencia en la distribución espacial del impacto de los fenómenos sobre precipitación respecto a la Niña.....	91
Ilustración 12 Influencia en la distribución espacial del impacto de los fenómenos sobre temperatura respecto al niño en el año 2016.	92
Ilustración 13 Influencia en la distribución espacial del impacto de los fenómenos sobre precipitación respecto al niño en el año 2016.	93
Ilustración 14 Zonas de cambio térmico al 2040 asociado al fenómeno de el niño en Boyacá.	94

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1 Distribución por cuartiles datos iniciales - precipitación	37
Gráfica 2 Distribución por cuartiles datos iniciales Temperatura	38
Gráfica 3 Análisis de doble masa - precipitación	40
Gráfica 4 Análisis de doble masa - Temperatura.....	41
Gráfica 5 Comportamiento precipitaciones bajas y temperaturas altas estación	45
Gráfica 6 Correlación de las estaciones de temperatura índice ONI.....	54
Gráfica 7 Eventos de temperaturas altas y precipitaciones bajas a nivel mensual entre 1983 a 2020	54
Gráfica 8 Índice Niño Oceánico (ONI)	55
Gráfica 9 Correlación de las estaciones de Temperatura con índice SOI	56
Gráfica 10 Serie histórica índice SOI.....	56
Gráfica 11 Evolución de coberturas de cultivos en Boyacá.....	64
Gráfica 12 Evolución de las áreas de cultivo de papa en el departamento de Boyacá.....	67
Gráfica 13 Evolución de la producción de cultivo de papa para el departamento de Boyacá.....	67
Gráfica 14 Evolución del rendimiento de cultivo de papa en el departamento de Boyacá..	67
Gráfica 15 Evolución de las áreas de cultivo de caña panelera en el departamento de Boyacá	69
Gráfica 16 Evolución de la producción de cultivo de caña panelera en el departamento de Boyacá	69
Gráfica 17 Evolución del rendimiento de cultivo de caña panelera en el departamento de Boyacá	70
Gráfica 18 Evolución de las áreas de cultivo de cebolla de rama en el departamento de Boyacá	71
Gráfica 19 Evolución de la producción de cultivo de cebolla de rama en el departamento de Boyacá.....	72
Gráfica 20 Evolución del rendimiento de cultivo de cebolla rama en el departamento de Boyacá	72
Gráfica 21 Evolución de área de cultivo de arveja en el departamento de Boyacá	74
Gráfica 22 Evolución de la producción de cultivo de arveja en el departamento de Boyacá.....	74
Gráfica 23 Evolución de rendimiento de cultivo de arveja en el departamento de Boyacá.	75
Gráfica 24 Evolución de áreas de cultivo de café en el departamento de Boyacá	77
Gráfica 25 Evolución de la producción de cultivo de café en el departamento de Boyacá	77
Gráfica 26 Evolución del rendimiento de cultivo de café en el departamento de Boyacá... ..	78
Gráfica 27 Evolución de áreas de cultivo de cacao en el departamento de Boyacá.....	79
Gráfica 28 Evolución de la producción de cultivo de cacao en el departamento de Boyacá.....	80
Gráfica 29 Evolución del rendimiento de cultivo de cacao en el departamento de Boyacá	80
Gráfica 30 Evolución de las áreas de cultivo de maíz en el departamento de Boyacá.	82
Gráfica 31 Evolución de la producción de cultivo de maíz en el departamento de Boyacá	82
Gráfica 32 Evolución del rendimiento de cultivo de maíz en el departamento de Boyacá..	83

ABSTRACT

In the last 20 years, the effect of the climatic anomalies produced by the El Niño and La Niña phenomenon in our country has become more evident. For this reason, it is necessary to continue the research of hydrology professionals in Colombia; to correlate the effects of precipitation and temperature in the department of Boyacá. In addition to this, it is important to know the correlation between the climatic effects and variables with the agricultural production of the region since it is a primary activity for the economic development of the inhabitants of the region. Therefore, it is proposed to analyze the impact of the El Niño and La Niña phenomena on various hydro climatological variables and the impact generated on the crop coverage of the department of Boyacá.

Statistical analyses of historical precipitation and temperature series were conducted using CHAC and PSPP (Statistical Package for the Social Sciences) to ensure continuity of the records. Spearman correlation analysis was applied between climatic variables, cultivated areas, and ENSO indices (SOI and ONI). Geographic Information System (GIS) tools were used to identify spatial dynamics of agricultural land cover in Boyaca and to evaluate its historical evolution. Additionally, data from the National Agricultural Survey (ENA) were integrated to validate trends and establish both quantitative and visual relationships between climate variability and agricultural productivity in Boyaca.

The expected contribution of this work is the awareness of the country's governmental and scientific entities, in order to find solutions to the decrease in economic development due to the agricultural activity of the department under the impacts produced by the El Niño and La Niña phenomena.

An analysis of historical series of the variables of precipitation (mm) and temperature (°C) is carried out. The missing data are calculated and the El Niño and La Niña events are correlated with the temporality of the last 50 years, to identify the presence of climatic phenomena and the impact on crop coverage and production. It was found that there is a resilience in the department to the decrease in crop coverage at a general level, however, when studying the impact in times of winter waves and extreme short-term droughts, losses are generated for the department according to the consecutive annual presence of the event in a given period.

Keywords: Climate change, El Niño, La Niña, Precipitation, Temperature

RESUMEN

Durante las dos últimas décadas, el impacto de las anomalías climáticas asociadas a los fenómenos de El Niño y La Niña se ha vuelto más notorio en el país. A razón de ello se hizo necesario continuar con las investigaciones de los profesionales en hidrología en Colombia; Con el propósito de analizar la relación entre la precipitación y la temperatura en el departamento de Boyacá. Adicional a esto es importante conocer la correlación entre los efectos climáticos y variables con la producción agropecuaria de la región, dado que es una actividad primordial. Con miras a contribuir al desarrollo económico de los pobladores de la región, se planteó como objetivo analizar la influencia de los fenómenos El Niño y La Niña sobre distintas variables hidroclimatológicas, así como su repercusión en la cobertura de cultivos en el departamento de Boyacá.

Se realizaron análisis estadísticos de series históricas de precipitación y temperatura, mediante CHAC y PSPP (Statistical Package for the Social Sciences), para garantizar continuidad de los registros. Se aplicó análisis de correlación de Spearman entre variables climáticas, áreas cultivadas y los índices ENSO (SOI y ONI). A través de herramienta SIG se identificaron dinámicas espaciales de cobertura agrícola en Boyacá, evaluando su evolución histórica. Complementariamente, se integraron datos de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA), para validar tendencias y establecer relaciones cuantitativas y visuales entre variabilidad climática y respuesta productiva en Boyacá.

El aporte de este trabajo es la concientización de los entes gubernamentales y científicos del país, en pro de encontrar soluciones al decrecimiento del desarrollo económico debido a la actividad agrícola del departamento, la cual se ve afectada por los impactos generados por los fenómenos de El Niño y La Niña.

Se llevó a cabo un estudio de las series históricas correspondientes a las variables de precipitación (mm) y temperatura (°C). Se calcularon los datos faltantes y se correlacionan los eventos Niño y Niña con la temporalidad de los últimos 50 años, para identificar la presencia de los fenómenos climáticos y la afectación en cobertura de cultivo y producción. Se encontró que existe una resiliencia en el departamento a la disminución de cobertura de cultivo a nivel general, pero, sin embargo; al estudiar el impacto en épocas de ola invernal y sequías extremas a corto plazo se generan pérdidas para el departamento de acuerdo a la presencia consecutiva anual del evento en un periodo dado.

Palabras clave: Cambio climático, Niño, Niña, Precipitación, Temperatura.



INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática es un factor concluyente en la productividad agrícola, especialmente en regiones donde los cultivos dependen en gran medida de las condiciones hidro climatológicas. En el departamento de Boyacá, los cambios asociados a fenómenos como El Niño y La Niña pueden tener un impacto significativo en la cobertura y rendimiento de cultivos esenciales para la economía local, como la papa y la cebolla. Por ello, es esencial contar con un análisis detallado que permita comprender estas afectaciones y crear estrategias de adaptación basadas en datos estadísticos.

Para abordar esta problemática, se realizó un completado de datos a partir de las estaciones disponibles en el departamento, aplicando diversas técnicas estadísticas como la media aritmética, la razón Q, el método de promedios y el método de relación normal, entre otros. Sin embargo, una de las primordiales limitaciones radica en la disponibilidad de información, ya que algunas estaciones pueden presentar periodos de inactividad. Esto resalta la importancia de llevar a cabo un análisis minucioso de las estaciones existentes y emplear múltiples métodos para maximizar el uso de datos en este estudio.

Dado que Boyacá es una zona geográficamente amplia, resulta esencial analizar la distribución de cultivos de papa y cebolla, los cuales representan una parte significativa de la economía regional Novoa Campos, J. A. (2020). Para ello, se precisó una segmentación territorial basada en la cartografía disponible, la cual servirá como línea base para correlacionar los resultados obtenidos de las estaciones hidro climatológicas.

En este contexto, el impacto del cambio climático en los cultivos del departamento, particularmente en los últimos años, debe ser evaluado con base en datos del IDEAM. La correlación de esta información permitirá actualizar las estadísticas y cuantificar la afectación real de las variables hidro climatológicas en las áreas de cultivo.

En este contexto, la pregunta principal que orienta esta investigación es: ¿De qué manera se han visto afectados los cultivos en el departamento de Boyacá, tanto en los últimos años como a lo largo del período registrado por las estaciones hidro climatológicas, frente a las manifestaciones del cambio climático observadas en Colombia y a nivel global? Este interrogante constituye el eje del estudio y pretende aportar información clave para la formulación de decisiones en los ámbitos agrícola y climático.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

Los cambios climatológicos asociados a los fenómenos de El Niño y La Niña han generado impactos negativos en la cobertura de cultivos en el departamento de Boyacá. Aunque esta afectación se percibe actualmente, resulta indispensable validarla a través de información confiable, como la suministrada por el IDEAM, mediante análisis de correlación que permitan actualizar las estadísticas y precisar el efecto real de estas variables hidro climatológicas sobre las zonas agrícolas del departamento.

En línea con este objetivo, se consideraron estudios previos como el de Corredor, Camargo y Guerrero (2008), titulado *"Efectos de los fenómenos macroclimáticos (El Niño y La Niña) sobre diferentes variables climatológicas en Boyacá"*. Esta investigación concluyó que la precipitación en el departamento presenta un comportamiento variable, concentrándose en un 50% en la zona sur y mostrando un patrón bimodal en la zona de páramo. En cuanto a la temperatura, se evidenció una afectación del 70% de cobertura del territorio durante eventos de La Niña y hasta un 90% durante El Niño. Asimismo, se determinó que este último fenómeno genera una mayor reducción en la producción de cultivos estratégicos: cebolla (24–31%), arveja (16–68%) y papa (11,66%).

El fenómeno ENSO (El Niño–Oscilación del Sur), que tiene una recurrencia de entre 2 y 7 años, se manifiesta por el calentamiento y enfriamiento del océano Pacífico ecuatorial frente a las costas de Perú y Ecuador. No obstante, sus implicaciones trascienden lo regional, generando alteraciones en la circulación atmosférica a gran escala y afectando ecosistemas tanto marinos como terrestres. Las anomalías climáticas vinculadas al ENSO provocan fenómenos extremos como sequías, precipitaciones anómalas, lluvias torrenciales, tormentas tropicales e inundaciones, con consecuencias económicas significativas.

Los avances en la modelación climática han consolidado al ENSO como una de las líneas de investigación más sólidas y prometedoras en el ámbito científico actual (Valiente, 1999). En el caso del departamento de Boyacá, se han identificado asociaciones claras entre la oscilación ENSO, la temperatura, la precipitación y su efecto sobre los cultivos. Estas relaciones permiten realizar simulaciones agrícolas, como las del cultivo de papa, bajo escenarios diarios de variabilidad climática y proyecciones de cambio climático en condiciones comerciales.

A nivel nacional, se han registrado con mayor claridad los impactos de La Niña, dados los frecuentes desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos como inundaciones y deslizamientos. En regiones como la Sabana de Bogotá se han observado alteraciones en las condiciones climáticas actuales, atribuibles a la variabilidad natural más que a los escenarios proyectados por modelos de cambio climático a largo plazo (Rojas Barbosa, 2011).



Actualmente, la necesidad de desarrollar este tipo de investigaciones es cada vez más evidente, considerando la estrecha relación entre el clima y el rendimiento agrícola. Las prácticas del ciclo agrícola (siembra, aporque, deshierbe, aplicación de insumos y cosecha) dependen del comportamiento del clima, y cualquier desviación de las condiciones promedio puede comprometer su eficacia y, por ende, la productividad. Además, los cambios en la humedad del aire y del suelo están vinculados con la aparición de plagas y enfermedades, afectando la calidad y resistencia de los cultivos frente a condiciones ambientales adversas (Petzoldt y Seaman, 2005).

En consecuencia, esta investigación plantea como pregunta central:

¿Cuál ha sido la afectación de los cultivos en el departamento de Boyacá durante los últimos años, en función del comportamiento registrado por las estaciones hidroclimatológicas y el cambio climático evidenciado en Colombia?

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

Los fenómenos del Niño y la Niña, son eventos climáticos a gran escala que impactan significativamente las condiciones hidro climatológicas en diversas regiones del mundo. En Colombia, y particularmente en el departamento de Boyacá, estos fenómenos alteran patrones de precipitación y temperatura, con este estudio se buscará la evidencia en que de manera sustancial se puede afectar la cobertura de cultivos en el departamento. Por tanto, para el estudio se plantean los siguientes objetivos:

2.1. Objetivo general

Analizar el impacto de los fenómenos del Niño y La Niña sobre las variables hidro climatológicas de precipitación (mm) y temperatura (°C) en la afectación que generan en la cobertura de cultivos en el departamento de Boyacá.

2.2 Objetivos Específicos

Obtener y analizar información gráfica y estadística que permita establecer el comportamiento de las principales variables hidro climatológicas (precipitación y temperatura) para el departamento de Boyacá.

Analizar la correlación existente entre el comportamiento climatológico del departamento de Boyacá y el fenómeno del niño y la niña, teniendo como base los índices SOI (Índice de Oscilación del Sur).

Establecer el impacto del comportamiento climatológico sobre las coberturas de cultivo del departamento a partir de la incidencia climática y su variación en las diferentes zonas de Boyacá.

3. JUSTIFICACION DEL PROYECTO

Resulta fundamental evidenciar ante la comunidad del departamento de Boyacá la estrecha relación que existe entre la producción agrícola y las variaciones hidroclimáticas generadas por los fenómenos de El Niño y La Niña. Es necesario promover una mayor conciencia sobre el impacto económico que estos eventos ocasionan en la principal actividad económica del territorio: la agricultura. A través de esta investigación, se busca brindar herramientas a las entidades y a la sociedad para comprender la importancia de anticiparse a las posibles reducciones en la producción, como una medida clave para garantizar la seguridad alimentaria.

El objetivo principal fue analizar los efectos de los fenómenos de El Niño y La Niña en el departamento de Boyacá, reconociendo la relevancia que tienen estos eventos climáticos en la variabilidad del clima regional y su repercusión directa sobre el sector agrícola y la economía local.

Boyacá al tener una geografía diversa y un fuerte sustento y vinculación a actividades agropecuarias, se observa especialmente afectado por las sequías prolongadas que acompañan al Niño y las lluvias intensas derivadas de la Niña. Estas condiciones extremas pueden afectar de manera importante la cobertura de cultivos en el departamento.

El análisis de estos impactos permitirá no solo comprender mejor la vulnerabilidad del departamento frente a estos eventos climáticos, sino también proponer estrategias de adaptación y mitigación que contribuyan a reducir sus efectos adversos. De este modo, este estudio busca ser un insumo valioso para la planificación y gestión del riesgo en Boyacá, beneficiando tanto a las comunidades rurales como a los tomadores de decisiones.

Desde lo académico la investigación propuesta se hace fundamental dado que contribuye al estudio de dos fenómenos macro climáticos desde un enfoque científico correlacional. Esto puede suponer una contribución para la proposición de futuras investigaciones

Desde lo social, la investigación a formular también se justifica dado que contribuye en el análisis de un fenómeno climático con un profundo impacto económico, el cual es condicionante de la situación de bienestar de los diferentes grupos de interés ligados a la actividad agrícola, y cuya investigación puede resultar en la proposición de planes o medidas de gestión.

Esta investigación aporta significativamente al fortalecimiento del conocimiento académico sobre la relación entre el fenómeno El Niño y las dinámicas agroclimáticas a nivel regional, mediante la integración de análisis estadísticos y espaciales que permiten comprender sus efectos. En el ámbito social, ofrece elementos clave para la formulación de políticas públicas y el diseño de estrategias de adaptación en comunidades rurales, contribuyendo a mejorar la resiliencia de los sistemas productivos frente a eventos climáticos extremos.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 Estado del Arte.

La pandemia de la COVID-19 representó un obstáculo significativo para el avance del desarrollo sostenible en Colombia, acentuando diversos problemas de sostenibilidad que ya enfrentaba el país. Se debe generar un nuevo contrato social y redefinir el desarrollo sostenible para Colombia en particular. Las entidades deben enfocarse en el patrimonio invaluable de la biodiversidad colombiana. Conviene explorar nuevas fuentes de producción de energía limpia en nuestro país. La educación debe ser un instrumento de concientización sobre la sostenibilidad mas no una herramienta de adoctrinamiento político. Cuando se habla de que “somos La Colombia Insostenible”. “Somos”, toma un particular significado de sentido de pertenencia y de responsabilidad en nosotros mismos. Olvidando la diferencia con los otros y totalmente enfocados los colombianos en salvaguardar nuestro patrimonio invaluable de recursos naturales.

El departamento de Boyacá, se distingue por su actividad agropecuaria. Cualquier anomalía en el régimen regular de lluvias puede generar consecuencias económicas en su producción a gran escala. Por tanto, se hace necesario comprender las anomalías del clima en la región y medir la oferta hídrica disponible del departamento de Boyacá. En el uso del suelo, se observa una clara afectación en la producción en toneladas en los principales productos agrícolas del Departamento (papa, alverja y cebada) en los eventos climáticos entre la década del 2000 y 2008 (Corredor, Camargo y Guerreiro 2008). Este proyecto permitirá complementar lo ya trabajado por el Doctor Carlos Caro y el Doctor Julián Villate puesto que se tienen más datos con 12 años de información adicional.

Durante las últimas dos décadas, se ha cuestionado de manera recurrente la existencia de una posible relación entre fenómenos macroclimáticos como El Niño y La Niña y el comportamiento hidrológico de distintas cuencas hidrográficas a nivel mundial. A nivel nacional la Universidad de los Andes, Universidad Nacional y el IDEAM principalmente, han investigado sobre los efectos macro climáticos en Colombia.

Se reconoce la importancia de establecer la correlación entre los fenómenos macroclimáticos y el comportamiento hidro climático de la región, con el fin de comprender mejor sus efectos y contribuir a una gestión más informada de los recursos naturales.; en el contexto de estudio el antiplano Cundiboyacense el clima no es uniforme, la precipitación cambia de acuerdo a diferentes zonas, para el caso de la temperatura se observa un solo tipo de comportamientos con ciclos anuales para todo el antiplano, razón por la que según Corredor (2008) en la zona cundiboyacense el fenómeno macro climático más influyente es el del niño.

4.2 Marco Teórico

Uno de los principales retos en el análisis de variables hidroclimáticas es la limitada disponibilidad o la baja calidad de los datos, lo que dificulta estudios precisos. Sin embargo, con el paso del tiempo, la acumulación progresiva de información justifica la continuidad de investigaciones como esta, ya que año tras año se incrementan los registros útiles para el análisis (Villate, 2004). Este estudio busca profundizar en la comprensión del impacto del clima sobre la producción agropecuaria en el departamento de Boyacá, ofreciendo beneficios teóricos y aplicables tanto a entidades gubernamentales como a la comunidad investigadora.

El evento de El Niño ocurrido entre 1997 y 1998 fue considerado, en su momento, uno de los más intensos, y aunque se caracterizó por una reducción general de lluvias, también desencadenó fenómenos localizados como movimientos en masa, con consecuencias económicas importantes para Colombia (Sánchez et al., 2001). Posteriormente, La Niña se manifestó rápidamente en 1998 y se prolongó hasta mediados del año 2000, incrementando significativamente los deslizamientos en el país.

En esa misma línea, un estudio realizado por la Universidad Autónoma de Bucaramanga analizó el efecto de El Niño y La Niña sobre los créditos agropecuarios destinados al cultivo de papa en Colombia entre 2010 y 2019. Se identificó que durante el periodo 2010–2014, los eventos de El Niño redujeron la cantidad de créditos en aproximadamente 18 puntos porcentuales frente a periodos sin anomalías climáticas (Astrid et al., 2021). Este tipo de información representa una herramienta valiosa para el diseño de indicadores económicos que permitan anticipar el posible deterioro en la producción agropecuaria durante eventos extremos.

La experiencia acumulada por los agricultores también ha permitido definir calendarios de siembra basados en patrones climáticos históricos. Sin embargo, fenómenos como El Niño y La Niña han alterado dichos patrones, afectando directamente el rendimiento de los cultivos. Así lo demuestra el estudio de Sepúlveda Delgado et al. (2015), donde se evaluó el impacto del clima sobre el cultivo de papa y pastos en la región central de Boyacá mediante sistemas dinámicos.

En el año 1997, aproximadamente el 2,4% del área sembrada en Colombia resultó afectada por déficit hídrico, impactando principalmente a regiones como la Andina y la Caribe, y cultivos como café, arroz, plátano, papa, frijol, yuca, maíz y algodón. En particular, la producción de papa registró una disminución del rendimiento del 3,8% entre 1997 y 1998, lo que confirma que el sector agrícola es altamente vulnerable ante fases extremas de la variabilidad climática (Pabón Caicedo y Montealegre Bocanegra, 2017).

El departamento del Atlántico también ha sido objeto de estudios que evidencian cómo las sequías y las lluvias intensas asociadas a ENSO han generado inundaciones o déficit de precipitaciones que reducen el rendimiento de los cultivos (Ruiz, 2012).

En cuanto a las presiones ambientales, Boyacá enfrenta una deforestación considerable. Entre 1985 y 2003 se perdieron más de 235.000 hectáreas de bosque, equivalentes al 10,16% del área departamental, principalmente debido al uso inadecuado del suelo para actividades agrícolas y mineras. Las zonas más afectadas incluyen municipios como Miraflores, Camphormoso, San Luis de Gaceno, Santa María, Labranza Grande, Pajarito, Chiscas, Güicán y Curabá (Perico, Garavito y Suárez, 2014).

El cambio climático también ha dejado huella en ecosistemas frágiles como el Nevado del Cocuy, donde la pérdida de cobertura glaciaria ha sido alarmante: en tan solo una década se ha reducido en un 50%. Para el año 2018 se evidenció un aumento significativo de temperatura y una pérdida de más de 36 km² de hielo por década, lo que demuestra una clara relación entre el calentamiento y la disminución de la precipitación.

A nivel global, entre 1901 y 2010, el nivel medio del mar aumentó aproximadamente 0,19 metros, con una tasa de aceleración significativa desde 1993. Según los escenarios proyectados (RCP), se espera que la temperatura global continúe en aumento durante el siglo XXI, dependiendo de la trayectoria de emisiones (Stocker y Qin, 2018).

En los ecosistemas terrestres, las actividades humanas como la agricultura intensiva, el uso de agroquímicos y las prácticas de monocultivo están alterando los patrones naturales de biodiversidad. Por ello, se hace necesaria la implementación de tecnologías sostenibles que mejoren la relación entre los sistemas agrícolas, la ciudadanía y el entorno natural (Reyes-Palomino y Cano Ccoa, 2022).

Es esencial abordar estos temas con respaldo científico para evitar alarmismos sin fundamento. Como lo plantea Latour (2019), la naturaleza no debe tratarse como una doctrina sino comprenderse desde su complejidad, evitando confundir las causas naturales con visiones dogmáticas.

Con base en lo anterior, el presente proyecto busca integrar variables hidrológicas, económicas y de cobertura del suelo, con el fin de analizar de forma integral la afectación que generan las anomalías hidroclimáticas en los cultivos más representativos del departamento de Boyacá. Este enfoque permitirá aportar un valor agregado al estado del arte actual y generar insumos útiles para la planificación territorial, la seguridad alimentaria y la mitigación de los impactos del cambio climático sobre la producción agropecuaria.

4.2.1 Cambio Climático

El cambio climático es uno de los desafíos más apremiantes de los últimos tiempos, y su impacto se hace sentir cada vez más en todo el mundo. Se trata de un fenómeno complejo y multifacético que abarca una amplia gama de aspectos, desde la ciencia subyacente hasta las implicaciones políticas y económicas. El cambio climático se debe principalmente a la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera de la Tierra. Estos gases, que incluyen dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), atrapan el calor del sol y aumentan la temperatura de la Tierra en un proceso conocido como el efecto invernadero (Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático [IPCC], 2013). A lo largo de la historia de la Tierra, este efecto ha sido fundamental para mantener el planeta lo suficientemente cálido como para albergar vida.

Sin embargo, la actividad humana ha alterado significativamente el equilibrio natural de estos gases. La quema de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas natural, para la generación de energía y el transporte, ha liberado grandes cantidades de CO₂ en la atmósfera.

La deforestación y la agricultura intensiva también liberan CO₂ y CH₄ (Sierra Herrera, 2019). Estas actividades han llevado a un aumento constante en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, lo que a su vez ha provocado un aumento en la temperatura global.

Los efectos del cambio climático son variados y se manifiestan en todo el mundo. Uno de los impactos más evidentes es el aumento de la temperatura media de la Tierra. Las temperaturas récord, olas de calor mortales y fenómenos climáticos extremos se están volviendo cada vez más comunes. Esto tiene consecuencias graves para la salud humana, la agricultura y la biodiversidad (Melo et al., 2018).

El deshielo de los glaciares y las capas de hielo en los polos está contribuyendo al aumento del nivel del mar. Las ciudades costeras y las regiones bajas están en riesgo de inundaciones más frecuentes y graves. Además, las comunidades insulares enfrentan la amenaza directa de desaparecer bajo el agua a medida que el nivel del mar continúa aumentando.

Los patrones de precipitación también están cambiando. Algunas áreas experimentan sequías prolongadas, mientras que otras enfrentan inundaciones repentinas. Esto afecta la disponibilidad de agua dulce y agrava la escasez de alimentos en muchas partes del mundo (Cortés Zambrano, 2006). La acidificación de los océanos es otro efecto preocupante del cambio climático. El CO₂ atmosférico se disuelve en el agua del mar, lo que reduce el pH y afecta a los organismos marinos que dependen de la calcificación, como los corales y los moluscos (Díaz Cordero, 2012). Esto puede tener consecuencias devastadoras para los ecosistemas marinos y la pesca.

Los ecosistemas terrestres también están siendo perturbados. La migración de especies y la alteración de los ciclos de reproducción y migración son ejemplos de cómo el cambio climático está afectando a la biodiversidad. Algunas especies enfrentan la amenaza de la extinción debido a la pérdida de hábitats y la incapacidad de adaptarse lo suficientemente rápido a las nuevas condiciones. Dada la magnitud del problema, la comunidad internacional ha tomado medidas para abordar el cambio climático (Herrera et al., 2012). Uno de los hitos más importantes fue el Acuerdo de París, adoptado en 2015. En este acuerdo, 196 países se comprometieron a limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2 grados Celsius por encima de los niveles preindustriales, con el objetivo de limitarlo a 1,5 grados Celsius.

Los compromisos del Acuerdo de París se basan en las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) de cada país. Estas son metas específicas de reducción de emisiones que cada nación se compromete a cumplir. Sin embargo, hasta la fecha, muchas NDC no son lo suficientemente ambiciosas como para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París. Además del Acuerdo de París, ha habido una serie de iniciativas globales para abordar el cambio climático (García et al., 2012). Estos incluyen el Fondo Verde para el Clima, que busca financiar proyectos de mitigación y adaptación en países en desarrollo, y la Iniciativa 20x20, que se centra en la restauración de tierras degradadas en América Latina.



A pesar de los esfuerzos internacionales, el cambio climático sigue siendo un tema políticamente controvertido en muchos países. La lucha contra el cambio climático a menudo enfrenta la resistencia de intereses económicos arraigados en la industria de los combustibles fósiles y otras actividades con altas emisiones de carbono. El costo de la transición a una economía baja en carbono también es un desafío importante. La inversión en energías renovables y tecnologías limpias es costosa, y muchos gobiernos y empresas luchan por equilibrar la necesidad de reducir las emisiones con las preocupaciones económicas y laborales.

Además, el cambio climático no afecta a todas las comunidades por igual. Las naciones más ricas y desarrolladas suelen tener más recursos para adaptarse a los cambios climáticos, mientras que las comunidades más pobres y vulnerables son las más afectadas. Esto plantea cuestiones de equidad y justicia que deben abordarse en cualquier estrategia de mitigación y adaptación. Si bien las soluciones al cambio climático son complejas y requieren acciones a nivel global y nacional, también hay un papel importante para las acciones individuales y comunitarias. Reducir la huella de carbono personal es esencial. Esto puede hacerse optando por medios de transporte más sostenibles, reduciendo el consumo de carne y productos de origen animal, y mejorando la eficiencia energética en el hogar.

Utilizar energía renovable en el hogar o apoyar políticas que fomenten la transición a fuentes de energía limpias es una forma efectiva de reducir las emisiones de carbono. Elegir productos y alimentos producidos de manera sostenible puede reducir la demanda de recursos naturales y disminuir las emisiones de carbono asociadas con la producción y el transporte.

Unirse a grupos locales que trabajen en proyectos de sostenibilidad y promuevan políticas ambientales puede tener un impacto significativo a nivel comunitario. Participar en la política y presionar a los líderes gubernamentales y corporativos para que tomen medidas más enérgicas contra el cambio climático es fundamental. Compartir información y concienciar a otros sobre los riesgos del cambio climático y las acciones que se pueden tomar es esencial para construir un movimiento más amplio y eficaz.

La ciencia desempeña un papel fundamental en la comprensión y la lucha contra el cambio climático. Los científicos de todo el mundo han estado estudiando el clima durante décadas, recopilando datos sobre las tendencias climáticas y desarrollando modelos que nos ayudan a predecir cómo cambiará el clima en el futuro.

Uno de los aspectos más notables de la ciencia del cambio climático es el consenso científico abrumador sobre la causa humana del calentamiento global (Villate Corredor, 2004). Numerosos informes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) han confirmado que las actividades humanas son responsables de la mayor parte del aumento de las temperaturas observado desde la Revolución Industrial.

Además de comprender las causas y los efectos del cambio climático, la ciencia también desempeña un papel clave en el desarrollo de tecnologías y estrategias de mitigación y adaptación. La investigación en energías renovables, captura y almacenamiento de carbono, agricultura sostenible y muchas otras áreas es esencial para abordar este desafío global.

A medida que los efectos del cambio climático se vuelven más evidentes y graves, la necesidad de tomar medidas urgentes se hace más evidente. La ventana de oportunidad para limitar el aumento de la temperatura global a 1,5 grados Celsius, como se establece en el Acuerdo de París, se está cerrando rápidamente. Si no se toman medidas drásticas para reducir las emisiones de carbono en las próximas décadas, la sociedad enfrentará consecuencias catastróficas.

Las acciones que se toman hoy tendrán un impacto duradero en el futuro de nuestro planeta y las generaciones venideras. A medida que se avanza hacia un futuro más sostenible, se debe considerar cuidadosamente cómo reducir las emisiones, adaptarnos a los cambios inevitables y trabajar como una comunidad global para abordar este desafío existencial.

4.2.2 Variabilidad y Cambio Climático en Colombia

La variabilidad climática y el cambio climático son fenómenos estrechamente vinculados que han captado la atención global en las últimas décadas. Colombia, ubicada en la región noroccidental de América del Sur, no ha sido ajena a estos procesos. Si bien el país ha experimentado transformaciones climáticas a lo largo de su historia, en los últimos años estas alteraciones se han manifestado con mayor intensidad, generando creciente preocupación.

Para comprender estos fenómenos en el contexto colombiano, resulta fundamental examinar los factores que los originan y sus efectos sobre el territorio. Colombia se distingue por su notable diversidad geográfica y topográfica. Su proximidad al ecuador y su localización entre Venezuela, Brasil, Perú, Ecuador y Panamá, configuran un entorno climático complejo. El relieve colombiano está dominado por tres sistemas montañosos principales: la cordillera de los Andes, la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía de la Macarena, los cuales ejercen una influencia decisiva sobre la distribución espacial de las condiciones climáticas.

Debido a esta complejidad topográfica, el país presenta una marcada diversidad climática. Entre las regiones más representativas se encuentran la zona Caribe, la región Andina, la Amazonía y la región del Pacífico, cada una con rasgos climáticos particulares. Esta heterogeneidad regional contribuye de manera significativa a la alta variabilidad climática observada en Colombia.

La variabilidad climática ha sido una constante en la historia de Colombia. El país ha experimentado una serie de eventos climáticos extremos a lo largo de los años, como sequías e

Las inundaciones en Colombia pueden explicarse por múltiples factores, entre ellos las variaciones naturales en los patrones climáticos, como las asociadas a los fenómenos de El Niño y La Niña, así como por causas antrópicas como la deforestación y el crecimiento urbano desorganizado (Melo et al., 2018).

El Niño, caracterizado por un incremento anómalo de la temperatura superficial del océano Pacífico tropical, ha producido notables impactos en el país, como la intensificación de las sequías y el aumento de las temperaturas en diversas regiones. En contraste, La Niña, que implica un enfriamiento anormal de esas mismas aguas, se ha asociado a precipitaciones excesivas y a deslizamientos de tierra en zonas montañosas (Moreno & González, 2011).

El cambio climático, por su parte, es un fenómeno de alcance global que afecta también a Colombia. Su origen principal se encuentra en la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI), tales como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), los cuales atrapan la radiación solar, contribuyendo al incremento de la temperatura media del planeta. Estas emisiones provienen, en su mayoría, de actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, la expansión agropecuaria y la deforestación.

En el contexto colombiano, los sectores agrícola, ganadero y forestal son responsables de una porción significativa de las emisiones de GEI. La tala de bosques, en particular, ha representado una fuente crítica de liberación de carbono, debido a la pérdida de cobertura vegetal. Además, el crecimiento urbano y el desarrollo de infraestructura han intensificado la demanda energética y el uso del transporte, incrementando así las emisiones contaminantes (Montealegre, 2007).

Colombia ya está experimentando efectos visibles del cambio climático, los cuales impactan tanto al ambiente como a distintos sectores de la sociedad. Se ha identificado un aumento progresivo en las temperaturas medias en las últimas décadas, con consecuencias sobre la salud pública, la producción agrícola y la estabilidad de los ecosistemas. También se han documentado alteraciones en los patrones de precipitación, evidenciando lluvias más intensas en ciertos periodos y sequías prolongadas en otros, lo que afecta la disponibilidad hídrica y la actividad agropecuaria.

El retroceso de los glaciares andinos, provocado por el calentamiento global, está comprometiendo las fuentes hídricas que abastecen a múltiples comunidades. Asimismo, las zonas costeras enfrentan el riesgo del ascenso del nivel del mar, lo que podría traducirse en procesos de erosión y pérdida de territorio.

La biodiversidad también se está viendo afectada por estas alteraciones climáticas, lo cual se refleja en cambios en las rutas migratorias de aves y en la distribución geográfica de diversas especies. Colombia, al ser un país vulnerable a fenómenos como deslizamientos e inundaciones, enfrenta un riesgo mayor ante el aumento en la frecuencia e intensidad de dichos eventos.

Reconociendo este panorama, tanto el gobierno colombiano como la comunidad internacional han adoptado medidas orientadas a la mitigación de emisiones y a la adaptación frente a los efectos del cambio climático, como parte de un esfuerzo por preservar el bienestar ambiental y social del país.

Colombia se ha comprometido a reducir sus emisiones de GEI, mediante la promoción de energías renovables, la protección de los bosques y la implementación de prácticas agrícolas sostenibles. Se están desarrollando programas para fortalecer la resiliencia de las comunidades ante los impactos del cambio climático, como la construcción de infraestructura resistente al clima y la promoción de prácticas agrícolas resilientes.

Así mismo, se están tomando medidas para proteger los ecosistemas colombianos, como la creación de parques nacionales y reservas naturales. En conjunto se realizan campañas de concienciación para informar a la población sobre el cambio climático y la importancia de reducir su huella de carbono. Colombia trabaja con otros países y organismos internacionales para abordar el cambio climático a nivel global y regional.

A pesar de los esfuerzos realizados, Colombia enfrenta desafíos significativos en su lucha contra el cambio climático. El país debe equilibrar el desarrollo económico con la protección del medio ambiente y la adaptación a los impactos inevitables del cambio climático. Además, es esencial abordar la deforestación y reducir las emisiones de GEI de manera más efectiva.

4.2.3 Fenómeno del niño/niña

El fenómeno de El Niño ocurre de forma no periódica, con una frecuencia aproximada de cada dos a siete años y una duración variable de varios meses. Uno de sus efectos más significativos es la alteración de los patrones de lluvia y temperatura en distintas partes del mundo, lo cual repercute de forma directa en la disponibilidad de recursos hídricos, la producción agrícola, los ecosistemas, la salud pública y las economías locales (Gutiérrez Torres, 2019).

En el contexto colombiano, El Niño suele manifestarse principalmente mediante una marcada reducción en las precipitaciones. Durante estos eventos, el calentamiento anómalo de las aguas superficiales del Pacífico tropical disminuye la evaporación y, en consecuencia, limita la formación de nubes y la ocurrencia de lluvias en diversas regiones del país (Corredor et al., 2008). Esta reducción de las lluvias conlleva episodios de sequía severa, con efectos directos sobre sectores altamente dependientes del régimen hídrico, como la agricultura.

La sequía, como impacto inmediato de El Niño, representa una amenaza crítica para la seguridad alimentaria, en especial en regiones agrícolas como la costa Caribe y la zona andina. La escasez de lluvias compromete los rendimientos de los cultivos, reduce los caudales de ríos y limita la disponibilidad de agua para consumo humano y animal (Corredor et al., 2008).

Otro efecto relevante de este fenómeno es el incremento de las temperaturas. Durante los episodios de El Niño, los valores térmicos se elevan considerablemente, afectando sobre todo a las zonas urbanas donde la densidad poblacional es alta. Estas condiciones pueden derivar en olas de calor, provocando deshidratación, estrés térmico y complicaciones respiratorias, que representan un riesgo para la salud pública (Ruiz, 2012).

Los impactos de El Niño no se limitan a la salud o la agricultura. También afectan significativamente a los ecosistemas. La reducción de las lluvias puede alterar la dinámica de los cuerpos de agua, aumentar el riesgo de incendios forestales y degradar hábitats naturales, lo que se traduce en pérdida de biodiversidad y deterioro de los servicios ecosistémicos (Montealegre, 2007).

Desde el punto de vista económico, El Niño puede afectar gravemente sectores clave como el agrícola, energético, turístico y de la construcción. Las pérdidas en la producción agrícola provocadas por la sequía conducen a la escasez de alimentos y al incremento en los precios de los productos básicos (Moreno & González, 2011). Asimismo, la generación hidroeléctrica se ve comprometida por la disminución de los niveles en los ríos, afectando la seguridad energética del país.

Otros sectores, como la construcción, enfrentan dificultades por las altas temperaturas y la escasez de agua, mientras que el turismo puede verse afectado por la reducción en la calidad ambiental y la incomodidad climática para los visitantes.

Ante estos desafíos, el Estado colombiano ha implementado diversas estrategias para mitigar los efectos de El Niño. Estas incluyen la vigilancia permanente de las condiciones climáticas, el desarrollo de planes de contingencia para enfrentar sequías y olas de calor, y la promoción de prácticas agrícolas adaptadas a la escasez hídrica (Ruiz, 2012).

También se han impulsado mejoras en la gestión del recurso hídrico, como la construcción de embalses, campañas de uso eficiente del agua y educación ambiental. La preparación comunitaria y la conciencia ciudadana juegan un papel clave en la capacidad de respuesta frente a eventos climáticos extremos.

Finalmente, se ha reconocido la importancia de fortalecer la investigación científica y la cooperación internacional para el estudio del fenómeno El Niño. Comprender sus causas, dinámica y efectos es fundamental para anticipar escenarios de riesgo y diseñar medidas preventivas eficaces que salvaguarden tanto la población como los ecosistemas

4.2.4 Impacto de los fenómenos El Niño y La Niña en la producción agrícola.

Los fenómenos de El Niño y La Niña, ambos componentes del sistema climático conocido como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), constituyen eventos de gran relevancia a escala global debido a su fuerte incidencia sobre el clima y la producción agrícola. El Niño se caracteriza por un calentamiento inusual de las aguas superficiales del océano Pacífico tropical, mientras que La Niña implica su enfriamiento (Moreno & González, 2011).

La ocurrencia de El Niño es irregular, generalmente cada 2 a 7 años, y su duración puede extenderse durante varios meses. Este fenómeno tiene la capacidad de alterar los patrones de precipitación y temperatura en diferentes regiones del planeta, generando, según el lugar, lluvias excesivas o sequías prolongadas (Ruiz, 2012). En ambos casos, los efectos sobre la agricultura son significativos.

Las precipitaciones extremas provocadas por El Niño pueden generar inundaciones, deslizamientos de tierra, erosión del suelo y deterioro de las fuentes hídricas, afectando negativamente la infraestructura productiva. Por el contrario, en zonas donde predomina la disminución de lluvias, la sequía puede causar pérdidas masivas de cultivos y agotamiento de las reservas de agua para riego y consumo (Moreno & González, 2011). Además, el aumento de las temperaturas asociado a El Niño impacta el crecimiento, la calidad y el rendimiento de los cultivos, acentuando el estrés térmico en las plantas.

Al analizar casos específicos, se observa que en América del Sur, este fenómeno con frecuencia produce lluvias torrenciales en la franja costera occidental, afectando seriamente a países como Perú y Ecuador, donde los cultivos básicos —como el arroz, el maíz y otros alimentos esenciales— sufren importantes pérdidas, comprometiendo la seguridad alimentaria (Corredor et al., 2008). En contraste, regiones como Australia experimentan condiciones más cálidas y secas, lo que repercute en la disminución de la producción de trigo, cebada y algodón, y genera estrés en el ganado, reduciendo su rendimiento productivo.

En África, El Niño suele estar asociado a condiciones de aridez en las zonas oriental y meridional del continente. Este déficit hídrico afecta particularmente a las comunidades que dependen de la agricultura de subsistencia, generando escasez de alimentos y elevación de precios, lo cual agrava la vulnerabilidad alimentaria (Rodríguez Lara et al., 2023).

Un caso regional relevante es el de la "Canícula Mexicana", un periodo seco intensificado durante eventos de El Niño que impacta gravemente la producción de maíz, generando reducción de rendimientos y dependencia de las importaciones alimentarias. De igual forma, en el sudeste asiático, este fenómeno suele traer sequías severas que afectan al cultivo del arroz. En Estados Unidos, especialmente en el suroeste y las Grandes Llanuras, se han registrado sequías durante El Niño que perjudican la producción de cereales como maíz y trigo.

Por otro lado, La Niña, considerada la fase opuesta de ENOS, se caracteriza por un enfriamiento anormal de las aguas del Pacífico ecuatorial. Si bien sus efectos también son globales, suelen diferir de los generados por El Niño (Gutiérrez Torres, 2019). En vez de sequías y calor, La Niña suele provocar un aumento en las precipitaciones y condiciones más frías.

En América del Sur, por ejemplo, La Niña puede desencadenar lluvias intensas en la región costera, con riesgo de inundaciones que afectan la actividad agrícola. Sin embargo, en ciertas zonas del interior, como Argentina, las condiciones húmedas que genera La Niña pueden ser favorables, incrementando el rendimiento de cultivos como maíz y soja (Roel et al., 2020). De forma similar, en Australia, este fenómeno tiende a favorecer la recuperación hídrica después de períodos de sequía, aunque el exceso de lluvia también puede resultar perjudicial si genera inundaciones.

En el sudeste asiático, La Niña produce precipitaciones abundantes que a menudo derivan en inundaciones y deslizamientos, afectando cultivos como el arroz. En Estados Unidos, puede provocar condiciones más secas en el sureste y las Grandes Llanuras, afectando la agricultura de esas zonas.

Es importante señalar que el impacto de estos fenómenos varía dependiendo de su intensidad, duración y combinación con otros factores climáticos. Esto dificulta su predicción precisa y plantea desafíos a la planificación agrícola (Serna Cuenca, 2013).

Para enfrentar estos riesgos, agricultores y comunidades han implementado estrategias de adaptación como la diversificación de cultivos, la adopción de tecnologías de riego eficiente, la conservación del suelo y la gestión integrada del recurso hídrico (Corredor et al., 2008). Además, el desarrollo de sistemas de alerta temprana y monitoreo climático permite anticipar condiciones extremas y planificar respuestas oportunas.

Por su parte, los gobiernos y organismos internacionales desempeñan un papel clave en la mitigación de los efectos de ENOS. Esto incluye la promoción de investigaciones científicas, el apoyo financiero y técnico a los productores, y el diseño de políticas públicas que integren el riesgo climático en la planificación agrícola y en la gestión sostenible del agua.

4.2.5 Impacto de la climatología sobre el cultivo de la papa en Boyacá

Boyacá, ubicado en la región andina central de Colombia, se caracteriza por su topografía montañosa y elevada altitud, condiciones que inciden notablemente en su clima. Predomina un clima templado de montaña, con variaciones marcadas en temperatura y precipitaciones a lo largo del año. Estas fluctuaciones climáticas afectan de forma directa el cultivo de la papa, un producto altamente sensible a las condiciones meteorológicas (López Galvis & Villamizar Rojas, 2020).

Uno de los factores climáticos más determinantes en el cultivo de la papa en Boyacá es la temperatura. Este cultivo se desarrolla de manera óptima en un rango térmico de entre 15°C y 20°C; sin embargo, las variaciones estacionales provocan inviernos fríos y veranos más cálidos. Durante la temporada fría, algunas zonas presentan temperaturas por debajo de 0°C, lo cual representa un riesgo considerable debido a las heladas. Estas pueden generar daños severos en las plantas y en los tubérculos, así como formación de hielo en el suelo, afectando la absorción de agua y nutrientes (Sierra Herrera, 2019).

Para mitigar los efectos negativos de las heladas, los agricultores han implementado medidas como refugios temporales o riego nocturno para mantener temperaturas del suelo por encima del punto de congelación (Delgado et al., 2015). Adicionalmente, los fenómenos de El Niño y La Niña tienen una incidencia notable en el clima regional. El Niño tiende a generar condiciones secas, reduciendo la disponibilidad hídrica para el riego; mientras que La Niña incrementa las lluvias, aumentando el riesgo de enfermedades fúngicas e inundaciones (López Galvis & Villamizar Rojas, 2020).

Las precipitaciones juegan un papel crucial en el ciclo del cultivo de la papa. Este requiere un suministro constante de agua, pero tanto el exceso como la escasez de lluvias pueden perjudicar el crecimiento de la planta. La saturación del suelo puede provocar asfixia radicular, mientras que la sequía limita el desarrollo de los tubérculos. La estacionalidad de las lluvias en Boyacá, con una temporada húmeda entre abril y noviembre y una seca de diciembre a marzo, exige una planificación cuidadosa del calendario agrícola (Aguilar et al., 2022).

La altitud es otro factor que modula el clima y, por ende, el cultivo de la papa. A mayor altitud, disminuye la temperatura, lo que limita las ventanas de siembra y cosecha. No obstante, las zonas altas también reciben mayor radiación solar, la cual es fundamental para la fotosíntesis, aunque puede incrementar la evaporación del agua en el suelo. Además, la radiación ultravioleta (UV), más intensa en zonas elevadas, puede dañar las hojas y afectar la eficiencia fotosintética. Para contrarrestar este efecto, se han adoptado soluciones como mallas de sombra y selección de variedades más resistentes (Pérez Carreño & Serrano Rincón, 2021).

Los agricultores de Boyacá han desarrollado estrategias adaptativas como la diversificación de cultivos, la conservación de suelos y el uso eficiente del agua. La investigación agrícola ha sido clave en este proceso, permitiendo la selección de variedades de papa más resistentes al frío, a la sequía y a las enfermedades. También se han fortalecido las capacidades locales mediante la extensión rural y programas institucionales orientados a mejorar la resiliencia de los sistemas productivos (Aguilar et al., 2022).



Uno de los estudios más representativos en esta temática es el de Sierra Herrera (2019), quien destaca que el cultivo de papa en Boyacá se desarrolla entre los 2.500 y 3.000 m s. n. m. y que su óptimo fisiológico ocurre entre 18°C y 24°C. Temperaturas por debajo de 2°C afectan la fotosíntesis y reducen el crecimiento de los tubérculos, mientras que temperaturas elevadas también generan estrés térmico y disminuyen la calidad del producto.

Por otro lado, la relación entre las precipitaciones y la producción no es lineal. Cambios abruptos en los patrones de lluvia pueden ocasionar pérdidas inmediatas, mientras que las tendencias a largo plazo pueden comprometer la sostenibilidad del cultivo. El estrés hídrico durante la fase de tuberización es especialmente crítico, ya que limita la fijación de carbono y, en consecuencia, reduce el tamaño y calidad de los tubérculos.

No obstante, los efectos del cambio climático no son uniformes en todo el departamento. Estudios realizados entre 1986 y 2017 muestran que en algunos municipios como Belén y Tutazá, la producción de papa aumentó a pesar de la disminución de las precipitaciones, lo que evidencia la importancia de otros factores como las prácticas agronómicas y el uso de variedades mejoradas (Sierra Herrera, 2019). Asimismo, la variabilidad en la respuesta a los cambios de temperatura sugiere que la disponibilidad hídrica y el manejo del cultivo son determinantes clave en la productividad regional.

4.2.6 Efectos de los fenómenos climáticos en la hidrología

La hidrología constituye una disciplina científica dedicada al análisis del ciclo del agua en el planeta, abarcando aspectos como su movimiento, distribución y calidad. Los fenómenos climáticos ejercen una influencia considerable sobre este ciclo, al modificar la disponibilidad y cantidad de agua en distintas regiones del mundo. El ciclo hidrológico describe el tránsito continuo del agua a través del sistema terrestre: inicia con la evaporación desde cuerpos de agua y superficies terrestres, seguida por la condensación del vapor que forma nubes, y culmina con la precipitación en forma de lluvia, nieve o granizo (Poveda et al., 2002). Parte de esta precipitación se infiltra en el suelo, alimentando los acuíferos, mientras que el resto escurre superficialmente hacia ríos, lagos y finalmente al océano, cerrando así el ciclo.

Eventos climáticos como sequías, inundaciones, ciclones tropicales y los fenómenos de El Niño y La Niña impactan cada fase del ciclo hidrológico. La precipitación resulta esencial para garantizar el suministro de agua dulce, pero sus patrones están sujetos a la influencia de condiciones climáticas específicas. Por ejemplo, las sequías, que representan períodos prolongados de escasa precipitación, suelen derivarse de diversas causas climáticas. El cambio climático ha incrementado tanto la frecuencia como la severidad de estos eventos en muchas regiones del mundo (Villate Corredor, 2004), reduciendo de manera significativa la disponibilidad de agua para usos agrícolas, industriales y domésticos.

En contraste, precipitaciones intensas y repentinas asociadas a tormentas tropicales o ciclones pueden generar desbordamientos e inundaciones. Fenómenos como el desplazamiento de las corrientes en chorro también contribuyen a la formación de sistemas de baja presión responsables de lluvias torrenciales (Poveda et al., 2002), ocasionando daños significativos a la infraestructura, cultivos y asentamientos humanos.

La evaporación también responde a las variaciones climáticas. Las altas temperaturas y las sequías prolongadas elevan las tasas de evaporación, reduciendo los niveles de agua en suelos y cuerpos hídricos, lo cual intensifica los efectos de la escasez hídrica y plantea retos para la gestión del recurso.

Asimismo, los fenómenos climáticos alteran la escorrentía superficial y la infiltración. Las lluvias intensas incrementan la escorrentía, elevando el riesgo de erosión e inundaciones (Villate Corredor, 2004), mientras que durante las sequías, esta escorrentía disminuye, afectando negativamente la recarga de acuíferos y el acceso a fuentes subterráneas de agua.

Un caso particular de influencia climática en la hidrología lo representan El Niño y La Niña. El primero implica un calentamiento anómalo de las aguas del Pacífico ecuatorial, asociado a condiciones más cálidas y secas que generan sequías y escasez hídrica en muchas zonas (Moreno & González, 2011). En contraste, La Niña se vincula a un enfriamiento de estas aguas, produciendo un aumento en las precipitaciones y el riesgo de inundaciones en ciertas regiones.

El cambio climático global, impulsado por la acumulación de gases de efecto invernadero, ha alterado significativamente los patrones de temperatura y precipitación (Castañeda Contador, 2005). Esto se traduce en sequías prolongadas en algunas zonas y lluvias más intensas en otras, modificando sustancialmente el equilibrio hidrológico. A ello se suma el deshielo de glaciares y masas de hielo, que en el corto plazo incrementa el caudal de los ríos, pero a largo plazo reduce la disponibilidad de agua dulce, afectando a comunidades que dependen de estos recursos para su consumo y generación energética.

También la calidad del agua se ve comprometida por eventos climáticos. Las inundaciones pueden arrastrar contaminantes y sedimentos hacia fuentes hídricas, deteriorando su calidad y afectando tanto la salud humana como los ecosistemas acuáticos (Villate Corredor, 2004).

Además, temperaturas más cálidas favorecen la proliferación de algas nocivas, como las cianobacterias, con consecuencias negativas sobre el agua.

Frente a estos desafíos, la gestión integral del agua se vuelve fundamental para la adaptación al cambio climático. Los responsables de los recursos hídricos deben anticiparse a las variaciones en la precipitación, calidad y disponibilidad del recurso, mediante medidas como la conservación del agua, la infraestructura de almacenamiento y distribución, y la implementación de prácticas agrícolas sostenibles.

En regiones vulnerables a sequías, resulta esencial contar con planes de manejo que contemplen el uso eficiente del agua, la diversificación de fuentes hídricas y la instalación de sistemas de alerta temprana. Para las zonas expuestas a inundaciones, la estrategia debe incluir obras como diques y presas, zonas de amortiguación y una adecuada planificación urbana que evite construcciones en áreas de riesgo.

Finalmente, adaptarse al cambio climático exige incorporar su variabilidad en la planificación hídrica. Esto implica mayor flexibilidad operativa en embalses, caudales regulados y mecanismos que permitan responder eficazmente ante eventos extremos cada vez más frecuentes.

4.2.7 Análisis de datos Faltantes

De acuerdo con los avances en el completado de los datos de las estaciones agrometeorológicas, pluviométricas o climáticas, los estudios demuestran que el programa Chac (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas) desarrollado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España en diversos estudios para la modelación de variables inmersas en las disciplinas de relacionadas con la hidrología y la climatología (Hämmerly et al.,2018) permite el completado de datos mediante la utilización de la técnica estadística de correlación del programa (Hämmerly et al.,2018) interpretado como un modelo de regresión bivariado de los datos mensuales de las estaciones meteorológicas del área de estudio (Hämmerly et al.,2019) (Cely & Penagos, 2020), admitiendo el ingreso de datos sin restricción de series históricas.

Por lo anterior, el procesamiento se efectuó mediante la construcción del formato para cada estación y variable de acuerdo con lo señalado en el Manual de Uso del Programa de Cálculo

Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas (CHAC), con el objetivo de contrastar las simulaciones históricas (Mendoza, 2020). El programa estima los valores de acuerdo los parámetros: exponente de priorización y umbral de priorización (Martínez Romero, Ortiz Rodríguez, Fernández Yuste, & Martínez Santa-María, 2011; Villazón & Callaú, 2015).

Con el fin de garantizar la confiabilidad de los datos exportados del programa Chac, es importante llevar a cabo el análisis de homogeneidad, teniendo en cuenta la coherencia de las series históricas y aquellos periodos en los que no se tienen la totalidad de los datos, mediante el método doble masas, el cual consiste en la construcción de una curva doble acumulativa (Cely & Penagos, 2020) en el cual se busca que el R2 de la regresión lineal tienda a 1; la verificación correspondiente, se determina mediante un conjunto de estaciones cercanas.

4.2.8 Análisis estadístico de series de tiempo.

Ahora bien, con base en el objetivo del completado de las series históricas, los estudios han hecho uso de paquetes estadísticos propietarios y no propietarios para análisis de datos cualitativos y cuantitativos como el programa PSPP (Perfect Statistical Professional Presented), el cual es de uso libre (Yatrik et al., 2017); en este se han realizado adaptaciones para asemejar las opciones del software SPSS facilitando su uso, así mismo se ha ampliado en diversos niveles académicos (Hernández, & Ventura, 2022).

4.2.9 Función de Correlación

El índice de correlación de Spearman es utilizado para tener confiabilidad en los datos (García Bu Bucogen et al., 2022), de igual forma, permite medir la dependencia en las series históricas con distribuciones no normales para variables como la precipitación a diferencia de la correlación de Pearson (Maraun & Widmann, 2018; Aguirre et al., 2021) y detalla la intensidad de la asociación monotónica de las hipótesis y resultados, mediante una técnica no paramétrica de la distribución (Fallas y Alfaro, 2012; Matovelle et al., 2021).

El coeficiente es una medida de asociación lineal que utiliza los rangos, números de orden, de cada grupo de sujetos y los compara rangos (Martínez-Ortega., Tuya-Pendás, Martínez-Ortega, Pérez-Abreu & Cánovas, 2009), mediante la siguiente formula:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Ecuación 1 – Coeficiente de Spearman.

Fuente: (Martínez-Ortega., Tuya-Pendás, Martínez-Ortega, Pérez-Abreu & Cánovas, 2009)

Donde:

d: Diferencia entre rangos

n: Número de datos

Los resultados del coeficiente permiten determinar si la correlación es directa o indirecta cuando los valores se encuentran entre 0 y 1 e indirecta entre 0 y -1; la correlación no existe si su resultado es 0.

4.2.10 Comportamiento de los datos.

Los comportamientos de las variables permiten ampliar la comprensión de la variabilidad interanual de la hidro climatología, facilitando la comprensión de la Oscilación del Sur – ENOS, la cual está condicionada por el patrón de calentamiento o enfriamiento que exhibe el Pacífico tropical en las diferentes fases del fenómeno (Navarro – Monterroza, Arias & Vieira, 2019).

El Índice de Oscilación del Sur – SOI por sus siglas en inglés, es una medida de las fluctuaciones a gran escala de la presión del aire entre el Pacífico tropical occidental y oriental durante los episodios de El Niño y La Niña; El Centro Nacional de Información Ambiental Administración Nacional Oceánica y Atmosférica a través de su página web proporciona el índice por cada mes, donde los valores positivos representan los años que presentaron fenómeno La Niña, los valores negativos los periodos de El Niño y los años que presentan como índice cero (0) se definen como años normales.

Las variables que intervienen en el cálculo son:

SLP: Presión a nivel del mar

SLP: SLP estandarizado

aSLP: SLP actual

mSLP: SLP media

σ : Desviación estándar

N: Número de meses

El cálculo del Índice se realiza mediante la siguiente formula:

$$SOI = \frac{\left(sSLP_{Tahiti} - sSLP_{Darwin} \right)}{\sigma_{monthly}}$$

Ecuación 2 – Índice SOI.

Fuente: (Navarro – Monterroza, Arias & Vieira, 2019).

Donde sSLP es equivalente a:

$$sSLP = \frac{\left(aSLP - mSLP \right)}{\sigma}$$

Ecuación 3 – Índice SOI.

Fuente: (Navarro – Monterroza, Arias & Vieira, 2019).

La desviación mensual corresponde a:

$$\sigma_{monthly} = \sqrt{\sum (sSLP_{Tahiti} - sSLP_{Darwin})^2 / N}$$

Ecuación 4 – Índice SOI.

Fuente: (Navarro – Monterroza, Arias & Vieira, 2019).

Entendiendo el fenómeno de El Niño como un calentamiento anómalo de la superficie oceánica en el centro – oeste del océano pacífico que influye en las condiciones atmosféricas (Guzmán, 2015), en cuanto a la sensación térmica se presencia disminución de la temperatura del aire igual o superior a medio grado Celsius con respecto a los valores promedios (Montealegre, 2014; Rubio, 2021).

Se han evidenciado alteraciones en la seguridad alimentaria por el cambio climático, teniendo en cuenta el calentamiento en las regiones de cultivo, los cambios de precipitación y la mayor frecuencia de eventos extremos como tormentas o sequías (Rubio, 2021).

5. MARCO METODOLOGICO

La presente investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo de tipo correlacional, partiendo de la comprensión de este como un análisis centrado en determinar relaciones estadísticas entre diferentes variables. En este sentido, se pretende examinar cómo se correlacionan diversos factores climáticos, sin modificar ni intervenir directamente sobre ellos.

El desarrollo metodológico contempla varias fases clave. Inicialmente, se llevará a cabo una recopilación exploratoria de datos relacionados con las variables de temperatura y precipitación, apoyada en literatura científica especializada. A continuación, se construirá una estructura analítica orientada al procesamiento geoespacial de la información, con el objetivo de identificar la influencia de los eventos El Niño y La Niña sobre parámetros hidroclimáticos, específicamente los asociados a la temperatura y la precipitación. Finalmente, se analizará cómo estas variables impactan las áreas de cultivo en el departamento de Boyacá.

Los registros utilizados provendrán del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), y abarcarán un mínimo de tres décadas. Este período de tiempo está alineado con la recomendación de la Organización Meteorológica Mundial, la cual establece que un horizonte temporal de 30 años es adecuado para definir el clima de una región, permitiendo identificar patrones y variabilidad de largo plazo con mayor precisión (Caro & Villate, 2008).

En la fase de análisis, se ejecutará un proceso de caracterización cuantitativa de las variables climáticas, mediante gráficas históricas y estimaciones de autocorrelación por estación. Posteriormente, se desarrollará un análisis de tendencias complementado con técnicas de completado de datos, a fin de establecer valores medios representativos de cada serie. Este procedimiento permitirá comprender la dinámica climática del departamento de Boyacá en términos de temperatura y precipitación.

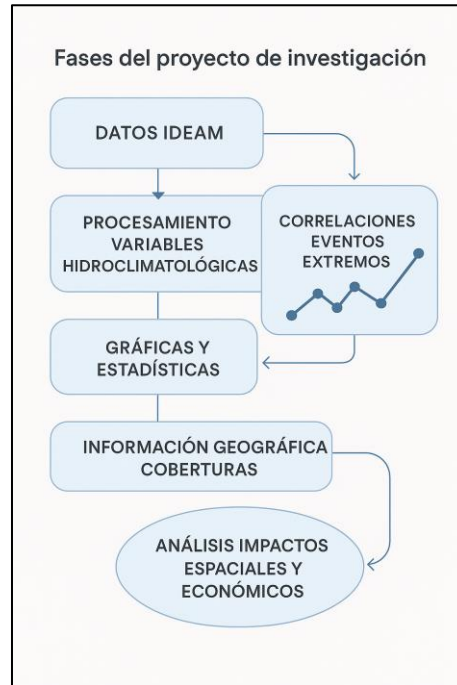
Metodológicamente, el estudio adopta un enfoque observacional basado en el análisis estadístico de series temporales, alejándose de los modelos experimentales de optimización. Las variables seleccionadas —precipitación, temperatura y caudal— fueron escogidas debido a su reconocida importancia para evaluar la respuesta hidroclimática ante eventos del fenómeno ENSO. Esta elección sigue los lineamientos técnicos de la OMM y del IDEAM, facilitando la identificación de tendencias y patrones en el contexto territorial de Boyacá (OMM, 2017; IDEAM, 2015).

Se utilizarán registros provenientes de estaciones climatológicas para las siguientes variables: temperatura media mensual, máxima y mínima mensual, media anual, así como precipitación media, máxima, mínima mensual y media anual, y caudal. A partir de estas series se seleccionarán las variables clave (precipitación media anual y temperatura media anual) para graficarlas y calcular las correlaciones correspondientes. Esto permitirá establecer el grado de asociación entre los comportamientos climáticos y los fenómenos El Niño y La Niña, tomando como referencia los Índices de Oscilación del Sur (IOS).

Complementariamente, se realizará un análisis documental de fuentes secundarias como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá), con el propósito de caracterizar las dinámicas agrícolas actuales y sus principales indicadores de rendimiento en el departamento. Con base en esta información, se evaluará el efecto del comportamiento climático sobre las coberturas agrícolas, especialmente en zonas con alta producción de cultivos estratégicos como

la papa y la cebolla, que representan los principales renglones agrícolas de Boyacá. La metodología propuesta se resume gráficamente en la Ilustración 1.

Ilustración 1 Metodología general del Proyecto



Fuente: Elaboración propia

5.1 Hidrología estadística aplicada al proyecto.

La hidrología estadística constituye una herramienta clave para interpretar y analizar los procesos hidrológicos, utilizando enfoques estadísticos que permiten examinar la variabilidad y las tendencias de variables climáticas como la temperatura y la precipitación. En territorios con fuerte dependencia del sector agrícola, como es el caso del departamento de Boyacá, los cambios en el clima pueden tener efectos marcados sobre la cobertura de cultivos, lo que repercute directamente en la productividad y sostenibilidad agropecuaria.

En este trabajo se emplearon métodos propios de la hidrología estadística para investigar la relación entre las condiciones hidrológicas y las transformaciones en el uso del suelo agrícola en Boyacá. Se realizó un análisis de series temporales, distribuciones probabilísticas y correlaciones entre variables climáticas, con el objetivo de detectar patrones y tendencias asociadas a fenómenos extremos como El Niño y La Niña. Los hallazgos obtenidos buscan aportar insumos técnicos para una gestión más informada del recurso hídrico y una planificación agrícola adaptada a la variabilidad climática de la región.

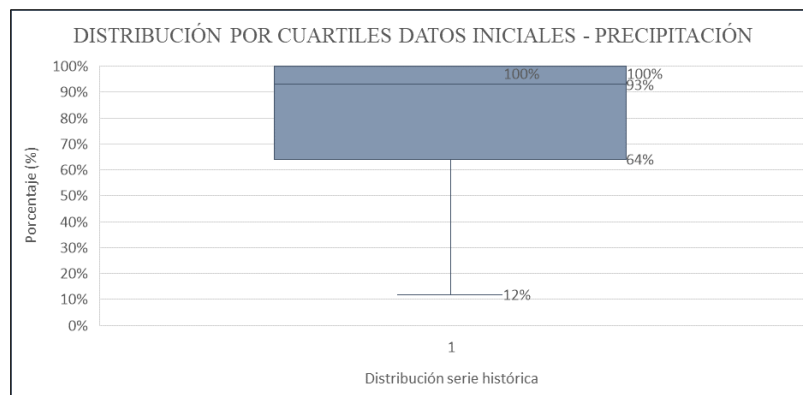
5.1.1 Datos Iniciales

En primer lugar, se verificaron cada una de las estaciones entregadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, con el fin de verificar la totalidad de estaciones para las variables de precipitación y temperatura, estableciendo un total de 114 estaciones para precipitación y 35 de temperatura distribuidas en el departamento de Boyacá.

Posteriormente, se efectuó la revisión de los siguientes datos básicos: nombre, código, tipo, estado, altura, coordenadas y las estaciones cercanas, con el objetivo de tener una visión preliminar para el completado de datos. Así mismo, se realizó la verificación del porcentaje de datos para el periodo a analizar comprendido desde el mes de junio del año 1971 hasta el mes de mayo del 2020 para la variable de precipitación y de agosto de 1983 hasta mayo del 2020 para la variable temperatura.

De lo anterior, se tuvo en cuenta el número total de datos para las estaciones de precipitación y temperatura que correspondieron a 588 y 444 respectivamente. En la gráfica 1 y 2 se muestra cómo se distribuyen datos de precipitación y temperatura en la serie histórica, con un enfoque en cómo se agrupan los valores dentro de los cuartiles.

Gráfica 1 Distribución por cuartiles datos iniciales - precipitación

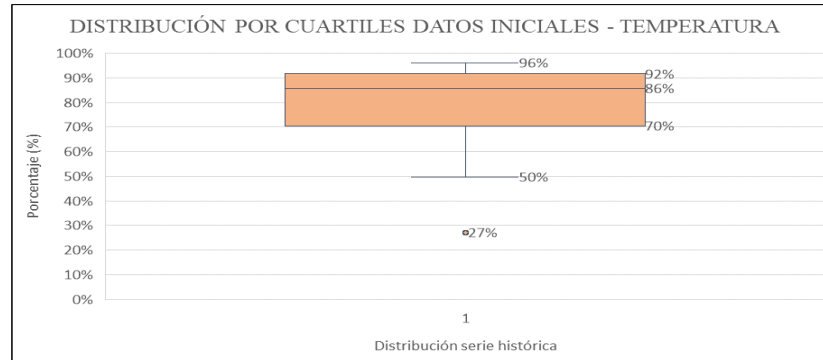


Fuente: Elaboración propia

Nota. Las estaciones que median la variable de precipitación contaban con mínimo el 12% de los datos de la serie histórica, de igual forma, la mediana se situó en 93% de los datos, la distribución de cuartiles estuvo enmarcada en 12%, 64%, 93% y 100% respectivamente.

En tanto, la variable de temperatura tuvo la siguiente distribución por cuartiles, presentada en la Gráfica 2:

Gráfica 2 Distribución por cuartiles datos iniciales Temperatura



Fuente: Elaboración propia

Nota. Las estaciones que reportaron temperatura registraron como mínimo el 27% de los datos de la serie histórica. La mediana se situó en 86% de los datos, la distribución de cuartiles se situó en 50%, 70%, 92% y 100% respectivamente. Se evidenció que ninguna estación superó el 96% de los datos.

Las estaciones que reportaron datos de temperatura presentaron una disponibilidad mínima del 27% en sus series históricas, con una mediana del 86%. Los cuartiles se ubicaron en 50%, 70%, 92% y 100%, respectivamente, y ninguna estación superó el 96% de completitud. Este resultado indica que, si bien algunas estaciones presentan alta continuidad en los datos, persiste una dispersión significativa en la disponibilidad, lo cual puede afectar la consistencia del análisis temporal. La no superación del 96% evidencia que incluso las mejores estaciones tienen pequeños vacíos de información, lo que resalta la importancia de establecer criterios mínimos de calidad para garantizar la representatividad de los datos empleados en la identificación de tendencias climáticas.

5.1.2 Completado mediante Chac

Para el completado de las series históricas se realizó la construcción del formato para cada estación y variable de acuerdo con lo señalado en el Manual de Uso del Programa de Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas – CHAC.

En consecuencia, se verificó a través de las coordenadas y los coeficientes de variación y sesgo la dispersión de los datos, para determinar la homogeneidad de las estaciones para el completado de datos.

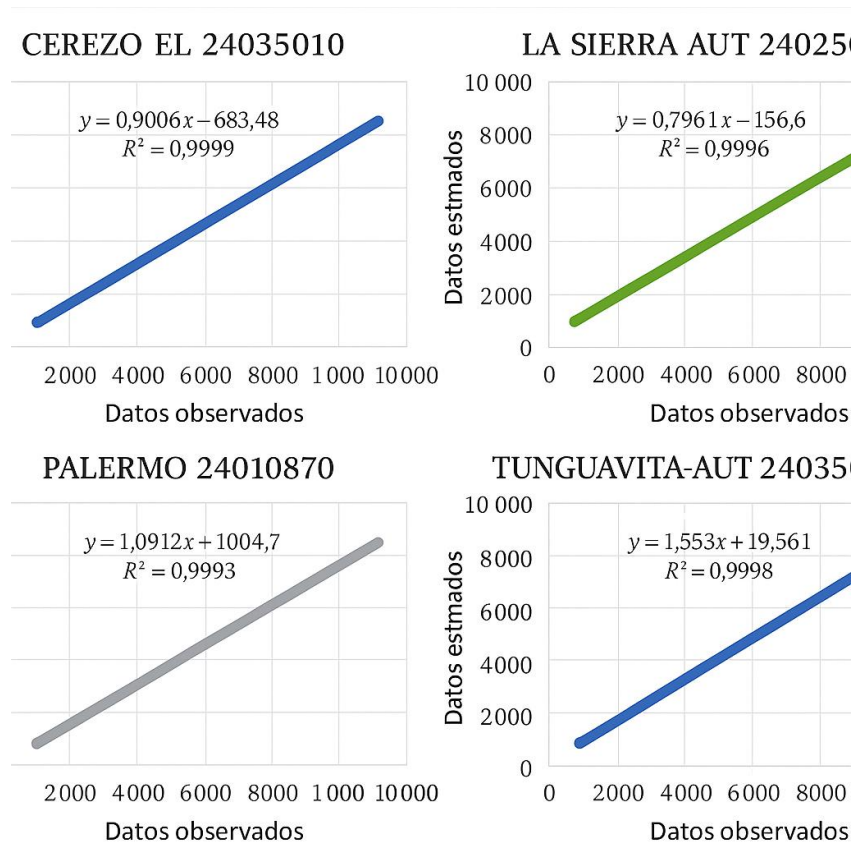
De igual forma, se establecieron los parámetros de exponente y umbral de priorización a fin de establecer el grado de exactitud de acuerdo con el comportamiento hidrológico. (Martínez Romero, Ortiz Rodríguez, Fernández Yuste, & Martínez Santa-María, 2011; Villazón & Callaú, 2015) (Villate, 2004), teniendo en cuenta que el exponente de priorización sea lo más alto posible debido a la asociación con el coeficiente de correlación de las estaciones analizadas, a su vez, el umbral de priorización es el valor que no se debe bajar para no acumular errores en los datos que se completan. (Martínez Romero, Ortiz Rodríguez, Fernández Yuste, & Martínez Santa-María, 2011).

Durante el proceso de completado de datos se identificó que algunas estaciones presentaban vacíos significativos, por lo que se realizaron iteraciones utilizando estaciones ya completadas, ajustando el exponente y el umbral de priorización para optimizar la estimación de valores faltantes. Sin embargo, en el caso de las estaciones con menor cantidad de datos originales, las series completadas resultaron muy similares a los pocos registros existentes, sin evidenciar variaciones interanuales. Esta ausencia de variabilidad afectó la confiabilidad del completado, razón por la cual dichas estaciones fueron consideradas con precaución en el análisis posterior

5.1.3 Homogeneidad de la serie histórica.

Teniendo en cuenta las estaciones cercanas, se llevó a cabo análisis doble masa para las estaciones, para verificar la calidad del completado de datos del Programa CHAC, de acuerdo con la coherencia de las series históricas validando el grado de confiabilidad mediante la construcción de una curva doble acumulativa (Cely & Penagos, 2020) en el cual se busca que el R^2 de la regresión lineal tienda a 1.

Gráfica 3 Análisis de doble masa - precipitación

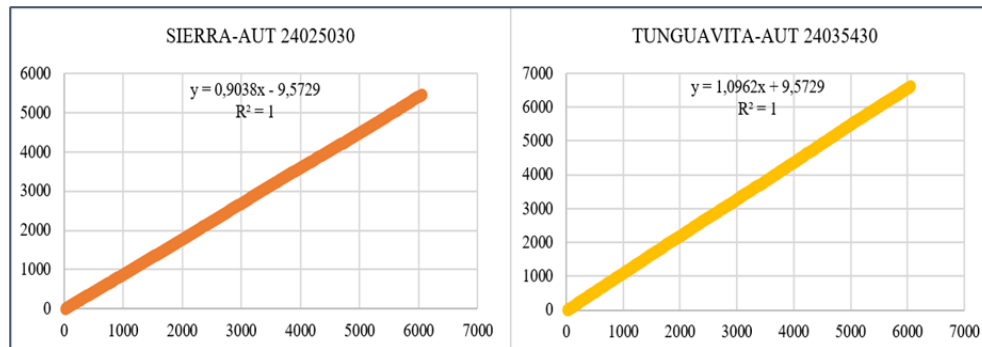


Fuente: Elaboración propia

Nota. Análisis doble masa estaciones del municipio de Paipa. Del ejercicio, se evidencia que el R2 para las estaciones de precipitación, estuvo por encima del 0.98.

En la gráfica 4 se presentan los análisis de doble masa de algunas estaciones, con el fin de evaluar la consistencia y homogeneidad de una serie de datos en las estaciones de Boyacá.

Gráfica 4 Análisis de doble masa - Temperatura



Fuente: Elaboración propia

Nota. Análisis doble masa estaciones del municipio de Paipa. Teniendo en cuenta que la variable temperatura presentó mayor homogeneidad, se evidenció a través del método que el R^2 se situó mayor a 0.99.

El coeficiente R^2 indica qué tan bien un modelo explica la variabilidad de una serie histórica; en precipitación o temperatura, un valor alto refleja un buen ajuste entre datos observados y estimados. Un R^2 cercano a 1 sugiere alta confiabilidad del modelo aplicado.

5.1.4 Estadística de datos

En cuanto al análisis de datos cuantitativos se empleó el programa PSPP, el cual es de uso libre (Yatrik et al., 2017), el cual calculó los conceptos estadísticos para cada estación, a continuación, se detallan los valores promedio para precipitación y temperatura:

Tabla 1 – Conceptos estadísticos - Precipitación.

Concepto estadístico	Valor promedio
Número de datos	588
Media	124.71
Error Estadístico Media	2.53
Mediana	116.00
Modo	32.52
Desviación	60.81
Varianza	6545.53
Curtosis	0.88
Error Estadístico Curtosis	0.20
Asimetría	0.70
Error Estadístico Asimetría	0.10
Intervalo	358.27

Mínimo	36.35
Máximo	394.63

Fuente: Elaboración propia

Nota. Valores tomados del Programa PSPP; resultado promedio de los totales por estación.

Los resultados muestran que la media de los datos de precipitación se ubica en 124.71 ml y su mediana en 116 ml, de igual forma, se destaca que la desviación arrojo un resultado promedio de 60.81, principalmente por la baja razonabilidad de datos completados de algunas estaciones debido a los amplios periodos sin reporte. En cuanto a la distribución de frecuencias y datos se tuvo un resultado promedio de curtosis y asimetría de 0.88 y 0.70.

Tabla 2 – Conceptos estadísticos - Temperatura.

Concepto estadístico	Valor promedio
Número de datos	444
Media	15.25
Error Estadístico Media	0.03
Mediana	15.24
Modo	15.07
Desviación	0.71
Varianza	0.52
Curtosis	0.61
Error Estadístico Curtosis	0.23
Asimetría	0.18
Error Estadístico Asimetría	0.12
Intervalo	4.60
Mínimo	13.06
Máximo	17.67

Fuente: Elaboración propia

Nota. Valores tomados del Programa PSPP; resultado promedio de los totales por estación.

De acuerdo con lo anterior, la variable temperatura presentó como valores promedio de media y mediana de: 15.25°C y 15.24°C. Por otra parte, la desviación de los datos con respecto a la media obtuvo un valor de 0.71 y el resultado promedio de curtosis y asimetría fue de 0.61 y 0.18.

De los resultados estadísticos, se evidencia que la variable temperatura tuvo una mayor confiabilidad de los datos, ya que sus periodos reportados inicialmente contaban con mínimo de datos del 27% de los datos, así mismo, las estaciones cercanas contaban con la serie histórica para su completado. Es importante aclarar que la variable de temperatura presenta menores fluctuaciones o variaciones entre meses y años.

5.1.5 Coeficiente de correlación de Spearman

Se tomaron las 27 estaciones que comparten el registro de variables de precipitación y temperatura para la serie histórica comprendida de agosto de 1983 hasta mayo del 2020, en la siguiente tabla se muestra el resultado del coeficiente de correlación de Spearman y su relación:

Tabla 3 – Correlación de Spearman.

Nombre	Correlación Spearman	Relación
Aeropuerto A Lleras C [24035340]	0,16	Directa
Andalucía [24035350]	0,06	Directa
Surbata Bonza	0,11	Directa
La Sierra - Aut [24025030]	-0,05	Indirecta
Tunguavita - Aut	0,10	Directa
Campohermoso [35085050]	-0,26	Indirecta
Buenavista [23125100]	-0,20	Indirecta
Chiscas [24035310]	-0,22	Indirecta
Chita Aut [24035250]	-0,22	Indirecta
El Túnel	-0,17	Indirecta
Belencito [24035150]	-0,04	Indirecta
Otanche [23125080]	-0,11	Indirecta
Corinto [35195050]	-0,46	Indirecta
Villa Carmen	0,08	Directa
Institución Agrícola Santa Sofia [24015090]	-0,14	Indirecta
Cardón El [35235010]	-0,30	Indirecta
Sutatenza	-0,46	Indirecta
La Copa [24035040]	0,13	Directa
UPTC	-0,09	Indirecta
Villa De Leiva - Aut	-0,03	Indirecta
Beteitiva [24035020]	0,01	Directa
Institución Agrícola Macanal [35075040]	-0,37	Indirecta
Guican [24035070]	-0,20	Indirecta
Ceranza [240354200]	-0,16	Indirecta
Boavita [24035330]	-0,26	Indirecta
Aeropuerto Furatena - Aut [23125140]	-0,18	Indirecta
Villa Luisa	-0,30	Indirecta

Fuente: Elaboración propia

Nota. La tabla relaciona las estaciones que comparten el registro de las variables de precipitación y temperatura.

De lo anterior se determina que el 25.93% de las estaciones obtuvo una relación directa y el 74.07% una relación indirecta, es decir, que en su mayoría las estaciones muestran un comportamiento contrario entre variables.

5.1.6 Índice de Oscilación del Sur -SOI

Con el propósito de analizar el comportamiento del fenómeno El Niño y La Niña, se recurrió al estudio del Índice de Oscilación del Sur (SOI, por sus siglas en inglés), el cual permite evaluar las variaciones de presión atmosférica a gran escala entre las zonas occidental y oriental del Pacífico tropical durante dichos eventos. Para ello, se utilizaron los registros mensuales disponibles en la base pública de los Centros Nacionales de Información Ambiental (NOAA, por sus siglas en inglés). En esta clasificación, los valores positivos del SOI indican presencia del fenómeno La Niña, los negativos se asocian a episodios de El Niño, y los valores cercanos a cero corresponden a condiciones climáticas normales.

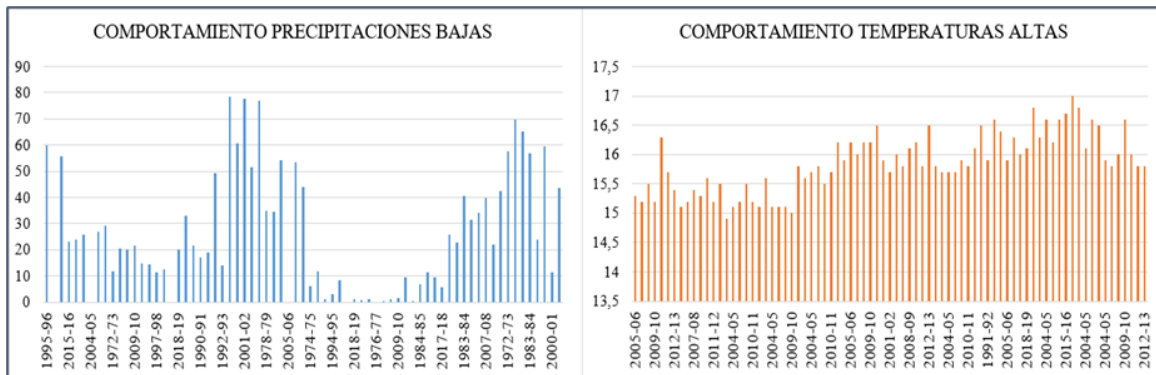
A continuación, para cada estación con datos completados, se identificaron los eventos de precipitación elevada, definidos como aquellos con valores superiores al promedio más una desviación estándar. De igual forma, las precipitaciones bajas se establecieron como aquellos registros inferiores al promedio mensual. Este mismo procedimiento se aplicó a la variable temperatura. Así, con base en estos rangos —promedio, desviación estándar y sus combinaciones— se identificaron los eventos climáticos atípicos, los cuales fueron ordenados cronológicamente en series temporales para su posterior comparación con los indicadores del SOI proporcionados por la NOAA.

Dentro de los resultados, se observó que las estaciones que tienen un porcentaje bajo de datos y que posteriormente fueron completadas, presentaron periodos incoherentes debido a que las series amplias se completaban con datos similares o uniformes sin tener cambios en los datos mensuales, principalmente en las estaciones que registraron las variables de precipitación. Las estaciones que no completan de manera satisfactoria se descartan porque pueden desviar los resultados.

Con los periodos obtenidos de las precipitaciones bajas y las temperaturas altas que es una condición para el fenómeno del El Niño, se determinaron las fechas y periodos en los que se registraron eventos del fenómeno de El Niño, dando como resultado algunos periodos comprendidos después del año 2000 tomando como mes hidrológico para Colombia junio. Adicionalmente, los reportes de temperatura exponen que aumento en los últimos años.



Gráfica 5 Comportamiento precipitaciones (mm) bajas y temperaturas altas (C) en estación



Nota. Comportamiento precipitaciones bajas y temperaturas altas estación Tinguavita – Aut, municipio de Paipa.

5.1.7 Selección de las estaciones influenciadas por El Niño y La Niña

Después del proceso de completado de datos en Chac, se generaron 108 estaciones de precipitación y 35 estaciones de temperatura. Para los análisis de precipitaciones máximas se usaron todas las estaciones que no generaron ningún inconveniente en el completado de datos. Para las estaciones de temperatura que fueran influenciadas por El Niño solo se tuvo en cuenta aquellas que se correlacionaran con temperaturas altas y precipitaciones bajas.

Para garantizar la consistencia y confiabilidad en el análisis de la estación Chac, se realizó un proceso de completado de datos faltantes utilizando el software Chac. Inicialmente, se identificaron los vacíos en la serie temporal de precipitación, los cuales podían deberse a errores en la recolección o transmisión de información. Mediante Chac, se aplicaron técnicas de interpolación temporal como promedios móviles y regresiones simples con datos cercanos para suplir los valores ausentes. En casos donde los vacíos superaban dos meses consecutivos, se usó información de estaciones vecinas con alta correlación, ajustando los datos mediante coeficientes derivados de series históricas. Este procedimiento permitió reconstruir una base de datos más robusta y continua. Finalmente, se evaluó la coherencia climática de los datos completados, asegurando que las tendencias generales permanecieran representativas del comportamiento local.

Se pudo observar que los años de 1970 a 1980, generaron muchos vacíos que causaron problemas a la hora de completar lo que hizo que se tuviera en cuenta en los análisis de influencia Niño y Niña desde el año 1983 hasta 2020, mas sin embargo al analizar las precipitaciones altas y tendencias generales de las temperaturas, se tuvo en cuenta todas las estaciones analizadas.

El programa estadístico PSPP es una herramienta de software libre diseñada para el análisis de datos mediante técnicas estadísticas descriptivas e inferenciales. Su funcionalidad es similar a la del software SPSS, permitiendo ejecutar pruebas como correlaciones, análisis de varianza, regresiones lineales, tablas de contingencia, entre otros. PSPP trabaja con una interfaz intuitiva que facilita la gestión de grandes volúmenes de datos, siendo especialmente útil en investigaciones sociales, educativas y ambientales. Además, permite importar y exportar archivos en formatos como CSV, TXT y SAV, lo cual amplía su compatibilidad con otras plataformas. Una de sus ventajas es que no tiene restricciones de licencia, lo que lo convierte en una opción accesible para usuarios individuales e instituciones. Finalmente, ofrece resultados claros en tablas y permite automatizar procesos mediante sintaxis. Se anexan los cálculos del programa.

En el software Chac, se pueden descartar estaciones cuando sus series de datos aparecen llenas de ceros, ya que esto indica posibles errores en la toma o digitación de información, y no representa un valor real de precipitación. Estas inconsistencias suelen originarse por fallas en los sensores, errores humanos al registrar los datos o problemas en la transmisión automática. Incluir registros con ceros artificiales puede distorsionar los análisis estadísticos y generar conclusiones erróneas. Por ello, es válido excluir dichas estaciones para asegurar la calidad y confiabilidad de los resultados. Con base en esta premisa para los análisis estadísticos fue necesario dejar unas estaciones definitivas para medir la verdadera influencia de los valores extremos de precipitación y temperatura sin que estos valores fueran datos erróneos no pertenecientes a la serie histórica.

Es importante analizar conjuntamente las temperaturas altas y las precipitaciones bajas durante el fenómeno del Niño porque esta combinación intensifica el estrés hídrico en los ecosistemas y cultivos. Las altas temperaturas aumentan la evaporación del agua disponible, mientras que la falta de lluvias reduce la recarga hídrica, afectando directamente la agricultura y los recursos hídricos. Esta relación permite comprender mejor los impactos del Niño y tomar decisiones de adaptación más efectivas

A continuación, se presenta el primer análisis inicial de las estaciones en donde se puede observar las incertidumbres en los datos:

5.1.8 Información geográfica de Coberturas.

El postproceso de imágenes satelitales inicia con la adquisición y corrección radiométrica y geométrica de los mapas, seguido de la composición de bandas espectrales (como RGB o infrarrojo) para resaltar características específicas del terreno. Se definen firmas espectrales mediante muestras representativas de coberturas (bosques, cultivos, cuerpos de agua, etc.), que permiten construir una base de entrenamiento para la clasificación.

Se aplicó el método de clasificación supervisada por máxima verosimilitud, que asigna a cada píxel una clase según la probabilidad estadística basada en las firmas registradas. Luego, se realiza la extracción de atributos de interés mediante análisis espacial y vectorización. El producto final es una imagen clasificada con coberturas temáticas precisas, lista para análisis geográficos o integración en sistemas de información territorial.

5.1.9 Análisis de impactos espaciales y económicos

La Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) es un estudio realizado por el DANE en Colombia que recoge información sobre las actividades agrícolas, pecuarias y forestales del país. Su objetivo es conocer el uso del suelo, producción, costos y tecnología en el sector agropecuario. Se caracteriza por ser de cobertura nacional, periódica y clave para la formulación de políticas rurales.

Para evaluar la relación entre las variables climáticas (precipitación y temperatura) y los índices ENSO (SOI y ONI), se aplicó el coeficiente de correlación de Spearman, una medida no paramétrica que permite identificar asociaciones monótonas entre variables, sin asumir una distribución normal. Esta técnica es útil en análisis ambientales debido a la presencia frecuente de datos atípicos o no lineales. Los datos fueron organizados en series temporales mensuales y posteriormente emparejados con los valores del índice ENSO correspondiente a cada mes.

Con el fin de identificar posibles rezagos temporales en la respuesta climática al fenómeno ENSO, se desplazaron las series de los índices entre 0 y 6 meses (y hasta 12 cuando fue necesario), recalculando en cada caso la correlación con la variable climática. De esta forma, se pudo determinar en qué mes posterior a una variación del índice ENSO se manifiesta con mayor fuerza su efecto sobre la precipitación o temperatura. Este procedimiento permite detectar impactos diferidos y construir modelos más ajustados al comportamiento real del clima en el territorio analizado.

Se elaboraron mapas temáticos a partir de datos históricos de temperatura y precipitación, con el fin de analizar la influencia del fenómeno ENSO sobre el comportamiento climático regional. Se utilizaron herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) para proyectar tendencias hasta el año 2040, comparando dichos resultados con un año base y generando mapas de variación térmica y pluvial.

El análisis se centró en identificar zonas sensibles a las fluctuaciones asociadas a El Niño y La Niña, el interés era observar tendencias generales. Esta metodología permitió visualizar espacialmente los posibles efectos del ENSO como insumo para futuros análisis climáticos y de planificación

5.1.10 Incertidumbres en la investigación

A pesar de los hallazgos obtenidos, el estudio presenta varias incertidumbres que deben ser consideradas. En primer lugar, la limitación en la cobertura espacial de las estaciones meteorológicas puede afectar la representatividad de los resultados, especialmente en zonas de alta variabilidad climática. Además, aunque se utilizó el índice SOI como referencia para los eventos Niño y Niña, su comportamiento no siempre se traduce en efectos lineales o inmediatos sobre las variables analizadas. El uso de rezagos busca capturar esa variabilidad, pero introduce un margen de error asociado al comportamiento interanual del clima. Asimismo, el análisis se basó en series temporales históricas que pueden estar influenciadas por datos faltantes o inconsistencias en la toma de información. En particular, entre los años 2000 y 2015 se presentó un vacío de información geográfica debido a la falta de fotografías satelitales disponibles, situación que fue compensada mediante el uso de información secundaria proveniente de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA). Es importante aclarar que muchos cultivos en la región son de carácter transitorio, lo que introduce incertidumbre en el análisis debido a los cambios dinámicos y decisiones antrópicas del campesinado sobre qué sembrar y cuándo hacerlo, dificultando así un seguimiento puntual por cultivo en áreas específicas a nivel de cultivos georreferenciados.



6. PRECIPITACIONES Y TEMPERATURAS EN BOYACÁ.

De acuerdo al marco metodológico, al realizar el completado de datos mediante CHAC y realizar la estadística aplicada mostrada en la metodología, se lograron encontrar las variables climatológicas en 76 estaciones de precipitación y 23 estaciones de temperatura. Arrojando algunos de los siguientes resultados:

Tabla 4 – Estadístico Descriptivos de Precipitación (mm)

Estación	Mínimo	Máximo
Las Cintas	69.40	78.40
Duitama	103.10	537.10
Crucero La villita	6.10	12.10
El encanto	20.5	52.60
El Cerezo	131.7	146.90
Los Colorados	53.90	57
El Caracol	250	271.7
Campohermoso	313.20	358.3
El Cocuy	60.5	69.30
Chivor	78.50	88
Combita	45.7	53.8

El Cardón	220.8	257.60
Chinavita	110.20	122.5
Cerinza	128.30	132.20
La Capilla	261.7	312.60
Chiscas	99.20	110
Corinto	24.60	30.40

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5 – Estadístico Descriptivos de Temperatura

Estación	Mínimo	Máximo
Puerto Boyacá	11.70	15.50
Otanche	20.60	24.30
Buena Vista	14.60	17.50
Aeropuerto Furatena	19.80	24
Institución Agrícola Sofia	14.20	18.50
Villa Carmen	12.30	16.20
Villa de Leyva	14.90	19.30
Saboya	13.20	16.30
Sierra Aut	9.60	14.20
Casagui	10.6	14.90
Beteitiva	13.20	17.40
La Copa	11	16.20
Guican	11.20	15.50
Surbatanonza	12.50	17.60
UPTC	11.70	16
Belencito	13.50	18.10
Sierra Nevada Cocuy	5.20	10
Chita	9.70	14.60
Chiscas	15.10	20
Sativa Norte	14.30	17.30
Boavita	13.90	20.8
Aeropuerto Lleras	12.40	18.90
Andalucía	8.40	12.30



Cerinza	12	16.10
Tunguavita	13.20	17
Nuevo Colon	15.40	19.40
Sutatenza	15.70	20.20
Villa Luisa	14.70	19.60
Institución Agrícola Macanal	15.60	20
Rondón	14.30	19.50
El Vivero	16.40	22.20
Campohermoso	19	24.40
El túnel	9.40	13.70
Corinto	13.40	21.8
Cardonel	4.50	8.60

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo anterior se logró establecer una precipitación y temperatura promedio, para el departamento de Boyacá de 124.71 milímetros y 15.5 grados centígrados respectivamente. A continuación, se muestra la ubicación de estas estaciones que se lograron completar.

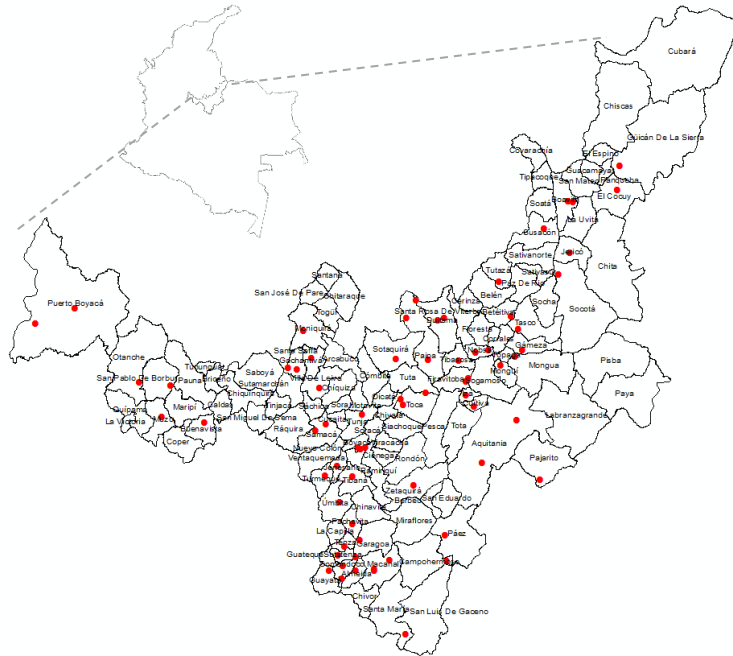
En las ilustraciones 2 y 3, se presentan las estaciones que se lograron completar en el estudio en el departamento de Boyacá.

Ilustración 2 – Localización geográfica del departamento de Boyacá y de las estaciones climatológicas de precipitación en Boyacá usadas para el estudio.



Fuente: Adaptación propia, con base cartográfica entregada por IGAC y Corpoboyacá.

Ilustración 3 – Localización geográfica del departamento de Boyacá y de las estaciones climatológicas de temperatura en Boyacá usadas para el estudio.



Fuente: Adaptación propia, con base cartográfica entregada por IGAC y Corpoboyacá.



7. LOS EFECTOS MACROCLIMATICOS DEL NIÑO Y LA NIÑA EN BOYACA.

Al igual que en la mayoría de departamentos de Colombia, Boyacá se encuentra afectada por mayores precipitaciones en temporada de La Niña y temperaturas altas en temporada del Niño. Por tanto, con los datos ya completados se relacionó la identificación del evento con los índices y la presencia de precipitaciones altas para la Niña. Para el Niño Precipitaciones bajas con temperaturas altas.

7.1 Índice de Niño Oceánico - ONI

El índice ONI refleja las anomalías de temperatura de la superficie del océano, calculadas como un promedio en la región conocida como Niño 3.4, ubicada en el Pacífico tropical centro-oriental, entre los 120° y 170° de longitud oeste. En los últimos 40 años se encontró que al identificar las 23 estaciones de temperatura desde el año 1983 hasta el 2020, 22 años presentaron evento niño correlacionados con temperaturas altas y precipitaciones bajas. Es decir, un 57.89% de los años, 42.10% fueron evento Niña correlacionado con precipitaciones altas. Por lo que se puede deducir que en los últimos años el evento Niño ha tenido mayor protagonismo mas sin embargo La Niña también ha sido relevante sobre todo en la temporada invernal del 2010-2011.

La grafica 6 representa la relación de eventos de precipitación baja y temperaturas altas con la presencia del fenómeno del niño, La grafica 7 permite visualizar los eventos de precipitaciones bajas y temperaturas altas por mes, es decir de toda la serie histórica muestra los meses en donde más se repitió esta relación entre las variables hidro climatológicas.

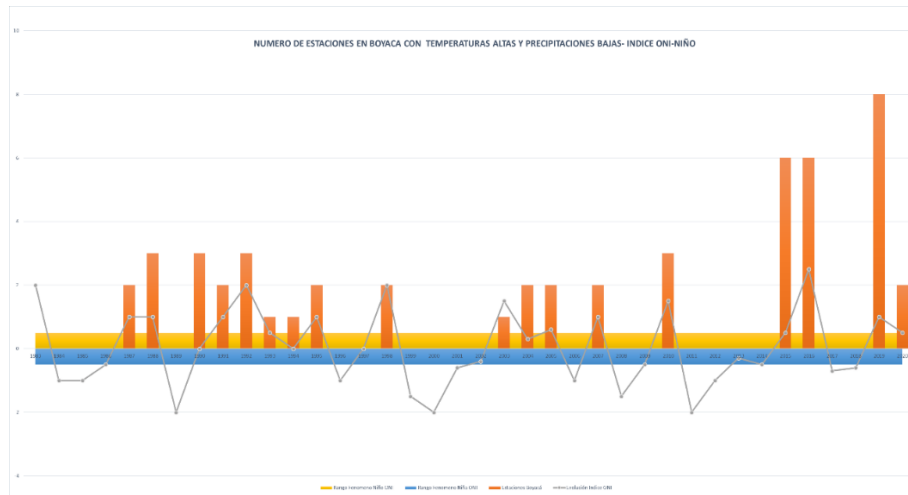
Al estudiar el índice oceánico ONI, se encontró que, en los años 2002, 2015, 2016 y 2019 se observaron la presencia de temperaturas altas y precipitaciones bajas correlacionadas con el índice ONI para presencia del evento climático del Niño.

Todas las 23 estaciones que lograron correlacionar temperatura y precipitación han logrado presentar algún evento de temperaturas altas y precipitaciones bajas. Pero no necesariamente indican que son evento niño o coinciden con índice oceánico (ONI). Es decir, los índices para identificación del niño coinciden en gran medida con temperaturas altas y precipitaciones bajas mas no es concluyente para la presencia del fenómeno.

Se pudo hallar también que la influencia del fenómeno del niño y el índice ONI se hace más evidente con los últimos años, algo que se puede deber a la mejora de calidad de información en las estaciones en estos últimos 5 años.

Los meses en los que se presentaron más eventos de temperaturas altas y precipitaciones bajas fueron los meses de junio y diciembre con las estaciones relacionadas y los datos históricos del año 1983 hasta 2020.

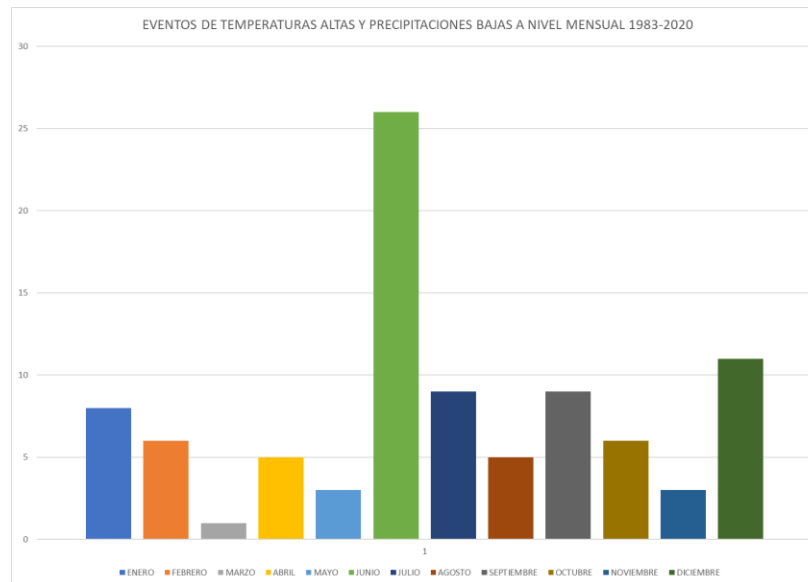
Gráfica 6 Correlación de las estaciones de temperatura índice ONI



Fuente: adaptación propia de acuerdo a datos

http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Procesamiento: LHFM/AFIOF/DGIOCC/IMARPE.

Gráfica 7 Eventos de temperaturas altas y precipitaciones bajas a nivel mensual entre 1983 a 2020

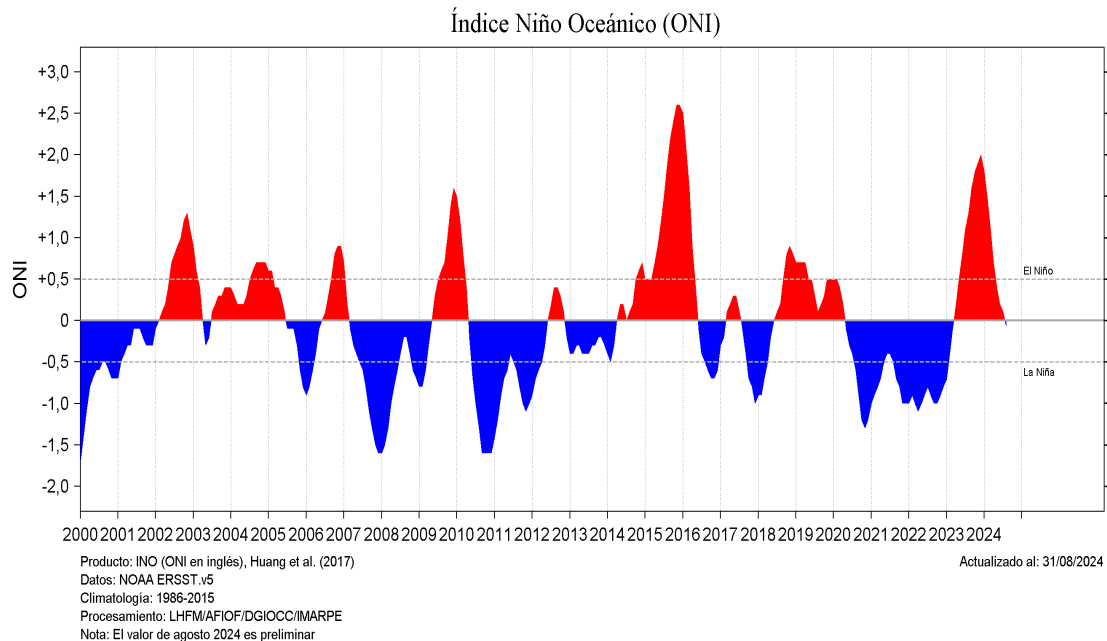


Fuente: Elaboración propia de acuerdo a datos noaa.

Al realizar la misma metodología para las 76 estaciones de precipitación. Se encontró que los eventos de precipitaciones altas son muy frecuentes y no necesariamente relaciona la presencia de un evento Niña.

La grafica 8 presenta la evolución histórica del índice oceánico ONI en los últimos 24 años, para la identificación del fenómeno del Niño o la Niña.

Gráfica 8 Índice Niño Oceánico (ONI)



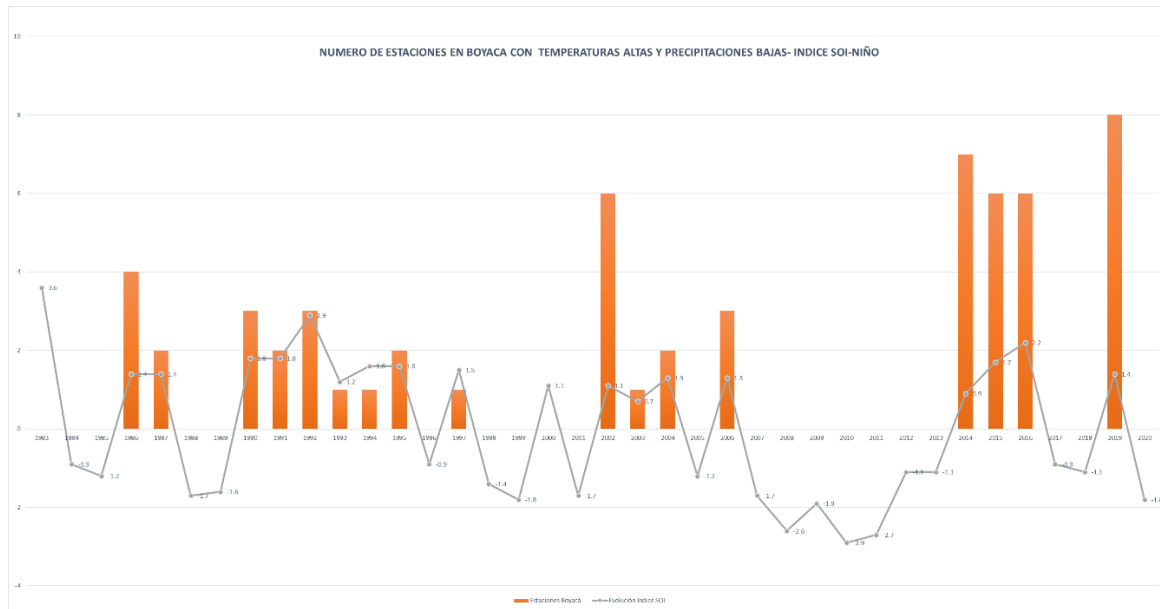
Fuente: Elaboración Serie de Tiempo del Índice Niño Oceánico (ONI en inglés) para los últimos 20 años de acuerdo a Huang et al. (2017). Los periodos cálidos (en color rojo) o fríos (en color azul) que sobrepasan el umbral de $+0.5^{\circ}\text{C}$ o -0.5°C indican la ocurrencia de El Niño o La Niña, respectivamente. Los datos están disponibles http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Procesamiento: LHFM/AFIOF/DGIOCC/IMARPE.

7.2 Índice de Oscilación Sur - SOI

En los últimos 40 años se encontró que al identificar las 23 estaciones de temperatura desde el año 1983 hasta el 2020, 19 años presentaron evento niño correlacionados con temperaturas altas y precipitaciones bajas. Es decir, un 53% de los años, 47% fueron evento Niña correlacionado con precipitaciones altas. Por lo que se puede deducir que en los últimos años el evento Niño ha tenido mayor protagonismo más sin embargo La Niña también ha sido relevante.

Los índices para identificación del niño coinciden en gran medida con temperaturas altas y precipitaciones bajas mas no es concluyente para la presencia del fenómeno en el índice SOI. Al igual que en el índice ONI se hace más evidente la correlación entre temperaturas altas y precipitaciones bajas en los últimos 5 años. Por tanto, al revisar la serie histórica del índice con la relación de eventos niño es muy similar en su comportamiento al del índice ONI. La grafica 10 representa la evolución histórica del índice SOI a lo largo del tiempo.

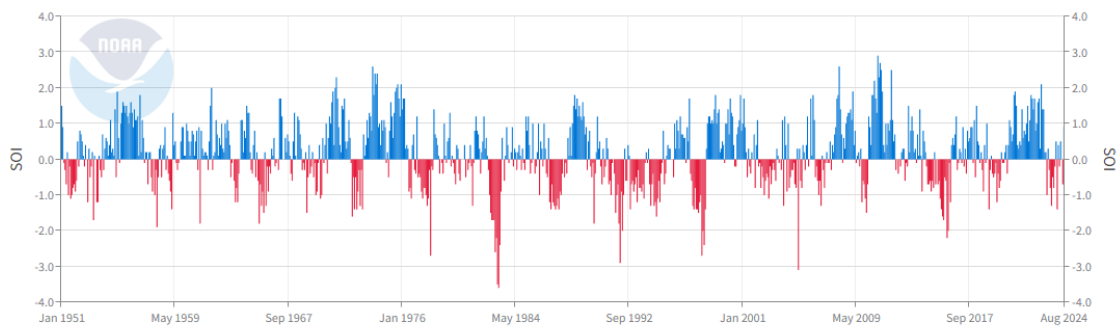
Gráfica 9 Correlación de las estaciones de Temperatura con índice SOI



Fuente: adaptación propia de acuerdo a datos de National Centers for Enviromental information (<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/soi>)

Gráfica 10 Serie histórica índice SOI

Southern Oscillation Index (SOI)



Source: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/soi>

Powered by ZingChart

Fuente: Tomada de www.noaa.gov

Al realizar la misma metodología para las 76 estaciones de precipitación. Se encontró que los eventos de precipitaciones altas son muy frecuentes y no necesariamente relaciona la presencia de un evento Niña.



8. PROCESO PARA LA CREACION DE MAPAS DE COBERTURAS DE CULTIVOS EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACA.

La generación de mapas de cobertura de cultivos es una herramienta esencial para el monitoreo y gestión del territorio agrícola, permitiendo evaluar los cambios en el uso del suelo y los efectos de factores climáticos e hidrológicos sobre la producción agrícola. En el departamento de Boyacá, donde la actividad agropecuaria es fundamental para la economía y el desarrollo rural, la cartografía de coberturas facilita la toma de decisiones en planificación, adaptación al cambio climático y manejo de los recursos naturales.

Este proceso involucra la recopilación, procesamiento y análisis de datos satelitales y geoespaciales mediante técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG). A través de metodologías estandarizadas, se identifican y clasifican las áreas de cultivo, permitiendo establecer patrones de distribución, estimar superficies sembradas y analizar su evolución en el tiempo.

8.0 Obtención de conjunto de imágenes satelitales

En primer lugar, fue necesario establecer el área de estudio y la cantidad de imágenes necesarias para la creación de un polígono que tome la totalidad del departamento de Boyacá. En el caso de estudio, se utilizó 4 imágenes de datos abiertos de la NASA, específicamente de la plataforma earthexplorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Se utilizaron imágenes satelitales correspondientes a las fechas establecidas por el contratista como eventos niños, exceptuando algunos años que, por la complejidad en el nivel de nubosidad, se tomó el año inmediatamente anterior o posterior.

Cada una de las imágenes satelitales tenía un porcentaje de nubosidad entre y el 30% al momento de ser descargadas de la plataforma.

8.1 Postproceso de imagen

El postproceso de imágenes satelitales es una etapa clave en el análisis y utilización de datos obtenidos por sensores remotos. Consistió en una serie de técnicas destinadas a mejorar la calidad de las imágenes, corregir distorsiones y extraer información relevante para aplicaciones en cartografía.

8.2.1 Composición de bandas.

Las imágenes satelitales obtenidas de earthexplorer vienen compuestas por 6, 7 u 11 bandas dependiendo del satélite con el cual fueron tomadas, en los casos de estudio se obtuvieron imágenes satelitales de:

- Landstat 5: 6 bandas
- Landstat 8: 7 bandas
- Landstat 9: 11 bandas

Cada una de las imágenes requirió realizar la composición de bandas con la herramienta “composite bands”, dando como resultado un único elemento ráster con toda la información de espectros de color.

8.2.2 Creación del mosaico.

Luego de realizar la composición de bandas, fue necesario crear un único elemento ráster que cubriera el área de estudio, se utilizó la herramienta “Mosaic to new raster” para la creación de una única imagen en formato tif.

8.3 Extracción de la zona de interés.

Utilizando la herramienta “Extract by mask” se delimitó el área de estudio únicamente al polígono que comprendía el departamento de Boyacá

8.4 Creación del uso de suelo

En el postproceso de las imágenes se deben crear distintos usos de suelo para poder identificar la cobertura de cultivo general en el departamento y poder conocer su evolución en el tiempo.

8.4.1 Creación de marcas de clase

Para la creación de marcas de clase, es necesario generar un nuevo elemento tipo shapefile y realizar la caracterización de manera manual de por lo menos tres mil puntos de interés, entre los cuales se utilizaron:

- **Zona de cultivo**
- **Zona urbana**
- **Afloramiento de roca**
- **Zona de bosque**
- **Cuerpos de agua**
- **Nubes**
- **Glaciar**



Nota: para establecer las muestras de cada una de las unidades cartografiables se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

Forma y tamaño: Las diferentes unidades cartografiables pueden tener formas y tamaños característicos. Por ejemplo, las zonas de cultivo suelen tener formas rectangulares o cuadradas, mientras que los bosques pueden tener formas más irregulares.

Textura: La textura de una imagen satelital se refiere a la variación espacial de los valores de los píxeles. Las zonas de bosque suelen tener una textura rugosa, mientras que las zonas de agua suelen tener una textura suave.

Patrones espaciales: Los diferentes tipos de cobertura terrestre pueden presentar patrones espaciales específicos. Por ejemplo, las zonas urbanas suelen estar organizadas en cuadrículas, mientras que los ríos tienen patrones lineales.

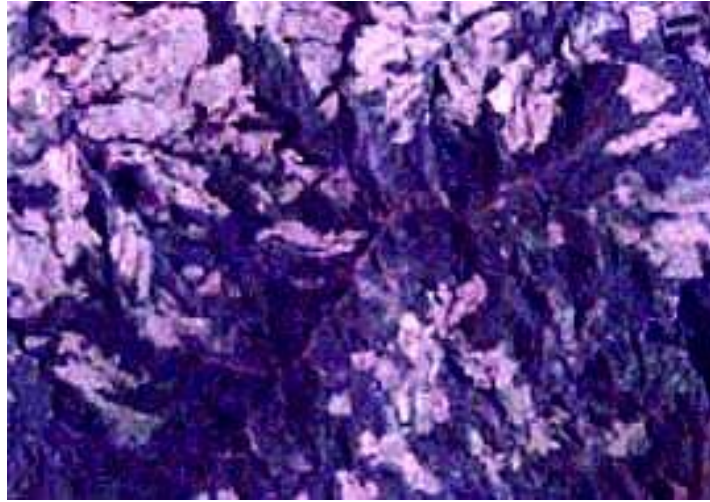
En las ilustraciones 4 y 5, se muestran un ejemplo de las imágenes satelitales a las que se realiza el post proceso de identificación para las coberturas y realizar el análisis geoespacial para la identificación de la cobertura de cultivo y su evolución en el tiempo.

Ilustración 4 Zona de Cultivo



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 5 Zona de Bosque



Fuente: Elaboración propia

Para lograr discriminar la zona de cultivo, fue necesario establecer las unidades cartografiables anteriormente mencionadas, cada uno de los puntos fue colocado de manera manual a una escala de 1:100.000, ya que la zona de estudio correspondía a más de 20.000 km², es decir 20.000.000.000 m².

8.4.2 Creación de firmas

Luego de establecer las unidades cartografiables, se utilizó la herramienta “create signatures” para alimentar a la herramienta con los valores de pixel de cada una de las unidades previamente establecidas.

8.4.3 Clasificación por máxima verosimilitud

Utilizando la herramienta “maximum likelihood classification” o clasificación por máxima verosimilitud, la herramienta ArcMap realizó un análisis de proximidad de los píxeles de las unidades cartográficas para lograr establecer en toda el área de estudio cuales pertenecían a cada una de ellas por máxima verosimilitud.

8.5 Filtro de mayoración

La herramienta ArcMap no tiene la capacidad de analizar vectorizar más de setenta millones de polígonos, por eso fue necesario eliminar las unidades cartografiadas que tuvieran menos de ocho vértices, utilizando la herramienta “majority filter” se eliminaron los elementos que no tenían representatividad a una escala 1:500.000.

8.6 Conversión ráster a polígono

Después de discretizar las unidades cartografiadas, se realizó el postproceso para transformar el ráster obtenido del filtro de mayoración en un elemento tipo shapefile con la herramienta “ráster to polygon” para obtener una capa de polígonos.

8.7 Extracción de atributos de interés

Se seleccionaron los polígonos de interés y se extrajeron con la herramienta “clip” de la capa shapefile para así finalmente tener una capa que contenía únicamente la zona de cultivo del departamento de Boyacá.

8.8 Creación de mapa de zona de cultivo

Para la creación del mapa, se superpusieron los shapefile del departamento de Boyacá junto con el shapefile de la zona de cultivo, exportando una imagen tipo PNG y un mapa en formato PDF.

9. ANALISIS MULTITEMPORAL DE COBERTURA DE CULTIVOS EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

Para minimizar el impacto del error en la representatividad de los datos, se realizó una cuidadosa selección de las imágenes satelitales Landsat. Se priorizaron aquellas imágenes con una nubosidad menor al 30% del área total, asegurando así una mayor calidad de la información y reduciendo la presencia de elementos que pudieran afectar la clasificación del uso del suelo.

Las imágenes satelitales del año 1985 al año 2000, se tomaron de los satélites Landsat 4 y 5, las imágenes satelitales del año 2000 al año 2014 no se encuentran disponibles ya que pertenecen al satélite Landsat 7 y dicha información se encuentra bloqueada, las imágenes del año 2015 al año 2023 corresponden a los satélites Landsat 8 y 9.

Si bien es cierto que los datos utilizados pueden presentar un error de hasta el 30%, es importante considerar que este error se encuentra dentro de un rango aceptable para la escala de trabajo empleada. En el ámbito de la cartografía a escalas pequeñas, un error de hasta el 30% se considera tolerable, ya que no afecta significativamente la interpretación general de los resultados.

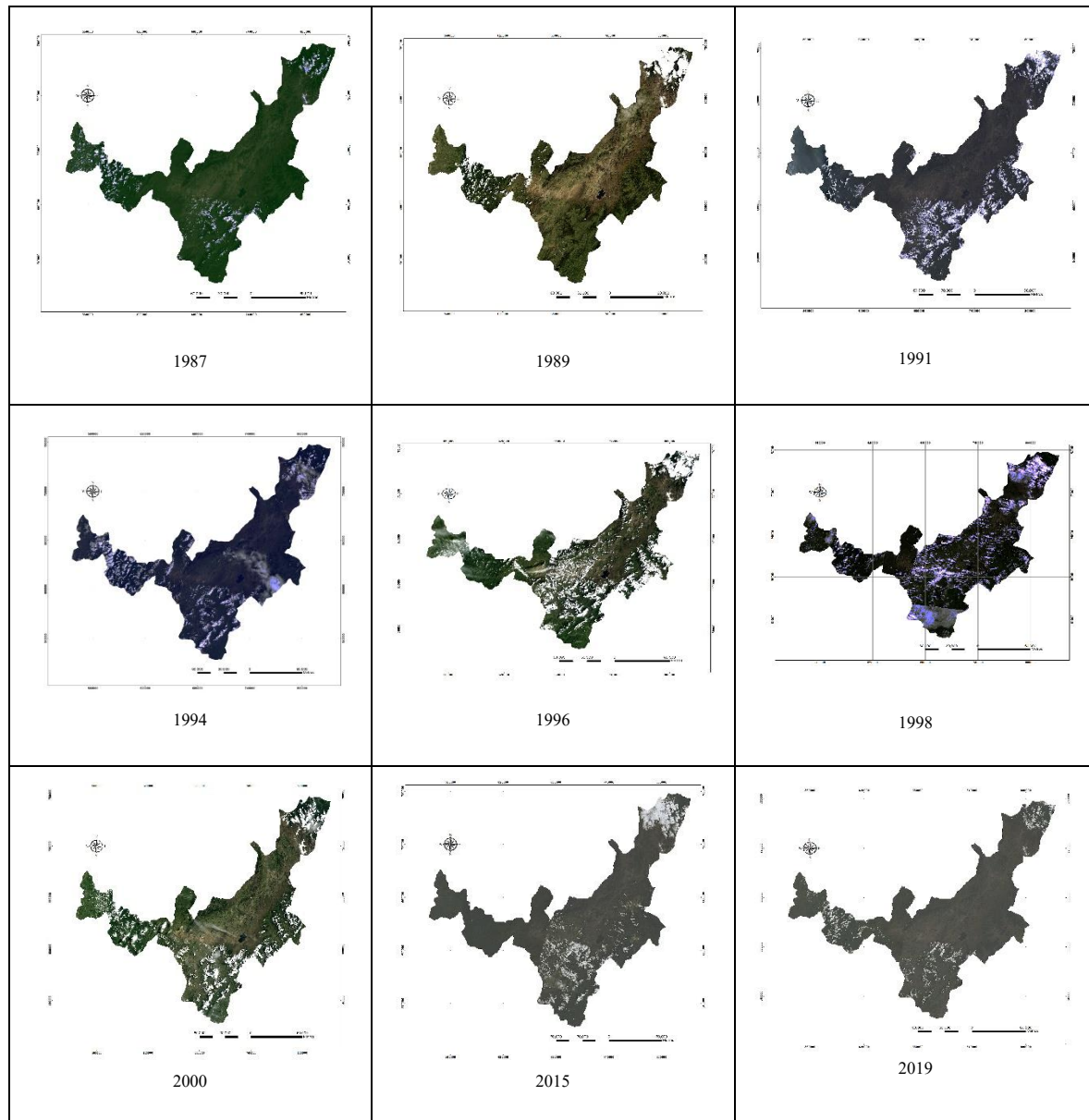
Es importante destacar que la representatividad de los datos no solo depende del error inherente a la información utilizada, sino también de la metodología empleada para su análisis. En este caso, se utilizó una metodología robusta y validada para la clasificación del uso del suelo a partir de imágenes satelitales, lo que contribuye a aumentar la confiabilidad de los resultados.

En base a lo expuesto, se puede afirmar que la representatividad de los datos utilizados para el trabajo realizado es aceptable para la escala de trabajo empleada (1:500.000). El error potencial de hasta el 30% se encuentra dentro de un rango tolerable para este tipo de análisis, y se ha minimizado aún más mediante la selección cuidadosa de imágenes satelitales con baja nubosidad.

En la ilustración 6, se presentan las imágenes a las cuales se realizaron el post proceso para plena identificación de la cobertura general de cultivo. Para así generar el análisis temporal de evolución de las coberturas de cultivo en el departamento de Boyacá.

A continuación, en la ilustración 6, se presentan los resultados de coberturas de cultivo en Boyacá con el análisis multitemporal. Las tonalidades de color blanca representan la cobertura de cultivo general identificada en el post procesos de las imágenes satelitales. En la gráfica 11 se representa la evolución en el área de coberturas de acuerdo a la ilustración 6.

Ilustración 6 Análisis de temporalidad de coberturas de cultivo en el departamento de Boyacá 1987 a 2019



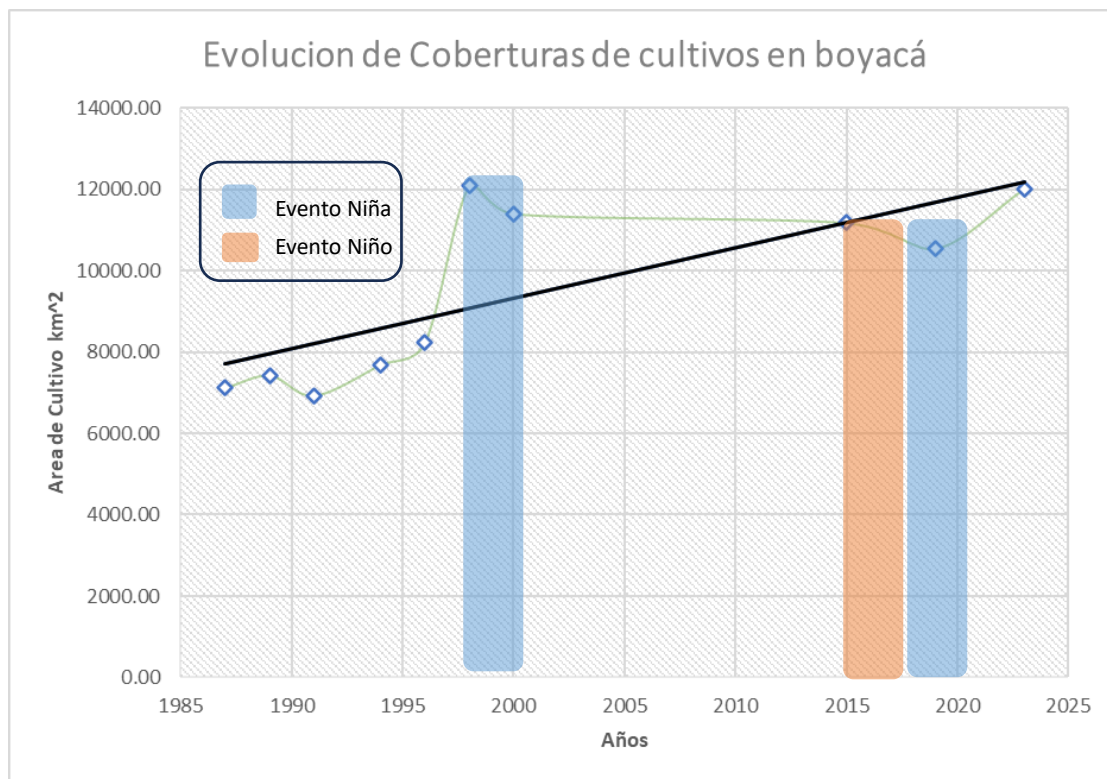
Fuente: Elaboración propia

De la Ilustración 6 se puede encontrar que, en la temporalidad analizada en los años 1987, 1989, 1991, 1994, 2000, 2015 y 2019 es decir el 77% de estos eventos analizados no se presentaron coberturas de cultivo respecto a otras áreas en Paipa, Nobsa, Sogamoso, Firavitoba, Cuitiva, Aquitania y Pajarito.

El análisis de la evolución de las coberturas cultivadas en Boyacá evidencia una tendencia creciente en el área agrícola desde 1985, a pesar de fluctuaciones marcadas en ciertos periodos. Se destaca un incremento abrupto entre 1995 y 2000, seguido de una fase de falta de información en el satélite del año 2000 a 2015 y un descenso moderado hacia 2019, probablemente asociado a eventos climáticos adversos. La recuperación reciente sugiere un patrón resiliente del sistema productivo, aunque las variaciones interanuales reflejan la sensibilidad de los cultivos frente a factores socioeconómicos y ambientales.

De acuerdo a lo presentado en la Ilustración 6, a continuación, se consolida en área dada en kilómetros cuadrados por año en la cobertura de cultivo.

Gráfica 11 Evolución de coberturas de cultivos en Boyacá



Fuente: Elaboración propia

En general se puede observar que a lo largo del tiempo la cobertura de cultivos va en aumento, se denota que, a pesar de los eventos extremos de niño, el departamento al tener una topografía compleja que abarca varios pisos térmicos, tiene una resiliencia para mantener coberturas de cultivo independientemente del período climático que viva. Es decir, el departamento de Boyacá tiene la capacidad de adaptarse a diferentes tipos de cultivo por la variedad de pisos térmicos, la topografía y variabilidad climática que tiene al ubicarse a lo ancho de la cordillera oriental.



10. INFLUENCIA DE EL NIÑO Y LA NIÑA EN LA AGRICULTURA DEL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

Debido a lo presentado en el capítulo 9, donde la escala no permite visualizar en detalle la afectación en los cultivos, se hace necesario consultar las fuentes estadísticas de la metodología general encuesta nacional agropecuaria ENA. En donde se puede consultar por cultivo su área en hectáreas cultivadas, su producción en toneladas y su rendimiento. Luego estos datos se confrontarán con los datos recolectados de pluviosidad y temperatura, y a su vez permitirá correlacionar con el índice SOI y las respectivas disminuciones en producción.

Para analizar el impacto de los fenómenos del Niño y la Niña en Boyacá, se deben identificar los principales cultivos generados en la región los cuales en su orden de importancia son: caña panelera, café y cacao. Los productos clasificados por rendimiento son: cebolla en rama y la caña miel. Los principales cultivos transitorios son: papa, maíz tradicional, frijol y cebolla en bulbo. Por tanto, se analizan 7 cultivos con el fin de correlacionar su disminución de pérdida de cobertura, producción y rendimiento. Para caracterizar de una manera efectiva los impactos de producción agrícola en la región por el cambio climático. Para el análisis de los impactos en cada cultivo se presentan los datos de producción de cada cultivo en el departamento. Luego se muestra la gráfica de la evolución de las áreas de cultivo por cada departamento en hectárea de cultivo por cada año. Luego la producción en toneladas y el rendimiento de la producción.

10.1 Análisis del impacto climático sobre el cultivo de la papa en Boyacá.

En los últimos 20 años el fenómeno de La Niña ha sido más relevante a la hora de analizar la disminución de producción agropecuaria de la papa. La ola invernal del año 2010 y 2011 por ejemplo, causó afectaciones simultáneas a lo largo de los años del 2010 hasta el 2013. Para el año 2018 en presencia del fenómeno de la niña se produjo una pérdida de cobertura de hasta del 42% con respecto al año anterior siendo una de las pérdidas de cultivo más grandes en una escala de tiempo del año 2007 a 2022.

De acuerdo al capítulo 9, en donde a nivel general las coberturas de cultivo han venido aumentando a pesar de los efectos climáticos y disminuciones de producción. Lo mismo sucede con la papa ya que del año 2007 donde se presentaba un rendimiento de 16.5 Ha/Ton, para el año 2020 se presentó un rendimiento de 20.85 Ha/Ton. Mostrando la resiliencia del cultivo a la afectación del cambio climático en el departamento.

El niño tuvo su mayor participación en el año 2016 en donde el cultivo de la papa sufrió una disminución del 7.8% de pérdida de cobertura respecto al año anterior y se presentó el mayor índice SOI del -2.2 en los últimos 20 años.

Se ha podido observar del año 2007 a 2020, que la presencia simultánea en años de algún fenómeno ya sea Niño o Niña obedece a un patrón de disminución de área de cobertura en la presencia de esos años. Es decir, a medida que se repite un evento climático del mismo fenómeno, el cultivo tiende a disminuir en ese periodo.

Analizando la ola invernal del 2010 y 2011, se presentaron disminuciones de pérdida de cobertura de cultivo de la papa consecutivas en los años 2011, 2012 y 2013. En esos años se registraron precipitaciones medias mensuales máximas de hasta 750 mm. Las estaciones que presentaron mayores precipitaciones fueron: Páez, Vista Hermosa, El Trínque, Nazareth, Pajarito, entre otras.

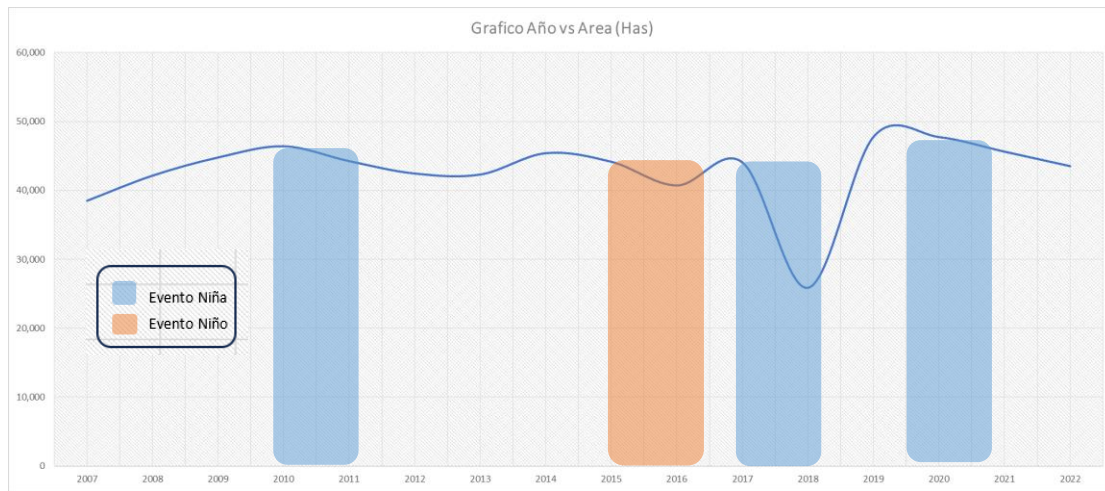
En los años del 2015 y 2016 se presentaron disminuciones de cobertura de cultivo de la papa en presencia del fenómeno del niño, se presentaron temperaturas máximas de hasta 24 C (grados centígrados).

Tabla 6 – Datos de Producción de Cultivo de la papa en el departamento de Boyacá.

AÑO	DEPARTAMENTO	PRODUCTO	AREA (HA)	PRODUCCION (TON)	RENDIMIENTO HA/TON
2007	BOYACA	PAPA	38,509	635,433	16.50
2008	BOYACA	PAPA	42,158	683,677	16.22
2009	BOYACA	PAPA	44,787	775,771	17.32
2010	BOYACA	PAPA	46,412	816,435	17.59
2011	BOYACA	PAPA	44,251	746,305	16.87
2012	BOYACA	PAPA	42,452	734,952	17.31
2013	BOYACA	PAPA	42,310	733,225	17.33
2014	BOYACA	PAPA	45,412	825,324	18.17
2015	BOYACA	PAPA	44,155	791,964	17.94
2016	BOYACA	PAPA	40,725	725,425	17.81
2017	BOYACA	PAPA	44,051	882,393	20.03
2018	BOYACA	PAPA	25,873	516,017	19.94
2019	BOYACA	PAPA	47,804	1,015,886	21.25
2020	BOYACA	PAPA	47,742	997,098	20.88
2021	BOYACA	PAPA	45,625	942,410	20.66
2022	BOYACA	PAPA	43,526	907,603	20.85

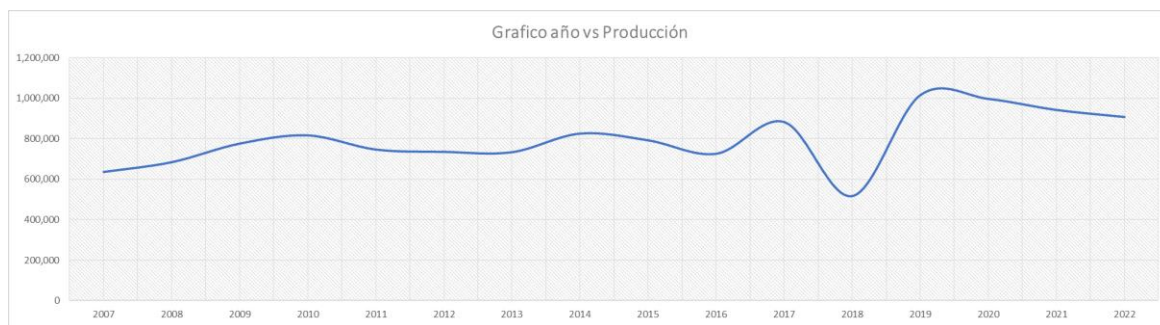
Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 12 Evolución de las áreas de cultivo de papa en el departamento de Boyacá



Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 13 Evolución de la producción de cultivo de papa para el departamento de Boyacá



Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 14 Evolución del rendimiento de cultivo de papa en el departamento de Boyacá



Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

10.2 Análisis de impacto climático del cultivo de caña panelera en Boyacá.

El año del 2010 fue el más representativo en cuestión de impacto ante el evento de la niña, ya que se produjo una reducción en área de cobertura de hasta un 12.8% siendo la mayor área de perdida de cobertura del cultivo en presencia de La Niña.

Para la caña panelera en el departamento de Boyacá, en el año 2019 se presentó la mayor pérdida de cobertura de este cultivo en los últimos 20 años. Mas del 29.4% de disminución con respecto al año anterior. Ese año se presentó un evento Niño, con un índice SOI de -1.4 no necesariamente mayor como por ejemplo el fenómeno presentado en el año 2016.

Analizando los periodos simultáneos de presencia de eventos macroclimaticos, tenemos que del año 2010 a 2011 se presentaron disminuciones de cobertura así, como la presencia de la Niña en esos dos años seguidos. Del año 2014 a 2016, en presencia del Niño se generaron perdidas de cobertura en cada uno de esos años.

Se puede observar que la mayoría de veces en los años en donde se presentaron disminuciones de área de cobertura fueron consecuentes con la disminución de toneladas de producción de cultivo. Mas sin embargo en el año 2019 se generó un disparo en la producción a pesar de tener la disminución más alta de área de cobertura de cultivo de caña panelera.

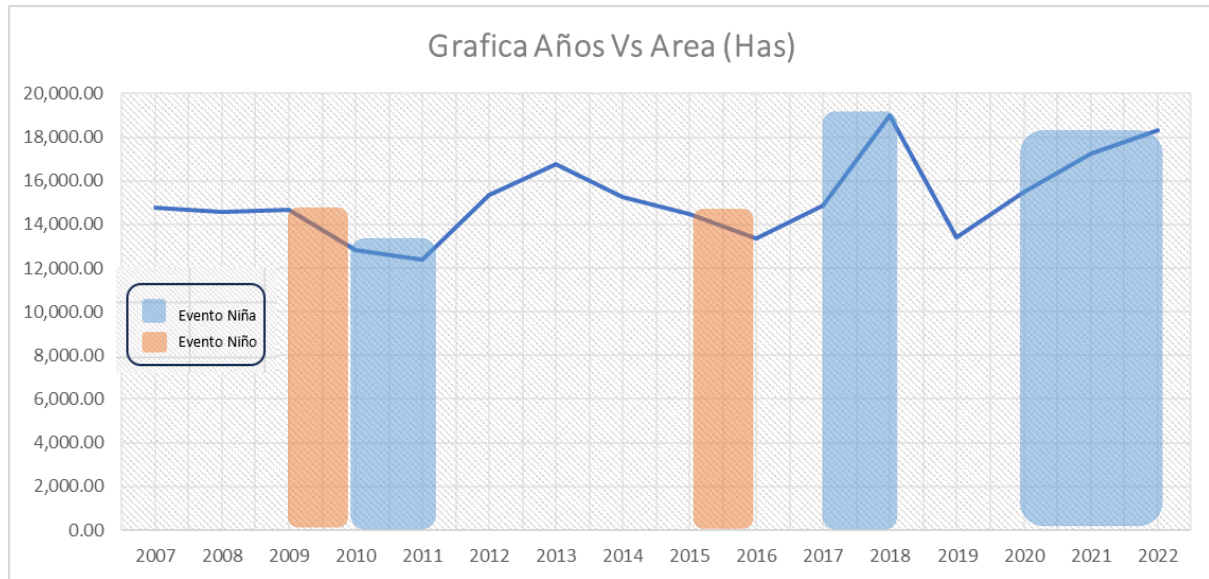
Las precipitaciones más altas presentadas fueron de hasta 967 mm y temperaturas altas de hasta 24 C. las estaciones pluviométricas con mayor intensidad fueron Nazareth y Páez.

Tabla 7 – Datos de Producción de Cultivo de caña panelera en el departamento de Boyacá.

Año	Departamento	Producto	Area (ha)	Produccion (ton)	Rendimiento (ha/ton)
2007	BOYACA	CAÑA PANELERA	14,760.50	198,060.25	13.42
2008	BOYACA	CAÑA PANELERA	14,570.00	192,831.15	13.23
2009	BOYACA	CAÑA PANELERA	14,697.00	177,757.75	12.09
2010	BOYACA	CAÑA PANELERA	12,810.00	160,677.00	12.54
2011	BOYACA	CAÑA PANELERA	12,387.00	159,529.90	12.88
2012	BOYACA	CAÑA PANELERA	15,367.00	177,073.00	11.52
2013	BOYACA	CAÑA PANELERA	16,742.00	182,215.30	10.88
2014	BOYACA	CAÑA PANELERA	15,257.00	168,006.80	11.01
2015	BOYACA	CAÑA PANELERA	14,478.00	163,941.19	11.32
2016	BOYACA	CAÑA PANELERA	13,350.50	161,479.85	12.10
2017	BOYACA	CAÑA PANELERA	14,856.50	132,848.85	8.94
2018	BOYACA	CAÑA PANELERA	19,020.50	173,639.25	9.13
2019	BOYACA	CAÑA PANELERA	13,428.40	1,329,078.00	98.98
2020	BOYACA	CAÑA PANELERA	15,503.00	1,557,837.56	100.49
2021	BOYACA	CAÑA PANELERA	17,227.00	1,723,457.04	100.04
2022	BOYACA	CAÑA PANELERA	18,335.85	1,748,791.90	95.38

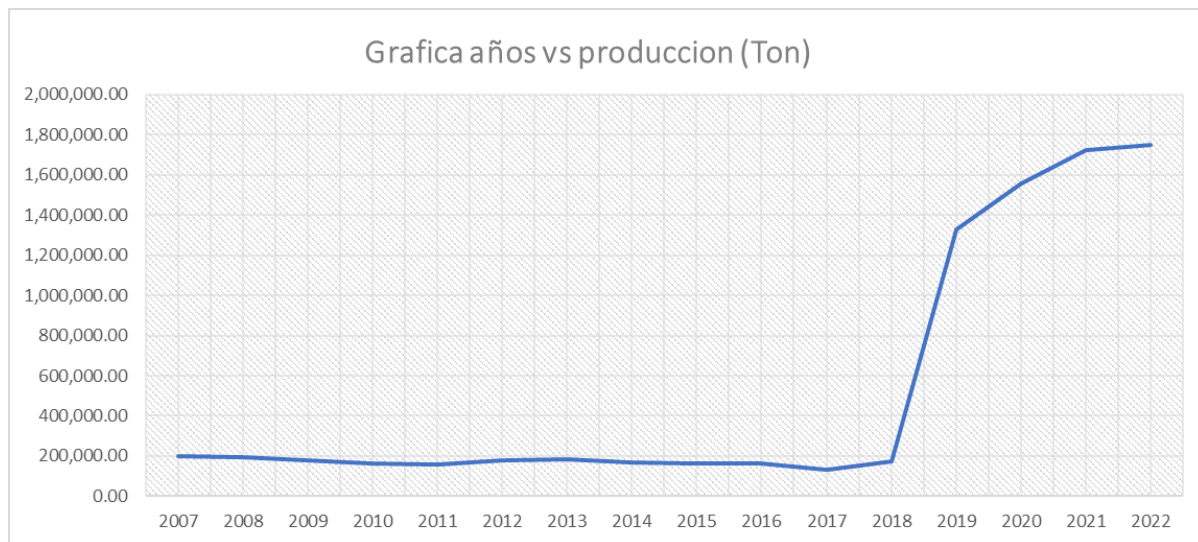
Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 15 Evolución de las áreas de cultivo de caña panelera en el departamento de Boyacá



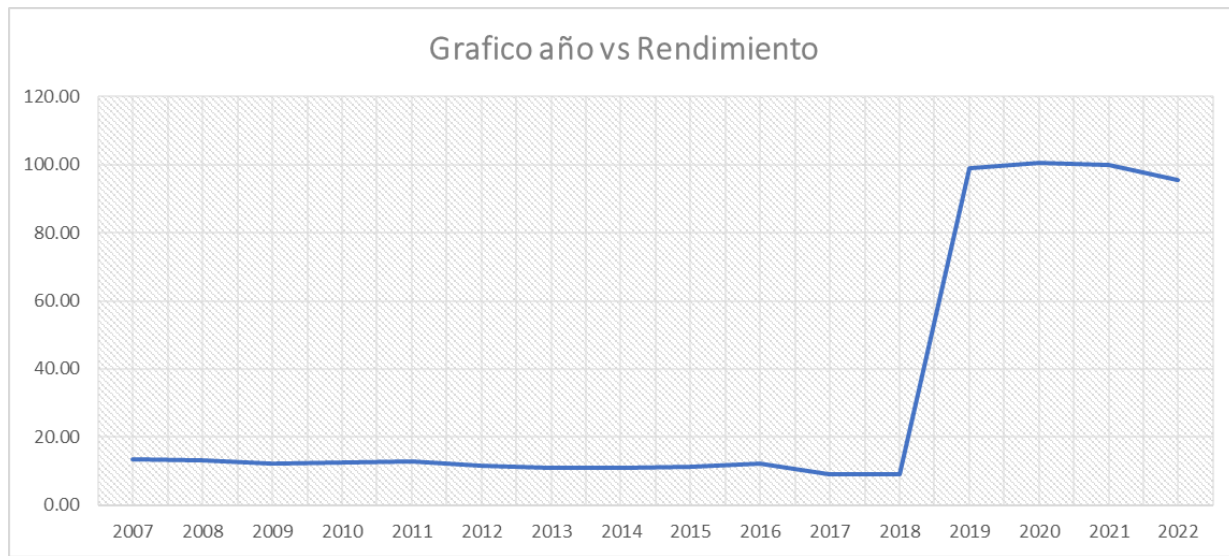
Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 16 Evolución de la producción de cultivo de caña panelera en el departamento de Boyacá



Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 17 Evolución del rendimiento de cultivo de caña panelera en el departamento de Boyacá



Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

10.3 Análisis de impacto climático del cultivo de cebolla en rama en Boyacá.

La cebolla en rama ha tenido más eventos de disminución de cobertura en presencia del Niño en los últimos 20 años. En el año 2016 se presentó la mayor pérdida de cobertura respecto al año anterior con un porcentaje de 19.9%. Este detrimento coincide con uno de los índices SOI más altos para el evento del Niño de valor -2.2 en los últimos 40 años de evolución del índice.

Lo anterior se vuelve a presentar para el evento Niña. En el año 2011, se presentó una disminución de cobertura del 6.4%. Esto coincidió con uno de los índices SOI más altos en los últimos 40 años para el evento de la Niña. Es decir, justo en la ola invernal 2010 – 2011 que tanto azoto al país en varios aspectos de su desarrollo.

La presencia del evento Niño en el año 2019, coincidió que, en la cebolla en rama, se presentara una pérdida de área de cobertura, baja en la producción y disminución de rendimiento simultáneamente.

Para el cultivo de la cebolla en rama en los eventos del fenómeno de la Niña, se presentaron precipitaciones mensuales máximas de 600 mm aproximadamente. En el año 2016, durante la presencia del evento Niño se presentaron temperaturas máximas de 18.6 grados centígrados. En una ventana de tiempo de 2077 a 2022 se han presentado temperaturas máximas de hasta 23.5 grados centígrados.

Al observar el comportamiento de evolución de las áreas de cobertura de cultivo en el departamento de Boyacá, obedece a un patrón distinto a los cultivos de la papa y la caña panelera



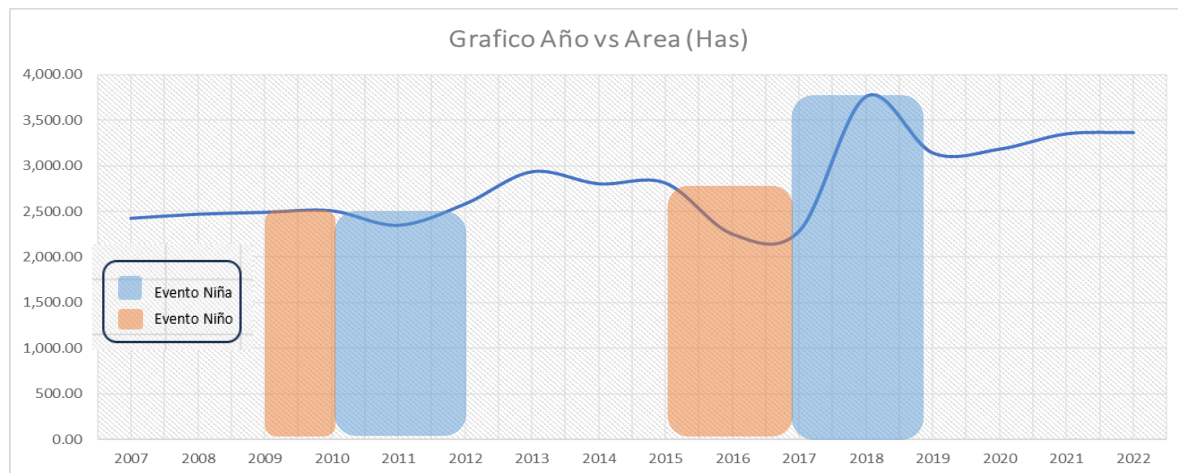
ya que no se observa disminuciones consecutivas año a año. Pero si son coincidentes las mayores pérdidas de área de cobertura con los mayores índices SOI para el evento Niño y Niña.

Tabla 8 – Datos de Producción de Cultivo de cebolla de rama en el departamento de Boyacá.

AÑO	DEPARTAMENTO	PRODUCTO	AREA (HA)	PRODUCCION (TON)	RENDIMIENTO HA/TON
2007	BOYACA	CEBOLLA DE RAMA	2,424.50	94,127.50	38.82
2008	BOYACA	CEBOLLA DE RAMA	2,469.00	95,128.00	38.53
2009	BOYACA	CEBOLLA DE RAMA	2,489.00	97,658.00	39.24
2010	BOYACA	CEBOLLA DE RAMA	2,507.00	98,020.00	39.10
2011	BOYACA	CEBOLLA DE RAMA	2,347.14	92,012.78	39.20
2012	BOYACA	CEBOLLA DE RAMA	2,581.37	98,131.48	38.02
2013	BOYACA	CEBOLLA DE RAMA	2,934.00	112,464.00	38.33
2014	BOYACA	CEBOLLA DE RAMA	2,802.00	119,900.00	42.79
2015	BOYACA	CEBOLLA DE RAMA	2,809.40	122,476.00	43.60
2016	BOYACA	CEBOLLA DE RAMA	2,251.00	112,024.36	49.77
2017	BOYACA	CEBOLLA DE RAMA	2,284.10	118,543.20	51.90
2018	BOYACA	CEBOLLA DE RAMA	3,758.00	176,536.62	46.98
2019	BOYACA	CEBOLLA DE RAMA	3,139.80	115,814.00	36.89
2020	BOYACA	CEBOLLA DE RAMA	3,182.00	117,021.00	36.78
2021	BOYACA	CEBOLLA DE RAMA	3,350.00	125,123.06	37.35
2022	BOYACA	CEBOLLA DE RAMA	3,363.20	133,693.40	39.75

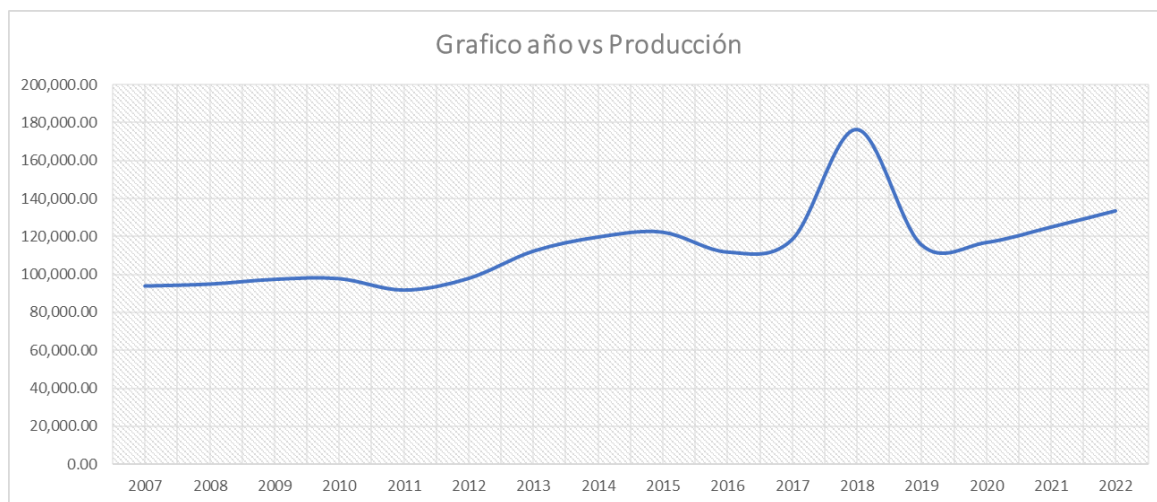
Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 18 Evolución de las áreas de cultivo de cebolla de rama en el departamento de Boyacá



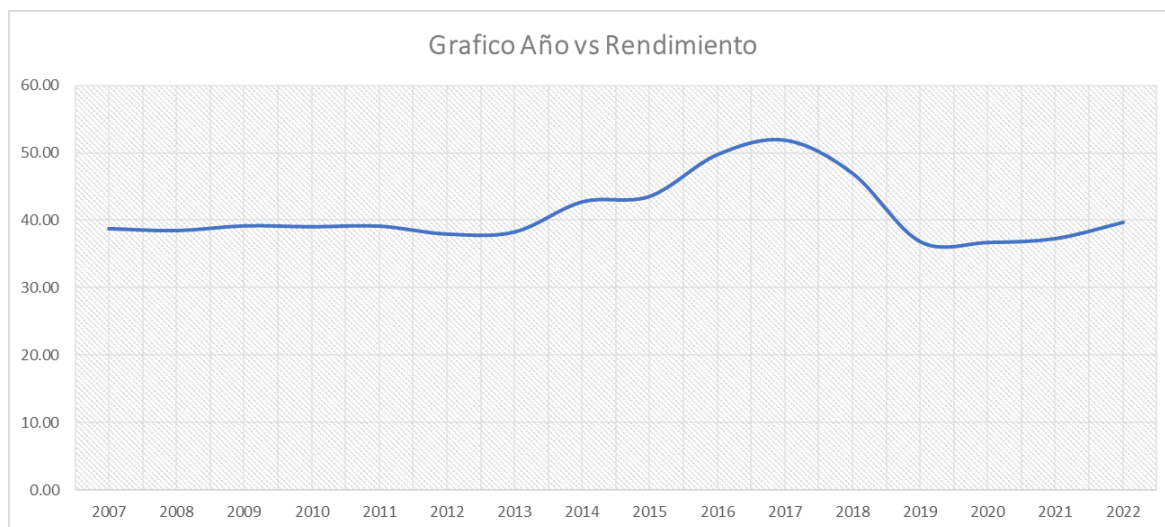
Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 19 Evolución de la producción de cultivo de cebolla de rama en el departamento de Boyacá



Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 20 Evolución del rendimiento de cultivo de cebolla rama en el departamento de Boyacá



Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)



10.4 Análisis de impacto climático del cultivo de arveja en Boyacá.

A diferencia de los anteriores cultivos analizados, en estos últimos 20 años la cobertura para la arveja ha venido descendiendo con el paso del tiempo. Este descenso, ha ocurrido no solo en la cobertura si no también en la evolución de producción y rendimiento.

En el año 2010, se presentó la mayor pérdida de cobertura en una ventana de tiempo del año 2007 a 2022. Esto coincido con la presencia de evento niña y un índice SOI más alto en los últimos 40 años.

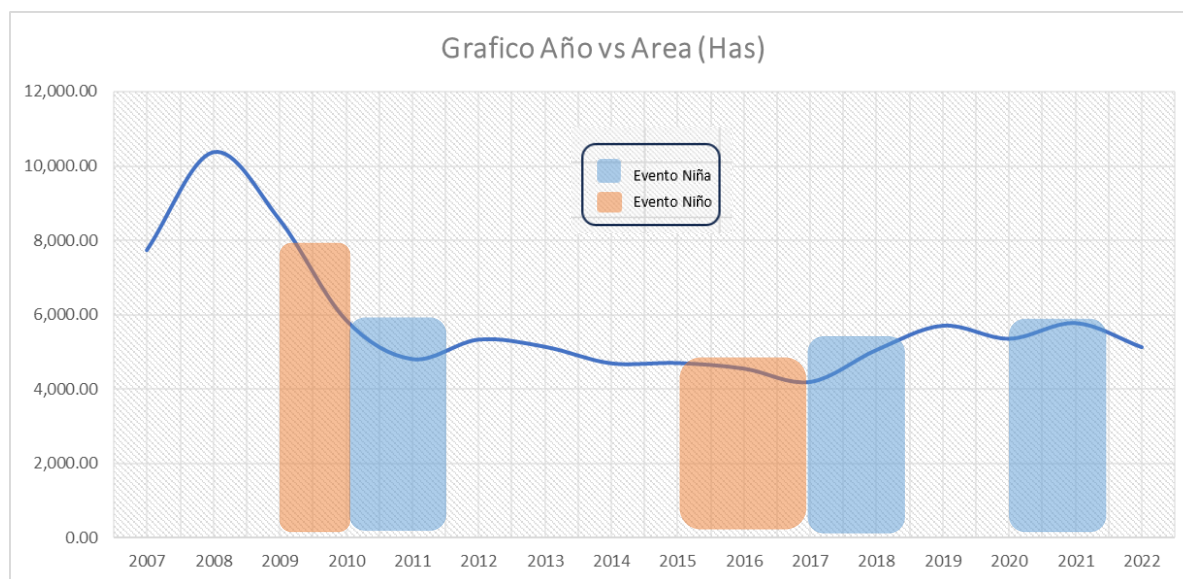
En el año 2014, se presentó la mayor pérdida de cobertura, coincidió con el evento niño con un índice de 0.9. En el año 2016, se produjo una reducción menor que la presentada en el año 2014, esto demuestra, que a pesar de que el índice sea más alto no necesariamente se va a generar mayor detrimento de área de cosecha. Para la arveja la niña ha cobrado más importancia en la presencia de disminución de área. Sobre todo, en el año 2010 se generó una disminución del 31.4% respecto al año anterior, con precipitaciones máximas de 967 mm. Para el niño temperaturas máximas de 19.5 grados centígrados.

Tabla 9 – Datos de Producción de Cultivo de arveja en el departamento de Boyacá.

AÑO	DEPARTAMENTO	PRODUCTO	AREA (HA)	PRODUCCION (TON)	RENDIMIENTO HA/TON
2007	BOYACA	ARVEJA	7,735.10	11,456.63	1.48
2008	BOYACA	ARVEJA	10,363.80	17,713.66	1.71
2009	BOYACA	ARVEJA	8,555.60	13,859.86	1.62
2010	BOYACA	ARVEJA	5,868.13	8,681.26	1.48
2011	BOYACA	ARVEJA	4,816.70	7,170.06	1.49
2012	BOYACA	ARVEJA	5,339.21	8,104.30	1.52
2013	BOYACA	ARVEJA	5,147.03	7,421.74	1.44
2014	BOYACA	ARVEJA	4,702.82	5,917.80	1.26
2015	BOYACA	ARVEJA	4,710.62	6,133.20	1.30
2016	BOYACA	ARVEJA	4,561.40	4,848.64	1.06
2017	BOYACA	ARVEJA	4,201.80	4,554.38	1.08
2018	BOYACA	ARVEJA	5,060.00	4,681.07	0.93
2019	BOYACA	ARVEJA	5,712.42	8,731.90	1.53
2020	BOYACA	ARVEJA	5,361.81	7,220.10	1.35
2021	BOYACA	ARVEJA	5,781.86	8,383.72	1.45
2022	BOYACA	ARVEJA	5,134.35	7,379.58	1.44

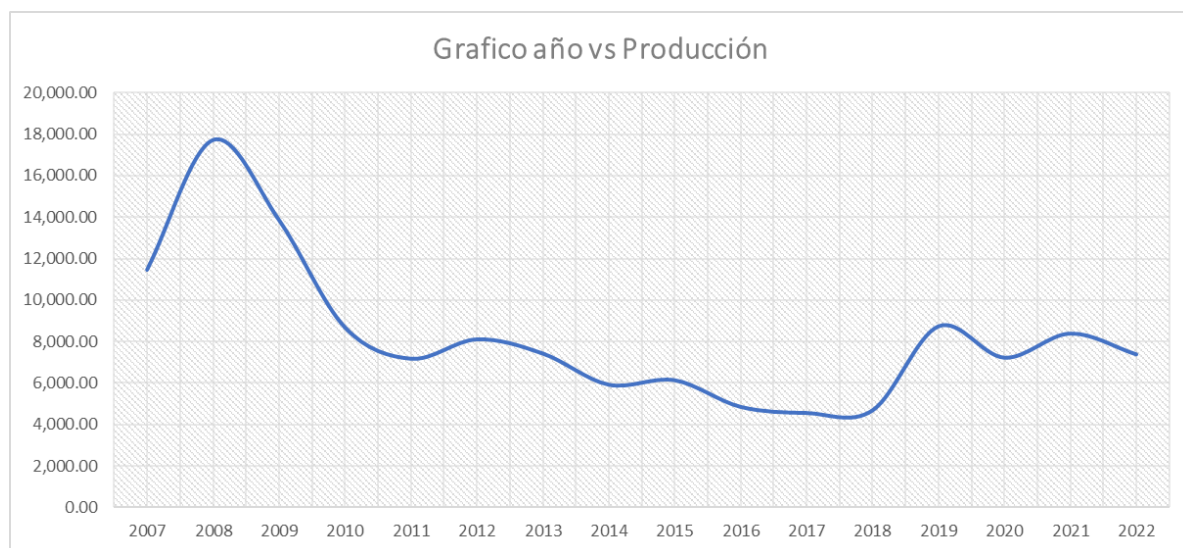
Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 21 Evolución de área de cultivo de arveja en el departamento de Boyacá



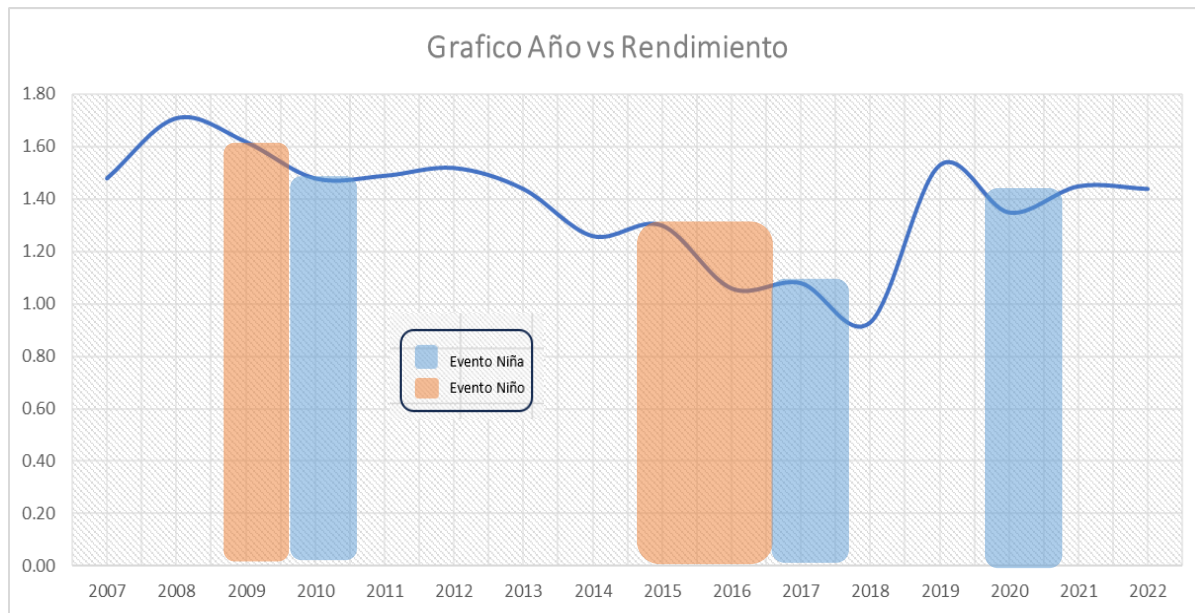
Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 22 Evolución de la producción de cultivo de arveja en el departamento de Boyacá



Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 23 Evolución de rendimiento de cultivo de arveja en el departamento de Boyacá.



Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

10.5 Análisis de impacto climático del cultivo de café en Boyacá.

Del año 2007 al año 2022, el fenómeno de la Niña fue más preponderante en este tiempo. Además, la Niña coincidió con la mayoría de eventos de pérdida de cobertura de cultivo de café en el departamento de Boyacá.

El año de 2012, se presentó un detrimento de las hectáreas de cultivo de café, respecto al año anterior con un valor del -20.7%. Aunque no fue uno de los índices SOI más alto si presentó una precipitación media mensual ese año de 750 mm aproximadamente. Se debe tener en cuenta que en el año 2010 se presentaron precipitaciones del orden de 967 mm, aunque la pérdida de cobertura sembrada fue menor con un valor de -11.7%. Por tanto, la intensidad del fenómeno no es directamente proporcional al aumento del valor del índice.

En los eventos de disminución de área de cultivo coincidente con el niño, el máximo evento de detrimento de área fue de -2.7%, ya que del 2007 a 2020 solo se presentaron 2 eventos correlacionados.

De los demás cultivos estudiados, el del café presentó la mayor cantidad de eventos consecutivos de pérdida de área y presencia de un evento. Del año 2008 al año 2012, es decir por 5 años seguidos el cultivo fue afectado por la presencia de la Niña presentándose precipitaciones del orden de 500 a 967 mm. El Niño presentó pocos eventos con pérdidas de cobertura del 3% y

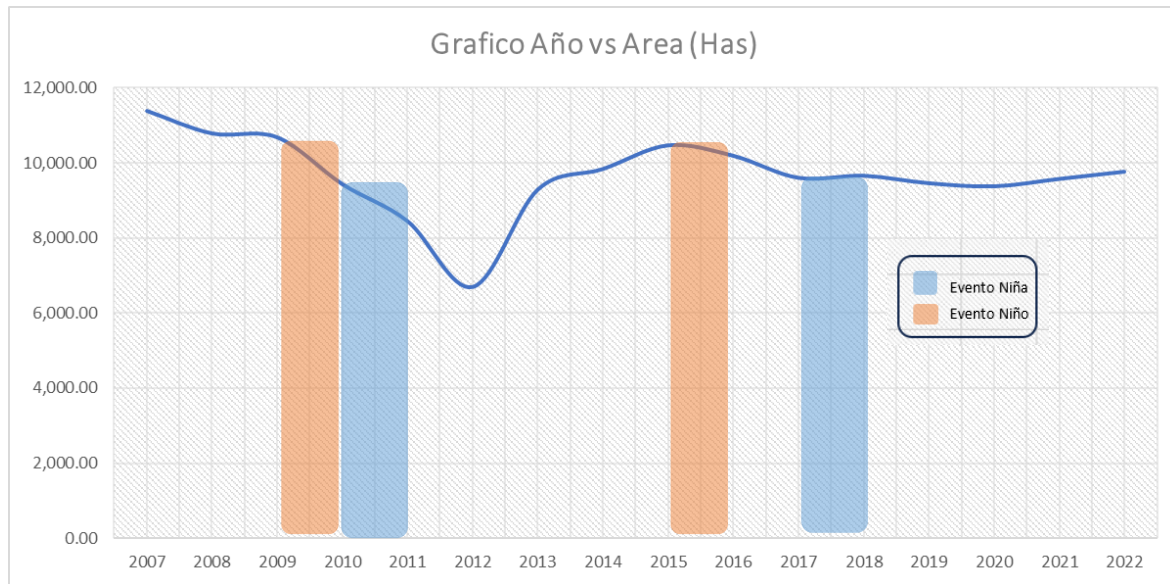
presencia de 24 grados centígrados de temperatura máxima. Teniendo en cuenta que la temperatura optima del cultivo esta entre 18 y 24 centígrados, se puede observar que las temperaturas bajas son el mayor obstáculo del desarrollo de producción del cultivo por lo que es lógico que la Niña sea el evento predominante en la disminución del área del café.

Tabla 10 – Datos de Producción de Cultivo de café en el departamento de Boyacá.

AÑO	DEPARTAMENTO	PRODUCTO	AREA (HA)	PRODUCCION (TON)	RENDIMIENTO HA/TON
2007	BOYACA	CAFE	11,374.50	9,683.10	0.85
2008	BOYACA	CAFE	10,778.50	9,547.29	0.89
2009	BOYACA	CAFE	10,672.50	8,567.97	0.80
2010	BOYACA	CAFE	9,427.00	7,083.08	0.75
2011	BOYACA	CAFE	8,441.74	5,643.39	0.67
2012	BOYACA	CAFE	6,698.20	4,981.59	0.74
2013	BOYACA	CAFE	9,289.05	5,591.05	0.60
2014	BOYACA	CAFE	9,834.39	6,364.41	0.65
2015	BOYACA	CAFE	10,461.85	9,501.54	0.91
2016	BOYACA	CAFE	10,181.80	9,583.80	0.94
2017	BOYACA	CAFE	9,598.33	7,638.99	0.80
2018	BOYACA	CAFE	9,653.45	7,780.34	0.81
2019	BOYACA	CAFE	9,454.82	10,274.85	1.09
2020	BOYACA	CAFE	9,371.00	10,162.30	1.08
2021	BOYACA	CAFE	9,568.69	10,017.89	1.05
2022	BOYACA	CAFE	9,761.13	8,527.76	0.87

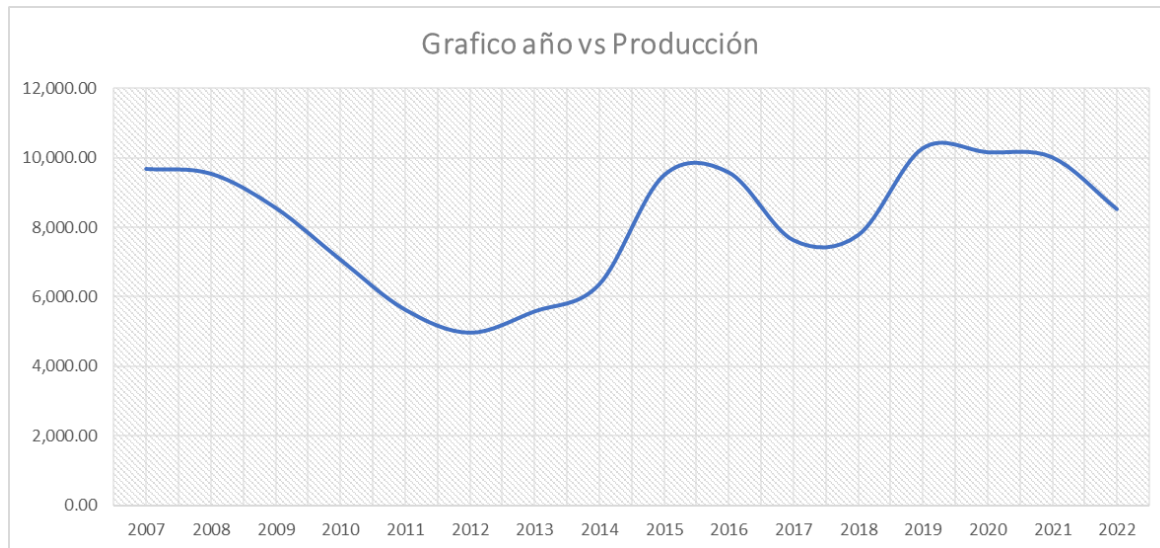
Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 24 Evolución de áreas de cultivo de café en el departamento de Boyacá



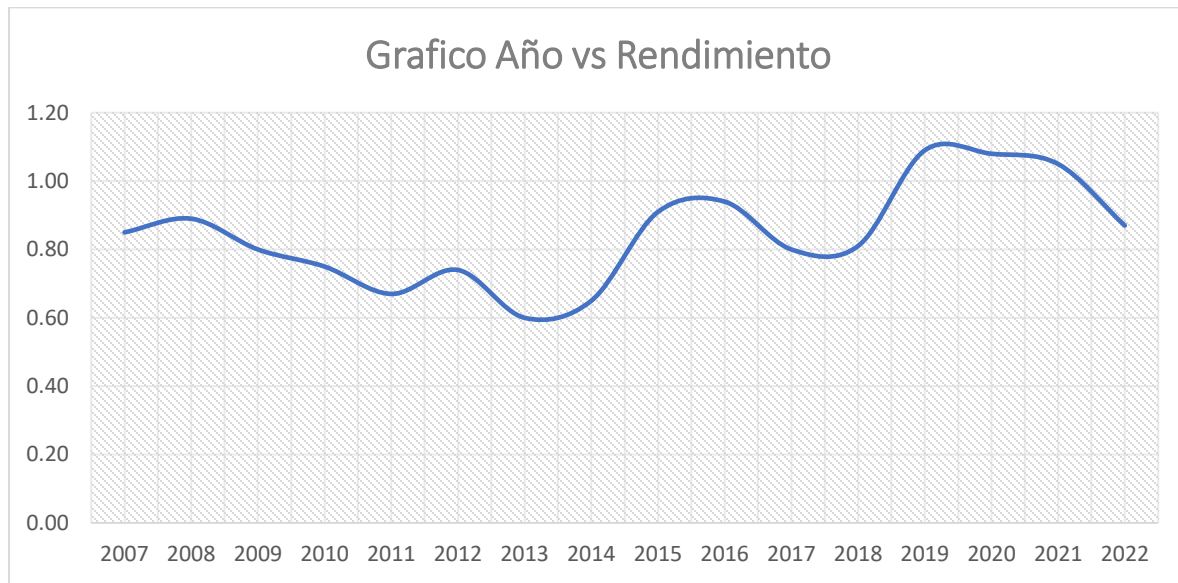
Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 25 Evolución de la producción de cultivo de café en el departamento de Boyacá



Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 26 Evolución del rendimiento de cultivo de café en el departamento de Boyacá



Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

10.6 Análisis de impacto climático del cultivo de cacao en Boyacá.

Desde los últimos 20 años, las hectáreas de cultivo de cacao en Boyacá han aumentado en estas dos décadas. Por tanto, a pesar de que en algunos años se presentan disminuciones de área de cobertura de cultivo. El cacao en Boyacá se ha comportado de manera resiliente a los efectos del clima relacionados con el Niño y la Niña.

En el año 2013, se presentó una pérdida de cobertura del -13.7% respecto al año anterior. En ese mismo año el índice SOI para la niña fue de 1.10. En el año 2011, se presenta una reducción del -2.0% a pesar de que en ese año el índice SOI se situó con un valor del 2.70. Demostrando así, al igual que en los otros cultivos, que la intensidad del índice no se relaciona con mayor proporción de detrimento de las hectáreas de siembra de cacao en Boyacá.

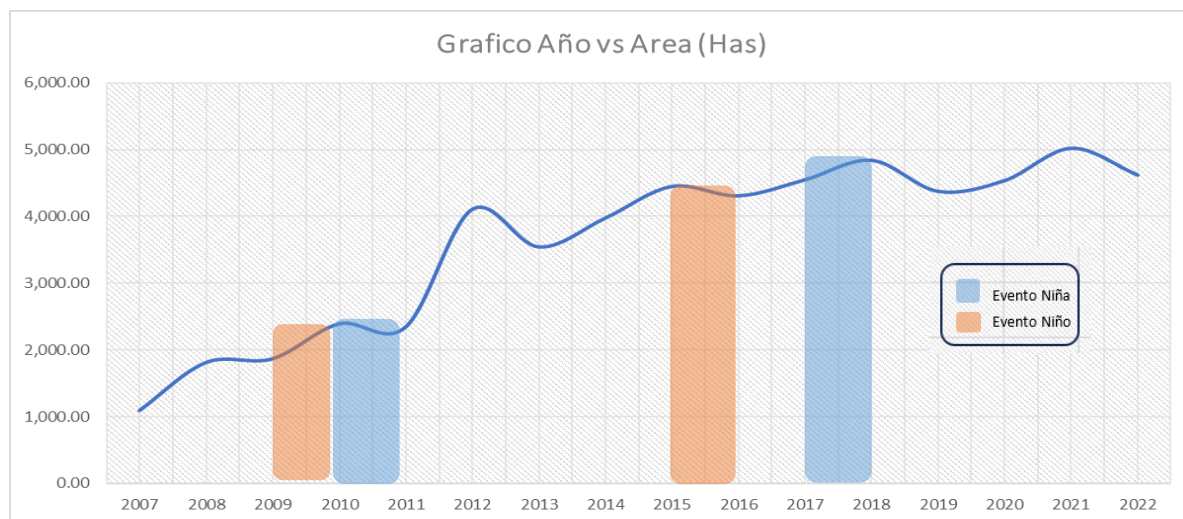
El año que presentó más afectación en presencia de la Niña, fue el año 2013 con precipitaciones de 560 mm. En el año 2019 se presentaron las mayores pérdidas de cobertura en los últimos 20 años con temperaturas máximas de hasta 23.5 grados centígrados. Teniendo en cuenta que la temperatura ideal para el cultivo de cacao es entre 22°C y 30°C. Temperaturas fuera de este rango pueden alterar el desarrollo y el ciclo productivo del cacao. Por esto, La Niña termina siendo el efecto más preponderante en este cultivo ya que en Boyacá en estos últimos años no se presentaron temperaturas máximas a 24 °C.

Tabla 11 – Datos de Producción de Cultivo de cacao en el departamento de Boyacá.

AÑO	DEPARTAMENTO	PRODUCTO	AREA (HA)	PRODUCCION (TON)	RENDIMIENTO HA/TON
2007	BOYACA	CACAO	1,094.00	692.50	0.63
2008	BOYACA	CACAO	1,813.50	1,095.20	0.60
2009	BOYACA	CACAO	1,870.00	1,131.00	0.60
2010	BOYACA	CACAO	2,393.00	1,603.80	0.67
2011	BOYACA	CACAO	2,345.12	1,602.01	0.68
2012	BOYACA	CACAO	4,105.50	2,494.89	0.61
2013	BOYACA	CACAO	3,543.70	2,247.06	0.63
2014	BOYACA	CACAO	3,975.40	2,458.04	0.62
2015	BOYACA	CACAO	4,449.40	2,594.84	0.58
2016	BOYACA	CACAO	4,308.50	2,155.63	0.50
2017	BOYACA	CACAO	4,548.40	2,299.42	0.51
2018	BOYACA	CACAO	4,840.40	2,777.36	0.57
2019	BOYACA	CACAO	4,375.50	2,205.58	0.50
2020	BOYACA	CACAO	4,537.00	2,346.64	0.52
2021	BOYACA	CACAO	5,020.50	2,669.23	0.53
2022	BOYACA	CACAO	4,619.00	2,570.51	0.56

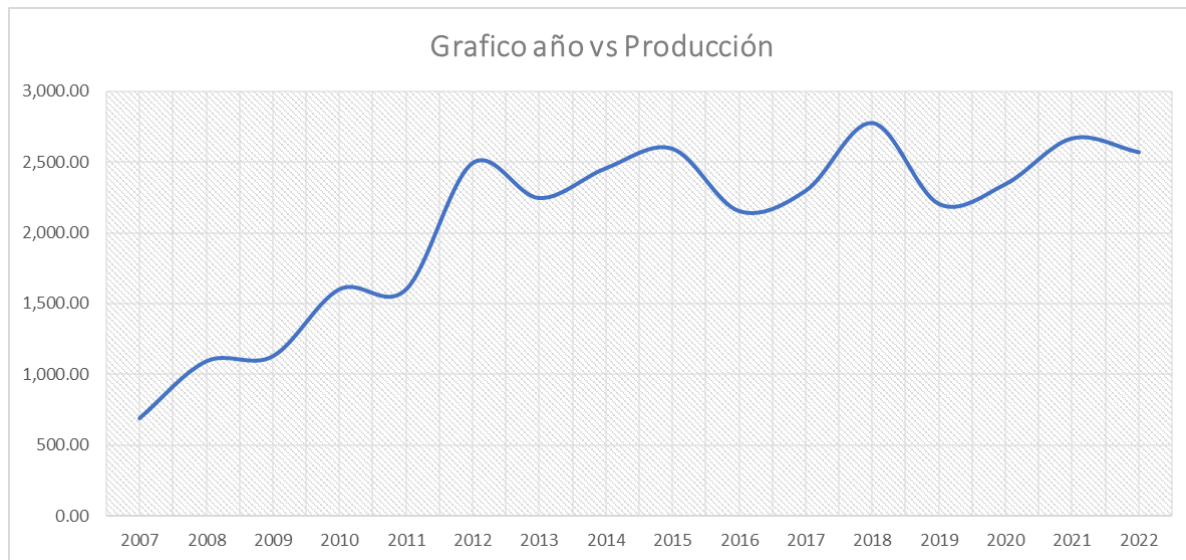
Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 27 Evolución de áreas de cultivo de cacao en el departamento de Boyacá



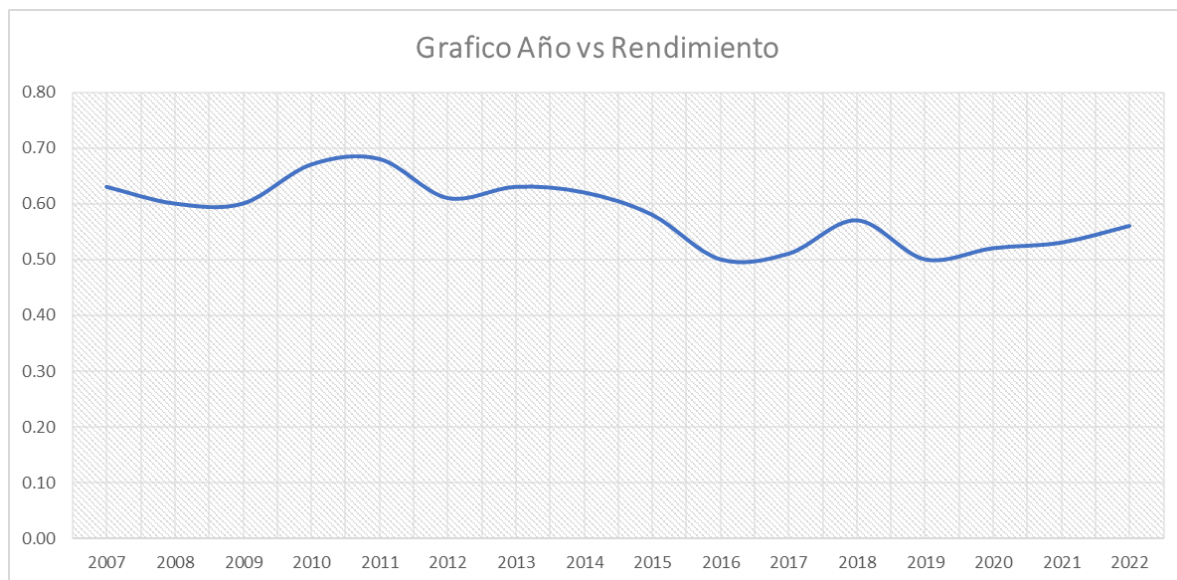
Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 28 Evolución de la producción de cultivo de cacao en el departamento de Boyacá



Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 29 Evolución del rendimiento de cultivo de cacao en el departamento de Boyacá



Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

10.7 Análisis de impacto climático del cultivo de maíz en Boyacá.

El maíz tradicional en Boyacá en los últimos 20 años, se ha disminuido en su área de cobertura y su producción. Pasando de 20384.61 hectáreas a 8240.25 hectáreas. Este mismo comportamiento de tendencia a la disminución de área lo tiene la arveja y el café.

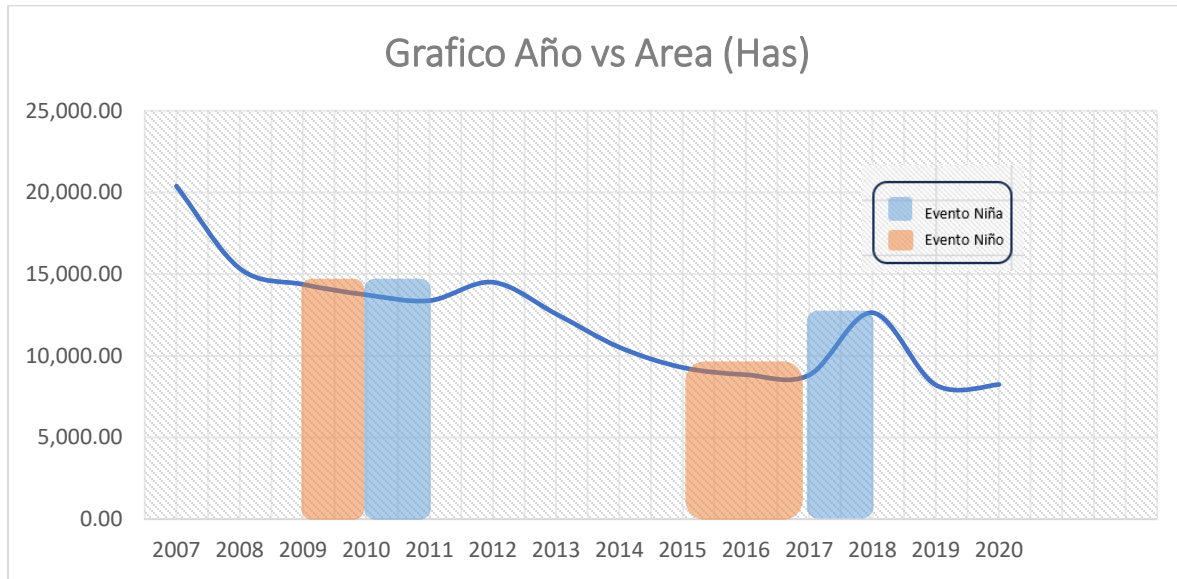
La pérdida de cobertura más alta durante el evento de la Niña, fue en el año 2013 con un detrimento de área de siembra de -13.4% respecto al año anterior y un índice de 1.10 menor al del 2.90 presentado en el año 2010. Para el Niño, en el año 2019 se presentó una disminución del -35% respecto al año anterior y un índice de -1.4 que es mucho menor al índice -2.2 del año 2016. Teniendo en cuenta que la temperatura óptima del crecimiento del maíz generalmente se sitúa entre 20°C y 32°C. Nuevamente la máxima temperatura registrada es de 24°C. Se puede inferir entonces, que el Niño no sería tan responsable de la disminución paulatina del área de cultivo ya que cuando se generen temperaturas por debajo de los 20°C puede generar germinación más lenta, crecimiento reducido y menor rendimiento por tanto una notable baja en la producción agrícola de este producto.

Tabla 12 – Datos de Producción de Cultivo de maíz en el departamento de Boyacá.

AÑO	DEPARTAMENTO	PRODUCTO	AREA (HA)	PRODUCCION (TON)	RENDIMIENTO HA/TON
2007	BOYACA	MAIZ TRADIC	20,384.61	27,957.50	1.37
2008	BOYACA	MAIZ TRADIC	15,347.20	20,173.30	1.31
2009	BOYACA	MAIZ TRADIC	14,370.45	18,419.93	1.28
2010	BOYACA	MAIZ TRADIC	13,732.80	18,136.50	1.32
2011	BOYACA	MAIZ TRADIC	13,377.48	18,408.84	1.38
2012	BOYACA	MAIZ TRADIC	14,502.78	21,474.91	1.48
2013	BOYACA	MAIZ TRADIC	12,563.29	18,389.33	1.46
2014	BOYACA	MAIZ TRADIC	10,525.03	16,222.28	1.54
2015	BOYACA	MAIZ TRADIC	9,284.20	13,677.53	1.47
2016	BOYACA	MAIZ TRADIC	8,843.24	12,780.17	1.45
2017	BOYACA	MAIZ TRADIC	8,821.20	12,037.85	1.36
2018	BOYACA	MAIZ TRADIC	12,636.00	17,019.95	1.35
2019	BOYACA	MAIZ TRADIC	8,217.35	10,490.74	1.28
2020	BOYACA	MAIZ TRADIC	8,240.25	10,329.10	1.25

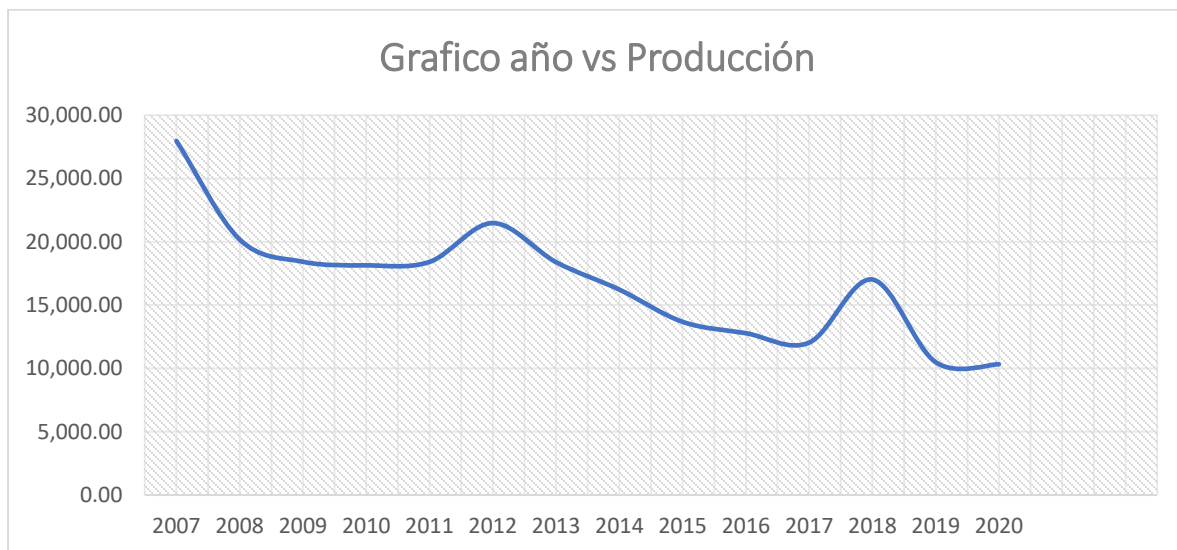
Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 30 Evolución de las áreas de cultivo de maíz en el departamento de Boyacá.



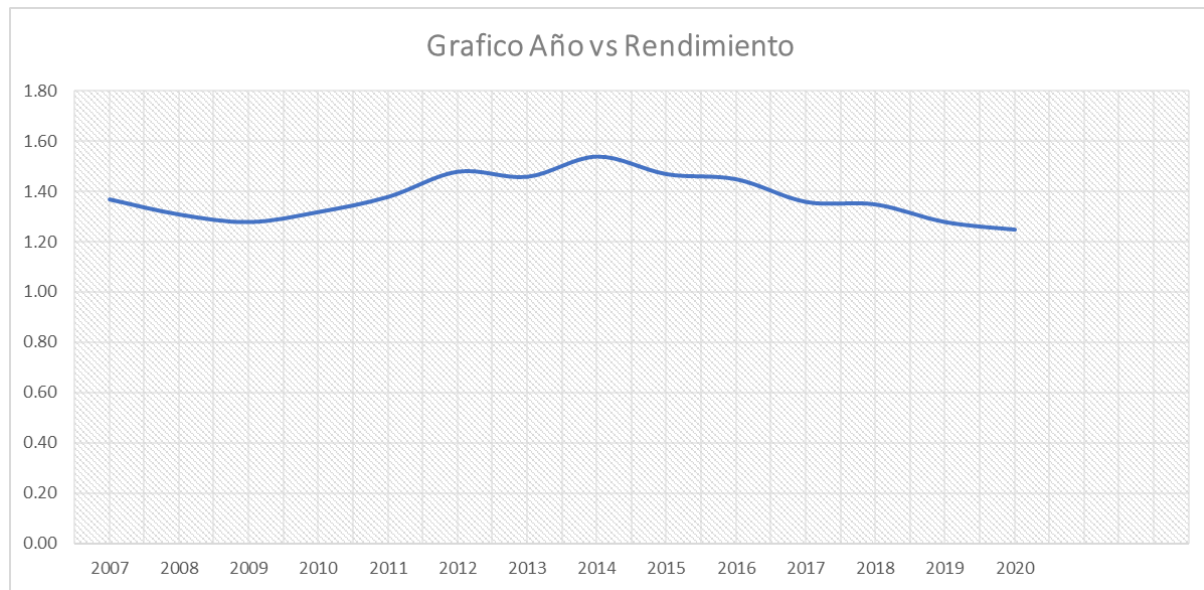
Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 31 Evolución de la producción de cultivo de maíz en el departamento de Boyacá



Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

Gráfica 32 Evolución del rendimiento de cultivo de maíz en el departamento de Boyacá



Fuente: ENA (Encuesta Nacional Agropecuaria)

10.8 Análisis de la Influencia ENSO entre los cultivos, la temperatura y la precipitación considerando tiempos de rezago.

A nivel interanual, las correlaciones entre el índice ENSO y el área de cobertura no son muy fuertes. Esto se debe a que el análisis anual tiende a suavizar o diluir los efectos rezagados del fenómeno, dificultando la detección de correlaciones estadísticamente significativas. No obstante, al considerar el comportamiento con rezagos de hasta seis meses propios de la dinámica ENSO en la región Andina, es posible que si existan correlaciones relevantes y más altas entre los indicadores climáticos y las variables de producción agrícola.

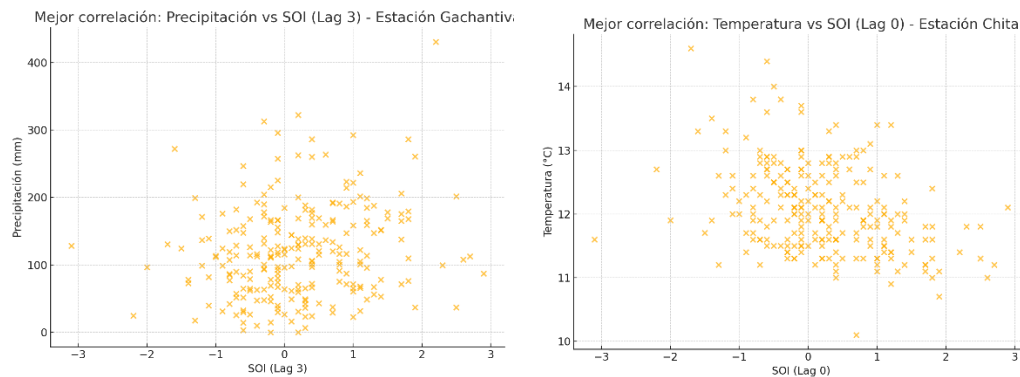
Las precipitaciones altas no necesariamente están asociadas con la niña, aunque esta suele aumentar la probabilidad de lluvias en ciertas regiones. En cambio, las precipitaciones bajas y temperaturas altas si muestran una correlación más directa con el Niño. El análisis de boxplot es útil para analizar estaciones, por la distribución completa de los datos. Útil en estudios de variabilidad climática y extremos meteorológicos lo que nos ayudó a identificar las estaciones con mayor impacto de los fenómenos ENSO.

Dado que el departamento de Boyacá se encuentra en la región Andina de Colombia, la influencia del fenómeno ENSO (El Niño- Southern Oscillation) tiende a manifestarse con rezagos relativamente cortos en variables como precipitación y temperatura. Los análisis muestran que los efectos pueden ser inmediatos o presentarse con un desfase máximo de hasta seis meses, siendo más comunes los rezagos entre cero y dos meses. Esta respuesta rápida se asocia a la sensibilidad climática de la cordillera oriental frente a cambios en la circulación atmosférica y a la interacción

directa con las variaciones en la zona de confluencia intertropical (ZCIT) moduladas por el ENSO.

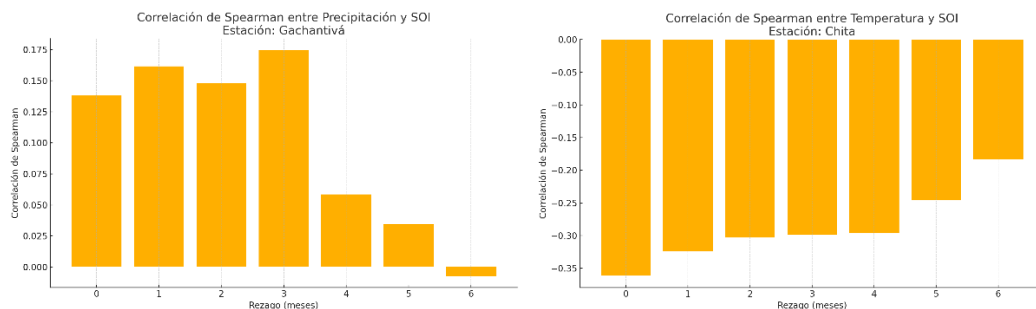
Los análisis de rezago realizados muestran que la temperatura responde de manera más inmediata a las variaciones del índice SOI, presentando los valores de correlación más altos de 0 a 1 mes. Este comportamiento sugiere que los efectos del fenómeno El niño o La Niña se manifiestan rápidamente en los registros térmicos de las estaciones analizadas. En contraste, la precipitación presenta rezagos más prolongados, con efectos que se evidencian principalmente entre los dos y seis meses posteriores. Esta diferencia en el comportamiento podría deberse a que la temperatura es más directamente influenciada por las anomalías de circulación atmosférica asociadas al ENSO, mientras que la precipitación depende de procesos más complejos y variables regionales. Así, se establece una pauta importante para interpretar el impacto climático en función de variable analizada.

Gráfica 33 Mejores Correlaciones con rezago de precipitación y temperatura.



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 34 Mejores Correlaciones con rezago de precipitación y temperatura.



Fuente: Elaboración propia

Aunque las correlaciones estadísticas con el índice SOI no son altas ni directas, la recurrencia interanual de los eventos El Niño y La Niña y su coincidencia con afectaciones en la



producción agrícola confirman que existe una incidencia climática real sobre los cultivos. Esta influencia, aunque no exclusiva, es significativa y debe ser considerada en la planificación agrícola de Boyacá.

Para fortalecer la relación entre clima y cultivos en Boyacá, se propone el uso de equipos avanzados de georreferenciación, SIG y toma de datos directa en campo. Superar la dependencia de información secundaria permitiría construir correlaciones más precisas y una base técnica sólida sobre la verdadera incidencia del clima en la producción agrícola. Para estudios e investigaciones futuras.

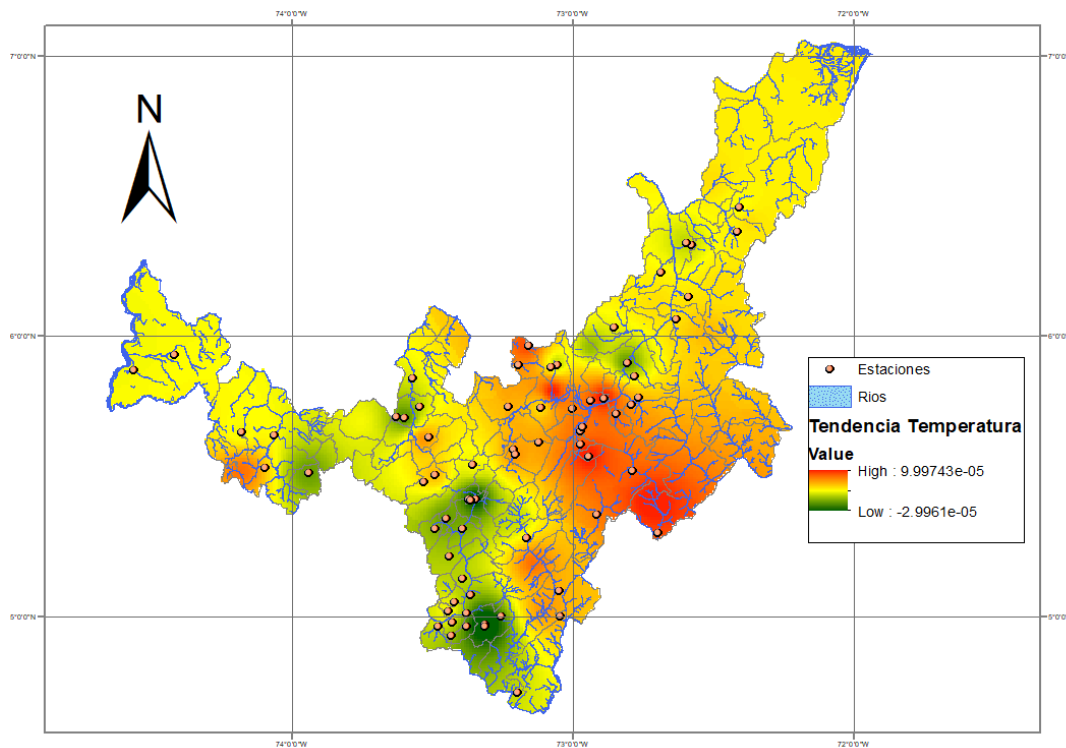
11. ESTUDIO GEOESPACIAL DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN BOYACÁ.

Con los datos de las estaciones completadas y con ayuda de los sistemas de información geográfica. Se realizó un análisis de tendencias de temperaturas en cada estación, luego se realiza la representación geográfica con un software especializado en SIG, con el fin de caracterizar las tendencias más altas de las temperaturas donde nos pueda indicar en que partes del departamento se presentan eventos extremos de temperatura. Así podemos relacionar en que sectores de Boyacá tenemos zonas que a lo largo de la serie histórica que presentaron mayor afectación por el cambio climático y los fenómenos correspondientes.

11.1 Análisis de tendencias de temperaturas.

En la ilustración 7, se representa la evolución de las tendencias de las temperaturas sectorizando las zonas que presentan mayor rango de tendencia y así, mostrar gráficamente el comportamiento de la temperatura en el departamento de Boyacá. Las zonas de color rojo representan las zonas con mayores tendencias de aumento de temperatura, las verdes las tendencias mas bajas, las zonas rojas coinciden con las áreas industriales del territorio. De la ilustración 8 a la 10 las zonas azules representan las precipitaciones mas altas en el territorio.

Ilustración 7 Análisis de tendencias de temperatura en el departamento de Boyacá



Fuente: Elaboración propia

En la Ilustración 7, se puede observar que en las zonas conformadas por los municipios de: La Victoria, Duitama, Paipa, Tibasosa, Nobsa, Firavitoba, Sogamoso, Cuitiva, Tota, Aquitania y Pajarito. Son zonas que presentan una alta tendencia al crecimiento de las temperaturas por el contrario las zonas correspondientes a: Buenavista, Boyacá, Jenesano, Tibana, Macanal, Chivor y Santa María presentan zonas con la más baja tendencia respecto a los otros municipios. Con esto se puede identificar los extremos para futuras correlaciones respecto a la productividad y afectación del clima en la región.

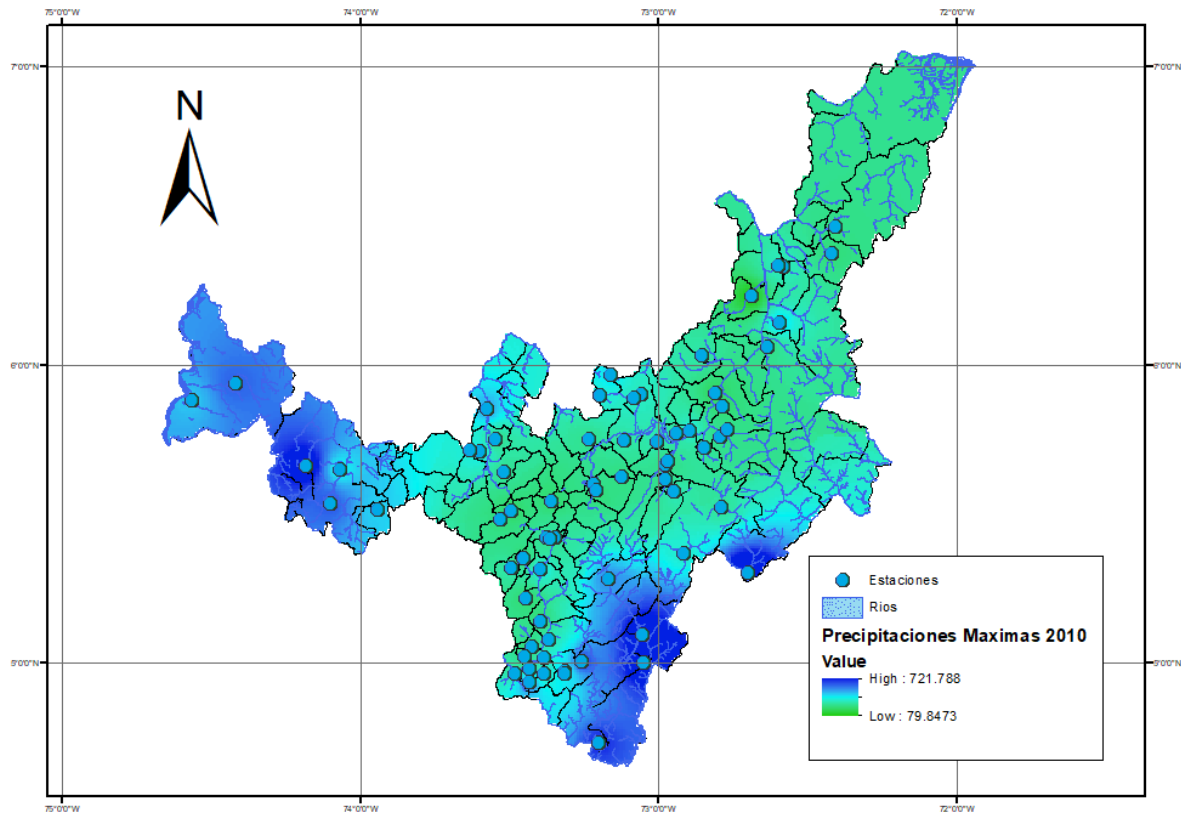
Por otro lado, al comparar la Ilustración 6 y 7, es decir la evolución de coberturas de cultivo a través del tiempo con el análisis de tendencias de temperaturas en el departamento, se puede observar que las zonas con una alta predisposición a la temperatura son proclives a tener muy poca área de cultivo en la región. Por otro lado, las zonas con tendencia baja y media son zonas con mayor presencia de cobertura general de cultivos. Muy seguramente teniendo en cuenta que el desarrollo de las ciudades está más presente en las zonas con altas temperaturas se puede inferir que la presencia de cultivos a nivel hidrológico mantiene las temperaturas a menor nivel que en las zonas con aumento de presencia de cuencas urbanas en donde predomina las actividades industriales que las labores agrícolas.

Analizando las tendencias climáticas en el sector de pajarito, se identificó una temperatura promedio de 19.1 grados centígrados. A partir del estudio del registro histórico de temperaturas, se observó una tendencia al alza, proyectando un incremento de hasta 1.8 grados centígrados para el año 2040. Estos datos sugieren un posible impacto climático en la región, ya que de acuerdo a la ilustración 7 es uno de los sectores con mayor tendencia en el departamento de Boyacá. Convirtiéndolo en una zona de alta afectación en cuanto a precipitación y temperatura. En Belencito otra zona con mayor tendencia, se aprecia también un aumento de hasta 1.8 grados centígrados en los próximos 20 años.

11.2 Análisis de la precipitación en Boyacá.

Revisando el comportamiento del fenómeno de la Niña, se puede identificar que los años 2010 y 2011. Donde ocurrieron los eventos de precipitación más extremos para Colombia en estas dos últimas décadas. Se puede observar, que la mayoría de afectaciones en cultivos fueron en esos dos años. Por tanto, con la ayuda de los sistemas de información geográfica y las series históricas completadas se puede sectorizar nuevamente las isoyetas para lograr encontrar donde se presentaron las máximas precipitaciones en la región. Y así relacionar con los eventos extremos de temperatura.

Ilustración 8 Análisis de precipitaciones máximas año 2010 en el departamento de Boyacá



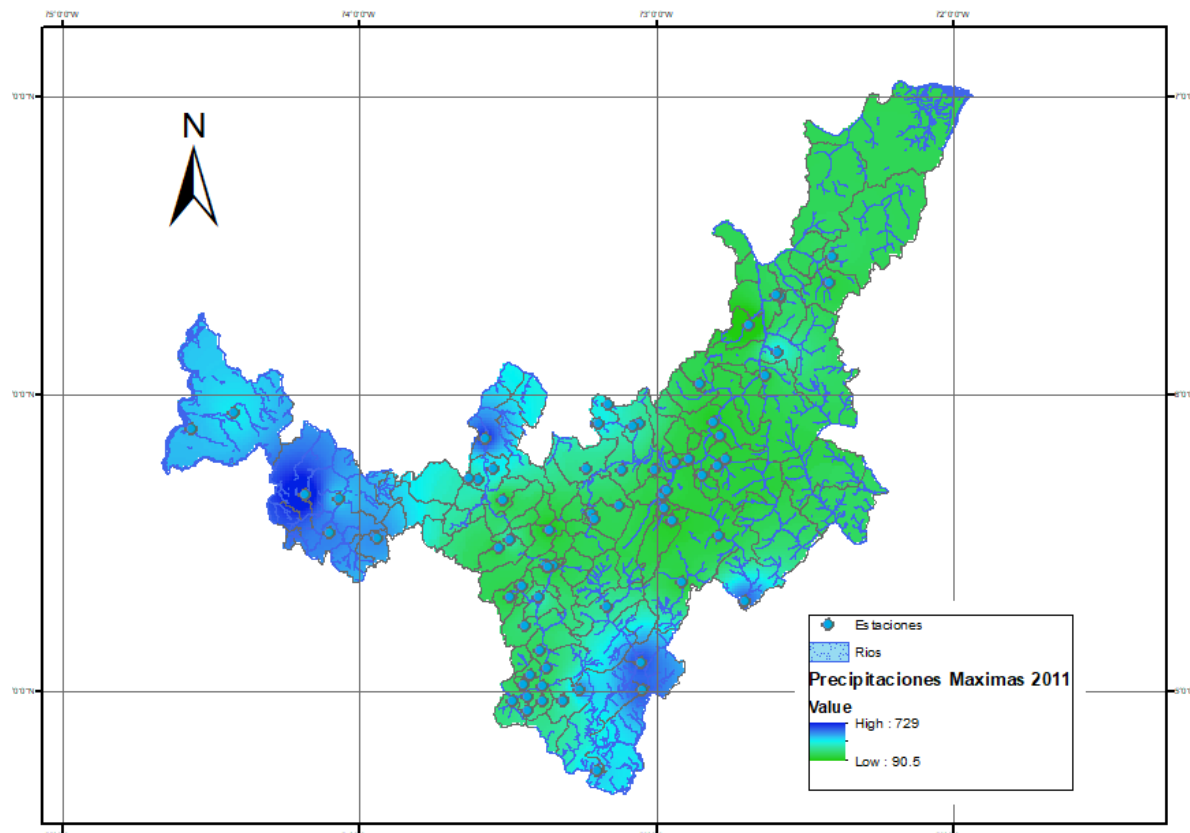
Fuente: Elaboración propia

Comparando las ilustraciones 7 y 8 se puede analizar que, en zonas como Pajarito, Zetaquirá, San Eduardo, Mira Flores, San Luis de Gaceno, Santa María y La Victoria se generan altas precipitaciones y además altas tendencias de temperatura. Esto ayuda a concluir que los eventos extremos se acentúan tanto en las variables climatológicas para el fenómeno del Niño y la Niña en Boyacá.

Ahora repitiendo el mismo procedimiento para el año 2011, se presenta la ilustración 9 con el análisis de precipitaciones máximas en el departamento.



Ilustración 9 Análisis de precipitaciones año 2011 en el departamento de Boyacá

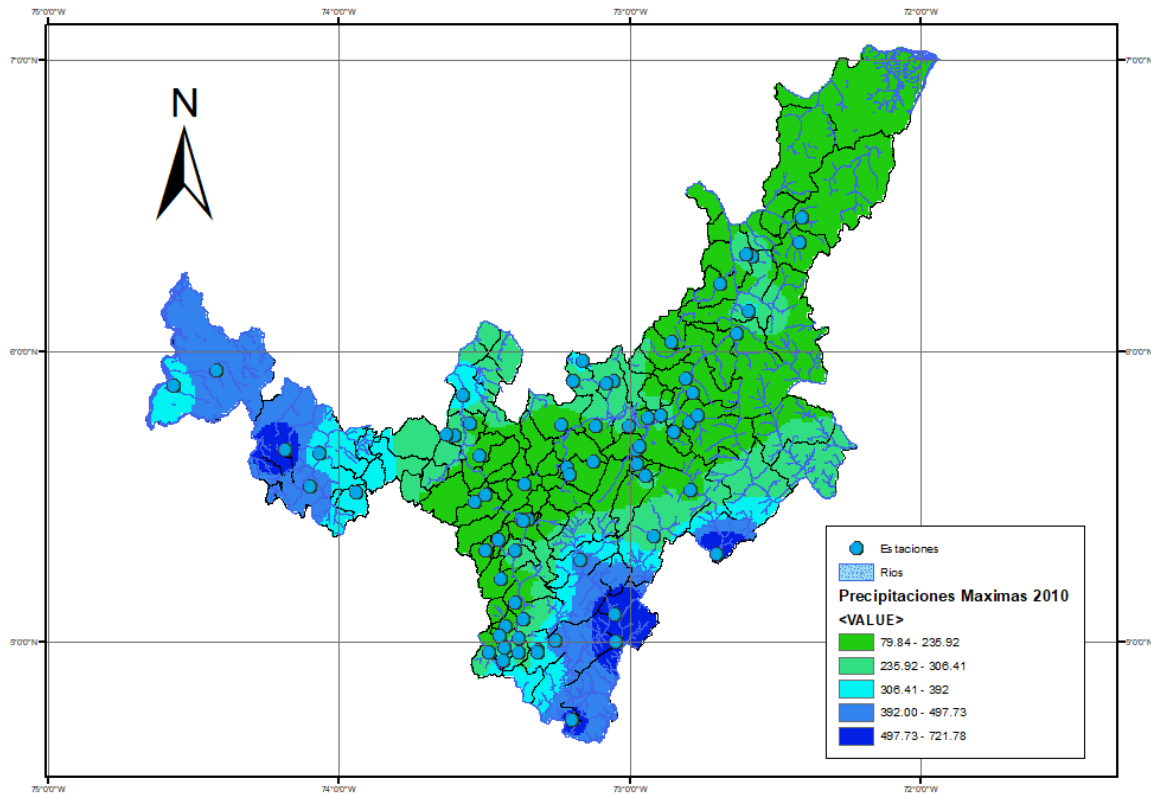


Fuente: Elaboración propia

Al comparar las ilustraciones 8 y 9 se observa que tienen el mismo comportamiento. La ola invernal presentada en el año 2010 y 2011. Muestra eventos extremos que en muchas zonas coincide con el mapa de tendencias de temperaturas. Exceptuando las zonas urbanas donde presenta un rango de precipitaciones menor al extremo. En la siguiente grafica se detallará por rangos de precipitación para el año 2010 que permitirá una mejor observación de lo analizado.

En zonas de influencia urbana como Duitama, Nobsa, Firavitoba, Sogamoso y Aquitania. Se presentan precipitaciones por debajo de 300 mm y tendencias altas de temperatura. Esto puede ser debido a la actividad industrial que permite que los eventos macroclimaticos no se acentúen de la misma forma como en los demás sectores de la región.

Ilustración 10 Análisis con rango de precipitaciones máximas año 2010 en el departamento de Boyacá.



Fuente: Elaboración propia

11.3 Influencia en la distribución espacial del impacto de los fenómenos sobre precipitación respecto a la Niña.

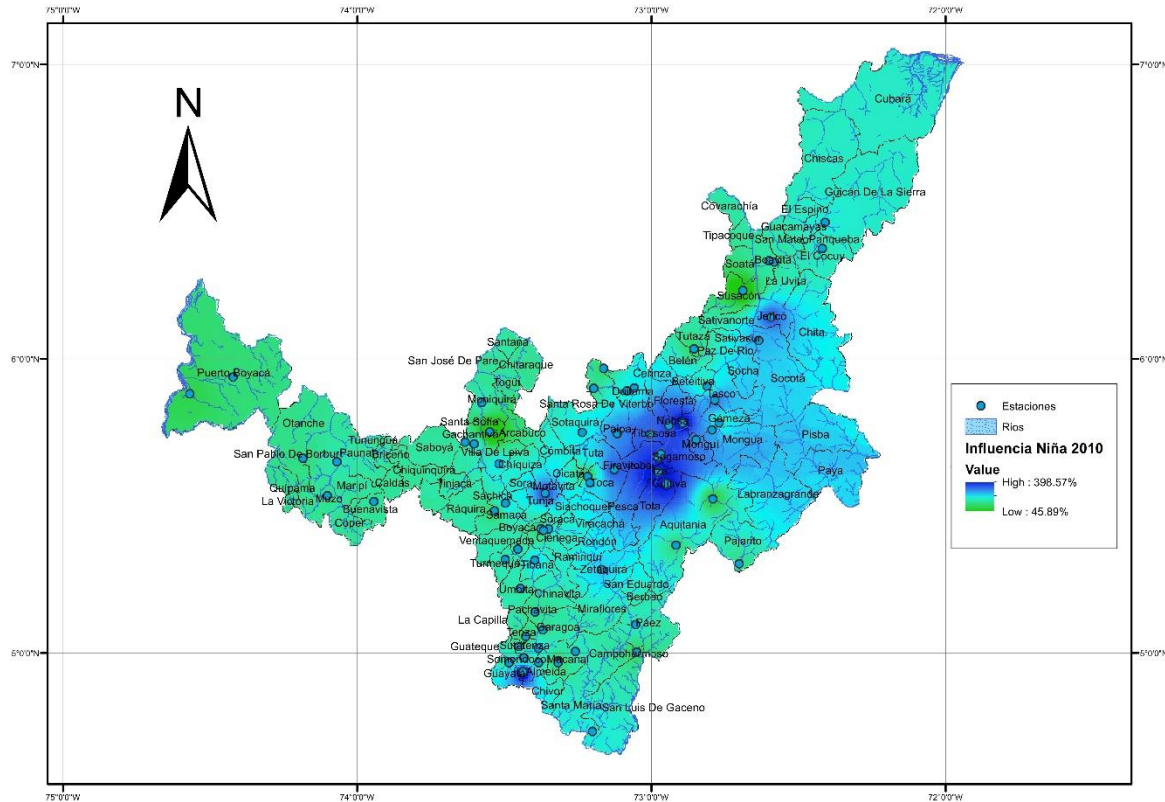
La niña del año 2010, de acuerdo a esta investigación ha sido el año de mayor impacto en los cultivos del departamento de Boyacá en estos últimos 20 años, Con el objetivo de examinar la influencia del fenómeno de la niña sobre el comportamiento de la precipitación en el departamento, se elaboró un mapa comparativo utilizando datos de estaciones meteorológicas distribuidas en la zona de estudio. Para poder tener el comportamiento normal y evitar distorsiones por valores atípicos, se calculo un promedio base para cada estación excluyendo los valores propios de precipitaciones altas causadas por la Niña. Este promedio incorpora el comportamiento normal o típico de la precipitación en la presencia de eventos climáticos anómalos.

Posteriormente, se extrajeron los valores extremos de precipitación registrados durante el año 2010, coincidiendo con un evento fuerte de La Niña. Se calculo la diferencia porcentual entre la precipitación registrada de ese año y el promedio base de cada estación. Esos valores



porcentuales de cambio permitieron cuantificar la intensidad de las anomalías climáticas de la zona. La información fue especializada mediante un SIG para generar un mapa de variación de precipitación.

Ilustración 11 Influencia en la distribución espacial del impacto de los fenómenos sobre precipitación respecto a la Niña.



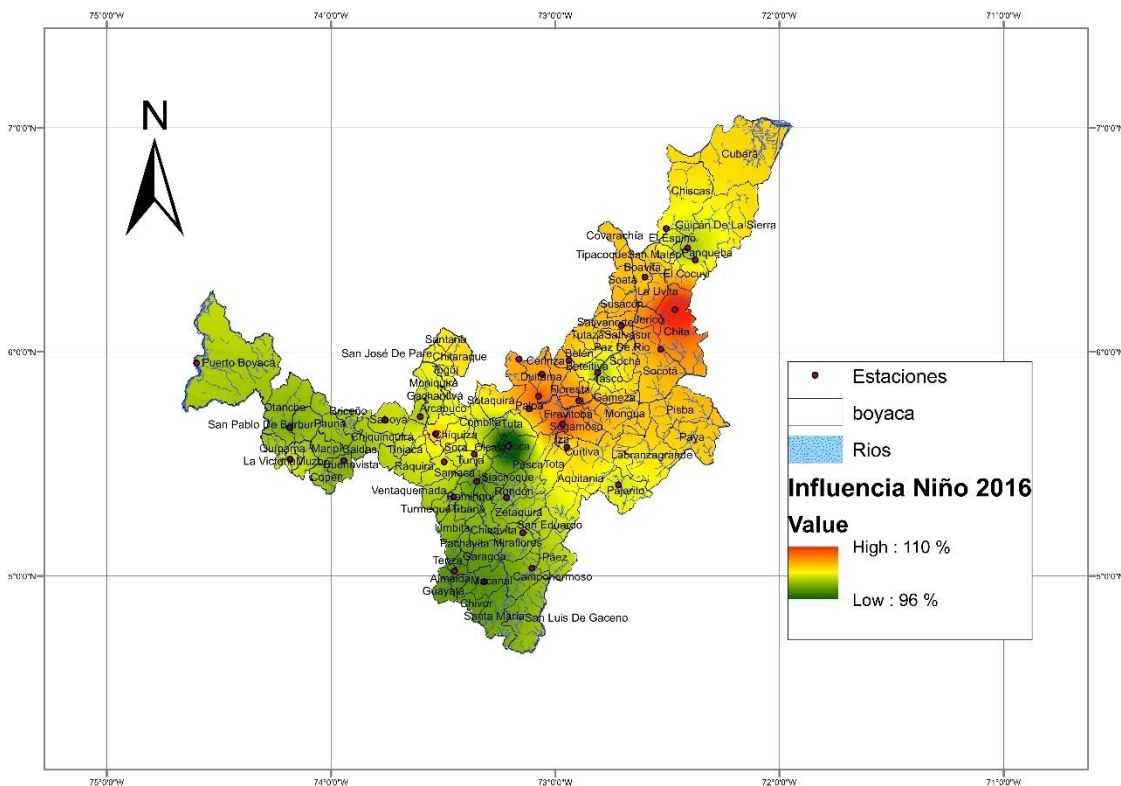
Fuente: Elaboración propia

El análisis espacial evidencio que los municipios pertenecientes a la zona centro sur y oriente de Boyacá, presentaron las mayores diferencias positivas, con incrementos de precipitación que alcanzaron hasta 398.57%. En contraste, otras zonas del departamento mostraron incrementos menores, con una diferencia mínima del 45.89%. Estas variaciones fueron presentadas visualmente en el mapa, permitiendo identificar las áreas más sensibles al fenómeno.

11.4 Efecto del fenómeno El Niño sobre la distribución espacial de las alteraciones en precipitación y temperatura.

Durante el fenómeno del Niño del año 2016, uno de los más intensos registrados durante las últimas décadas, se observaron impactos significativos sobre las condiciones de producción de cultivos en el departamento de Boyacá. A partir de mapas de influencia generados para evaluar el efecto de estos fenómenos sobre la temperatura, se identificaron zonas con aumentos considerables respecto al promedio histórico de las estaciones influenciadas por el fenómeno del Niño, Específicamente en municipios como Floresta, Duitama, Paipa, Firavitoba, Sogamoso, Chita, Ubita, Socotá y Pisba, presentaron influencias sus temperaturas hasta el 110%. Evidenciando un marcado aumento, mientras que el resto del departamento mostró una influencia mas moderada, cercana al 96% indicando una menor variabilidad térmica.

Ilustración 12 Influencia en la distribución espacial del impacto de los fenómenos sobre temperatura respecto al niño en el año 2016.



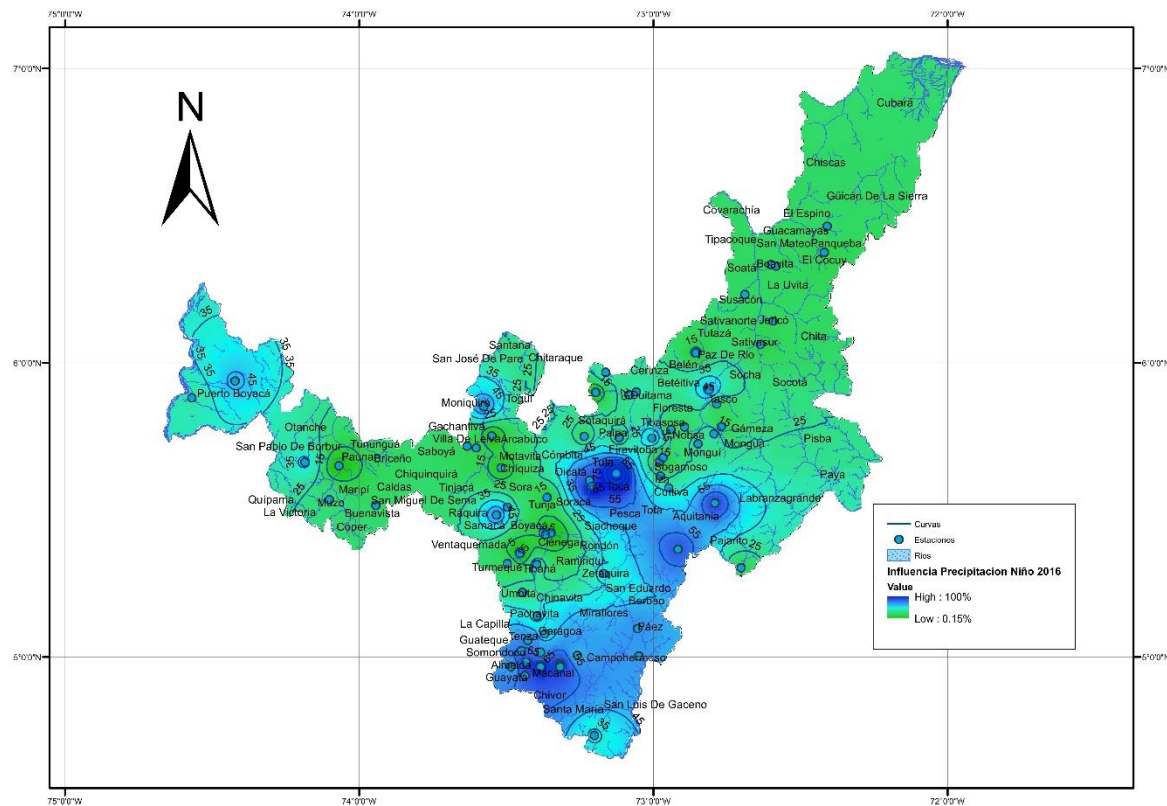
Fuente: Elaboración propia

El análisis se realizó excluyendo los valores extremos y calculando un promedio ajustado, con el fin de obtener una estimación más representativa durante el comportamiento técnico durante dicho evento. La metodología permitió identificar de manera precisa las áreas más

afectadas por el incremento de la temperatura, lo cual resulto crítico para entender la vulnerabilidad de ciertas regiones al fenómeno de El Niño.

En cuanto a la precipitación, el patrón observado fue coherente con los efectos típicos del fenómeno de el Niño, caracterizado por una marcada disminución de las lluvias mientras que en la misma zona se aumentan las temperaturas. En los municipios correspondientes a la zona sur de Boyacá como: Tota, Toca, Aquitania, san Eduardo, Páez, Macanal, Chivor, Santa María etc. Las precipitaciones se mantuvieron cercanos al 100% del promedio, indicando una menor afectación. Sin embargo, en el resto del departamento, los niveles de precipitación estuvieron por debajo del promedio reflejando un déficit hídrico importante. Este contraste resalta la heterogeneidad espacial del impacto del fenómeno y subraya la necesidad de estrategias de adaptación y mitigación en función de las condiciones locales.

Ilustración 13 Influencia en la distribución espacial del impacto de los fenómenos sobre precipitación respecto al niño en el año 2016.

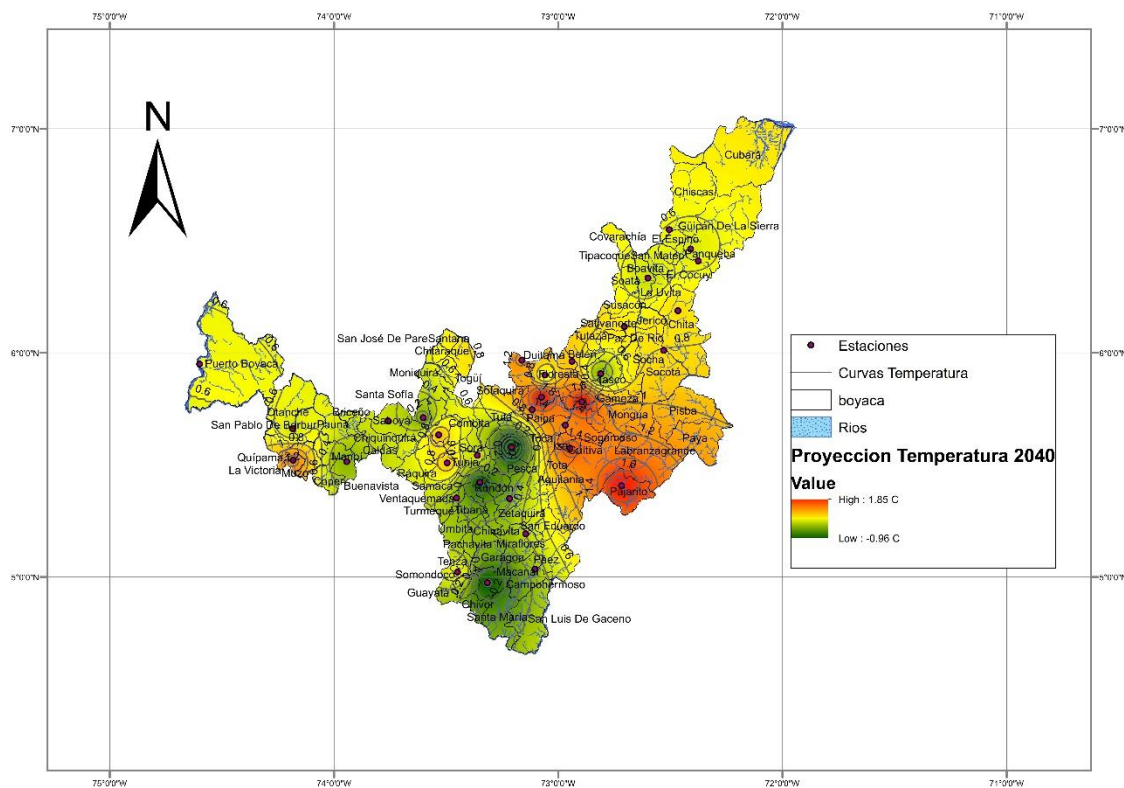


Fuente: Elaboración propia

11.5 Modelación de Tendencias Térmicas en Boyacá al 2040 asociado al fenómeno ENSO.

Para realizar el análisis de proyección de temperaturas hacia el año 2040, se emplearon unos datos climáticos con registros históricos de temperaturas en los últimos 20 años. A partir de esta información se aplicó un análisis de tendencias lineales por estaciones, evaluando el comportamiento térmico. Posteriormente se proyectaron estos patrones al año 2040 bajo el supuesto que las condiciones actuales se mantendrían constantes. Con esto se construyó un mapa de anomalías térmicas. El mapa refleja las áreas con incrementos y descensos proyectados en temperatura clasificados en rangos significativos.

Ilustración 14 Zonas de cambio térmico al 2040 asociado al fenómeno de el niño en Boyacá.



Fuente: Elaboración propia



En zonas como: Pajarito, Paipa, Sogamoso, Cuitiva se muestra en el análisis que las mayores tendencias de aumento en temperatura, alcanzando hasta 1.85 grados centígrados, se concentra en la región centro – oriental de Boyacá. Presentando un comportamiento térmico creciente. Posiblemente relacionado con el fenómeno de urbanización, disminución de cobertura vegetal, aumento de densidad poblacional, algunos sectores industrializados y mayor exposición a la radiación solar. Estas zonas, ubicadas en el altiplano Cundiboyacense y sus estribaciones, esta siendo altamente sensible a los efectos del cambio climático. Su ubicación estratégica y el desarrollo económico también pueden estar intensificando este fenómeno, volviéndolas prioritarias para implementar acciones de adaptación y mitigación.

Contrario a la tendencia anterior, el análisis muestra que se presentaron temperaturas con tendencia a la baja, proyectando hasta -0.96 grados centígrados, ubicadas principalmente en la región Sur – Oriental de Boyacá. Municipios como Pesca, Rondón, Macanal y Campo Hermoso reflejan una dinámica térmica negativa, lo cual puede estar relacionado con factores como altitud elevada, cobertura boscosa densa, y menor presión antrópica. Estas zonas, mas rurales y con menor urbanización, podrían estar beneficiándose de condiciones micro climáticas más estables o procesos de restauración ecológica. La diferencia entre estas dos áreas resalta la heterogeneidad climática de Boyacá, subrayando la necesidades estrategias diferenciadas por región ante los retos del cambio climático. Al comparar las ilustraciones 7, 12 y 14 donde se compara las tendencias de las estaciones y las tendencias de las estaciones verdaderamente influenciadas por el fenómeno del Niño, se muestra que la zona centro oriental de Boyacá se ve mas impactada por los fenómenos macroclimaticos.

12. CONCLUSIONES

A pesar de que el cambio climático presenta impactos evidentes en la producción agrícola del departamento, los resultados del estudio exponen que, en general, la cobertura de cultivos ha mantenido una tendencia creciente durante los últimos 40 años. Sin embargo, esta tendencia positiva general esconde afectaciones puntuales importantes causadas por los eventos consecutivos de El Niño y La Niña, que han generado caídas significativas en la cobertura y el rendimiento de ciertos cultivos.

Se identificó que los años 2010 y 2011 fueron los de mayor afectación productiva vinculada al fenómeno de La Niña, mientras que 2016 y 2019 se relacionaron con El Niño. En el periodo 1980–2020, La Niña se mostró un 52% del tiempo y El Niño un 48%, evidenciando una variación casi equitativa y una periodicidad de 3 a 4 años por evento.

El análisis estadístico realizado mediante el índice SOI permitió correlacionar el comportamiento climático con los descensos en coberturas específicas. Por ejemplo, en 2010, durante una Niña intensa ($\text{SOI} = 2.9$), la caña panelera presentó una pérdida de -12.8%. No obstante, en 2019, bajo un Niño moderado ($\text{SOI} = -1.4$), la pérdida de cobertura fue de -29.4%, pero paradójicamente la producción aumentó. Esto demuestra que no hay una relación directa entre la intensidad del evento climático y la reducción de área o producción, pero sí una clara afectación en la mayoría de cultivos en la presencia de La Niña y El Niño fuertes por los riesgos asociados al fenómeno: inundaciones, sequías, remoción en masa etc.

En cultivos como cebolla, alverja y papa, se registraron disminuciones significativas de cobertura y rendimiento en eventos específicos. La Niña de 2010-2011 provocó descensos de hasta -9% en papa y -16% en caña panelera, mientras que la cebolla mostró su mayor caída en 2019 (-16.5%). Estos resultados indican que la vulnerabilidad es variable por cultivo y evento.

El estudio revela que el cambio climático no es el único factor que afecta la producción agrícola. Otros elementos como las políticas agrarias, la preparación de los productores, el acceso a tecnología y el contexto económico nacional también influyen en los descensos productivos observados.

Las tendencias hidro climáticas muestran un aumento proyectado de hasta 1.8 °C en algunas zonas en los próximos 20 años, lo que podría intensificar los impactos agrícolas si no se toman medidas de adaptación adecuadas.

Finalmente, se concluye que Boyacá presenta una resiliencia estructural frente al cambio climático gracias a su diversidad de pisos térmicos y topografía. Sin embargo, se requiere una mejor preparación institucional y comunitaria para enfrentar los eventos extremos. Este estudio pretende ser un insumo para que los entes departamentales prioricen medidas concretas de mitigación y apoyo al sector agropecuario ante los efectos del clima.

Referencias

- Novoa Campos, J. A. (2020). *Impactos del cambio climático en los cultivos de papa del departamento de Boyacá – Colombia: análisis de causas y soluciones para la región*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Recuperado de repository.unad.edu.co
- Stocker, T. F., & Qin, D. (2018). *Cambio Climático 2013, Bases Físicas*.
- Latour, B. (2019). *Cara a cara con el planeta: Una nueva mirada sobre el cambio climático alejada de las posiciones apocalípticas*. Siglo XXI Editores.
- Rubio Ramírez, K. A. (2021). *Efecto del fenómeno El Niño y fenómeno La Niña sobre los desembolsos de crédito agropecuario: Caso de la papa en Colombia 2010-2019*.
- Reyes-Palomino, S. E., & Cano Ccoa, D. M. (2022). Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. *Revista de Investigaciones Altoandinas*.
- Corredor, J. J. V., Camargo, C. A. C., & Guerrero, E. F. M. (2008). Efectos de los fenómenos macroclimáticos (El Niño y La Niña) sobre diferentes variables climatológicas en Boyacá. *In Vestigium Ire*, 1(1).
<http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ivestigium/article/view/51>
- Pabón Caicedo, J. D., & Montealegre Bocanegra, J. E. (2017). *Los fenómenos de El Niño y de La Niña, su efecto climático e impactos socioeconómicos*.
- Perico, N., Garavito, L., & Suárez, P. (2014). Pedagogía y diagnóstico sobre la variación de la cobertura vegetal, 1985-2011, para Boyacá. V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, 1–14. http://www.ustatunja.edu.co/cong/images/Articulos/-PEDAGOGIA_Y_DIAGNOSTICO SOBRE LA VARIACION DE LA COBERTURA VEGETAL 1985 2011 PARA BOYACA.pdf
- Petzoldt, C., & Seaman, A. (2005). *Climate Change Effects on Insects and Pathogens*. Geneva: New York State Agricultural Extension Station.
<http://www.climateandfarming.org/pdfs/FactSheets/III.2Insects.Pathogens.pdf>
- Sánchez, R., Vargas, G., González, H., & Pabón, D. (2001). Los fenómenos cálido del Pacífico (El Niño) y frío del Pacífico (La Niña) y su incidencia en la estabilidad de laderas en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 11–12. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/18814>
- Ruiz, A. C. (2012). *Análisis del impacto de los fenómenos El Niño y La Niña en la producción agrícola del departamento del Atlántico* (Tesis de posgrado). Universidad Nacional de Colombia.
<http://www.bdigital.unal.edu.co/8896/1/Aidadelcarmenruizcabarcas.2012.pdf>
- Sepúlveda Delgado, O., et al. (2015). Estudio del comportamiento e impacto de la climatología sobre el cultivo de la papa y del pasto en la región central de Boyacá empleando los sistemas dinámicos. *Revista Ciencia en Desarrollo*, 6(2), 215–224. <http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v6n2/v6n2a11.pdf>
- Villate, J. (2004). *Influencia de los fenómenos macroclimáticos y calentamiento global en la hidrología del Altiplano Cundiboyacense*.

Zambrano, M. C. (2006). *Análisis climático de sectores en los departamentos de Boyacá y Casanare y su alteración por fenómenos macroclimáticos y de cambio global*.

Valiente, O. (1999). Evolución en el estudio del fenómeno ENSO (El Niño-Oscilación del Sur): de anomalía "local" a la predicción de variaciones climáticas globales. *Investigaciones Geográficas*.

Rojas Barbosa, E. O. (2011). *Evaluación del desarrollo de cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad climática interanual y cambio climático, en el suroeste de la sabana de Bogotá*.

Aguirre, F., et al. (2021). Gradientes climáticos y su alta influencia en los ecosistemas terrestres de la Reserva de la Biosfera Cabo de Hornos, Chile. *AIP*, (49), 1-33. <https://doi.org/10.22352/AIP202149012>

Rubio, K. (2021). *Efecto del fenómeno El Niño y fenómeno La Niña sobre los desembolsos de crédito agropecuario: Caso de la papa en Colombia 2010-2019*. Universidad Autónoma de Bucaramanga.

Cely, S., & Penagos, D. (2020). *Zonificación de amenazas por inundaciones en la quebrada Floresta del municipio de Floresta – Boyacá*. Universidad Católica de Colombia.

García Bu Bucogen, G., Piccolo, M. C., & Bohn, V. Y. (2022). Implementación de datos meteorológicos modelados en el norte patagónico argentino (1982-2017). *Investigaciones Geográficas*, (78), 67-87. <https://doi.org/10.14198/INGEO.21449>

Guzmán, A. (2015). *Análisis del comportamiento espacio-temporal de la precipitación en la región pacífica colombiana en presencia de los fenómenos El Niño y La Niña, en el periodo 1983 – 2009*. Universidad de Nariño.

Hämmerly, R., et al. (2018). Escenarios hidrológicos fluctuantes en una región húmeda y su relación con la disponibilidad de agua. *Aqua-LAC*, 10(1), 142-153.

Hämmerly, R., et al. (2019). Determinación de campos areales de precipitación y evapotranspiración en la margen izquierda de la cuenca del Paraná en Argentina. *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe*, (41), 75-98. <https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2019.41.1.5818>

Hernández, R., & Ventura, R. (2022). La enseñanza de la estadística para la investigación: Algunas recomendaciones reflexionadas desde la praxis. *Revista Educación*, 46(2), 1-10. <https://orcid.org/0000-0001-9727-2608>

Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, L. C., Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A., & Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman: Caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2).

Matovelle, C., Andreo, B., & Mudarra, M. (2021). Análisis de la influencia de la altitud en los eventos de máxima precipitación en una cuenca del Pacífico: Tendencias y variabilidad. *Información Tecnológica*, 32(6), 3-12. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000600003>

Mendoza, M. (2020). Incorporación de escenarios de cambio climático en modelos de balance hidrológico. *Universidad Nacional del Litoral. Encuentro de Jóvenes Investigadores*.

Nacarro-Monterroza, E., Arias, P., & Vieira, S. (2019). El Niño-Oscilación del Sur, fase Modoki, y sus efectos en la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia. *Ciencias de la Tierra*, 43(166), 120-132. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.704>

Villazón, M., & Callaú, S. (2015). Relleno de datos en registros de precipitación para su aplicación en modelos de simulación hidrológica: Caso de estudio Pilcomayo – Bolivia. *XVI Congreso Bolivariano de Ingeniería Sanitaria, Medio Ambiente y Energías Renovables*, 1-7.

Yatrik, P., Divyakant, V., Hitesh, S., & Mitisha, V. (2017). An open-source software environment for statistical analysis. *Inflibnet*, 24(1), 14-21.

Aguilar, Z. E. S., Delgado, O. S., Mesa, M. P., Camargo, L. C. C., & Gutiérrez, N. R. G. (2022). *Análisis histórico de las necesidades de agua del cultivo de la papa en la región central de Boyacá* (Vol. 252). Editorial de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).

Castañeda Contador, O. L. (2005). *Análisis de la incidencia de los fenómenos climáticos en la hidrología del altiplano Cundiboyacense y la región árida del Alto Patía*.

Delgado, O. S., Aguilar, Z. E. S., Mesa, M. P., Díaz, S. B., & Camargo, L. C. C. (2015). Estudio del comportamiento e impacto de la climatología sobre el cultivo de la papa y del pasto en la región central de Boyacá empleando los sistemas dinámicos. *Ciencia en Desarrollo*, 6(2), 215–224.

Díaz Cordero, G. (2012). *El cambio climático*. Ciencia y Sociedad.

García, M. C., Piñeros Botero, A., Bernal Quiroga, F. A., & Ardila Robles, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 36, 60–64.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC]. (2013). *Preguntas frecuentes: Cambio climático 2013, bases físicas. Resumen para responsables de políticas*. En *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf

Gutiérrez Torres, R. E. (2019). *Evaluación del riesgo de inundaciones y movimientos en masa asociado al fenómeno de La Niña en el departamento de Santander*. Universidad Santo Tomás.

Herrera, M. C. P., Rueda, A., & Pinzón, C. (2012). Percepciones sobre los fenómenos de variabilidad climática y cambio climático entre campesinos del centro de Santander, Colombia. *Ambiente y Desarrollo*, 16(31), 25–37.

López Galvis, M., & Villamizar Rojas, M. R. (2020). *Análisis de los capitales de las comunidades productoras de papa para su adaptación al cambio climático: Estudio de caso en la microcuenca Susali-Cerrito, Santander, Colombia*.

Melo, F. J., Ruíz, J., Pabón, J., Sánchez, I., & Guzmán, D. (2018). La variabilidad climática y el cambio climático en Colombia. Recuperado de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/Variabilidad.pdf>

Montealegre, J. E. (2007). *Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia*. IDEAM, Bogotá.

Moreno, G. H., & González, O. C. (2011). Evaluación de la afectación territorial de los fenómenos El Niño/La Niña y análisis de la confiabilidad de la predicción climática basada en la presencia de un evento. *IDEAM-Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*.

Pérez Carreño, M. S., & Serrano Rincón, Y. D. (2021). *Incidencia de los factores climáticos sobre el precio de la papa pastusa suprema en Colombia para los años 2013 al 2020*.

Poveda, G., Vélez, J. I., Mesa, O., Hoyos, C., Mejía, J. F., Barco, O. J., & Correa, P. L. (2002). Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: Cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. *Meteorología Colombiana*, 6, 121–130.

Rodríguez Lara, N. L., Salazar Ventura, I. N., & Cedeño Oviedo, J. M. (2023). Análisis de la influencia del fenómeno de La Niña 2020-2022 en la precipitación y temperatura del aire en Chile continental. *ESPOL. FIMCM: Oceanografía*.

Roel, A., Baethgen, W., & Macedo, I. (2020). Asociación entre las fases de “El Niño” y la producción arroceras del Uruguay. *Arroz 2020*.

Ruiz, A. (2012). Análisis del impacto de los fenómenos El Niño y La Niña en la producción agrícola del departamento del Atlántico. *Trabajo de posgrado, Universidad Nacional de Colombia*. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/8896/1/aidadelcarmenruizcabarcas.pdf>

Serna Cuenca, N. J. J. (2013). *Efecto de los fenómenos El Niño y La Niña sobre la frecuencia de los eventos de precipitación extrema en la Sabana de Bogotá*. Departamento de Geociencias.

Sierra Herrera, J. P. (2019). *Cambio climático y producción de papa en la zona papera de Boyacá (1986-2017)*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

ANEXOS

Anexo A

5.0 MARCO METODOLOGICO

Archivo en formato Excel (.xlsx) que contiene los análisis estadísticos. Disponible en CARPETA adjunto o en carpeta digital “Anexos” entregada con esta tesis.

Anexo B

6.0 P y T EN BOYACA

Archivo en formato Excel (.xlsx) que contiene los análisis estadísticos de completado de datos de las estaciones de precipitación y temperatura. Disponible en CARPETA adjunto o en carpeta digital “Anexos” entregada con esta tesis.

Anexo C

7.0 AÑOS NIÑO NIÑA

Archivo en formato Excel (.xlsx) que contiene los análisis estadísticos de correlaciones con el índice ENSO. Disponible en CARPETA adjunto o en carpeta digital “Anexos” entregada con esta tesis.

Anexo D

8.0 MAPAS DE COBERTURAS

Archivo en formato Geodatabase (.gdb) que contiene los análisis de coberturas en Sistemas de Información Geográfica SIG. Disponible en CARPETA adjunto o en carpeta digital “Anexos” entregada con esta tesis.

Anexo E

9.0 MULTITEMPORAL COBERTURA

Archivo en formato Excel (.xlsx) e Imagen. (jpg) que contiene los análisis espaciales de cobertura. Disponible en CARPETA adjunto o en carpeta digital “Anexos” entregada con esta tesis.

Anexo F

10.0 IMPACTOS

Archivo en formato Excel (.xlsx) que contiene los análisis estadísticos de cultivos principales y transitorios de Boyacá. Disponible en CARPETA adjunto o en carpeta digital “Anexos” entregada con esta tesis.

Anexo G

11.0 ANALISIS ESPACIAL T y P

Archivo en formato Geodatabase (.gdb) que contiene los análisis de mapas de precipitación y temperatura en Boyacá e influencia Niño y Niña. Disponible en CARPETA adjunto o en carpeta digital “Anexos” entregada con esta tesis.

Anexo H

12.0 ANALISIS REZAGOS

Archivo en formato Excel (.xlsx) que contiene los análisis estadísticos de cultivos principales y transitorios de Boyacá con la correlación de índices ENSO. Disponible en CARPETA adjunto o en carpeta digital “Anexos” entregada con esta tesis.