

# **EVALUACIÓN DEL RIESGO AGROCLIMÁTICO EN EL CULTIVO DE MAÍZ (ZEA MAYS) EN LOS DEPARTAMENTOS DE CÓRDOBA Y META.**

Tesis para optar al título de Magister en Meteorología.

**Autor:**

**CARLOS FELIPE TORRES TRIANA**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS – METEOROLOGÍA**

**FACULTAD DE CIENCIAS – DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE BOGOTÁ**

**Bogotá D.C.**

**2017**

# **EVALUACIÓN DEL RIESGO AGROCLIMÁTICO EN EL CULTIVO DE MAÍZ (ZEA MAYS) EN LOS DEPARTAMENTOS DE CÓRDOBA Y META.**

Tesis para optar al título de Magister en Meteorología.

**Director de Tesis:**

**EMEL ENRIQUE VEGA RODRIGUEZ**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS – METEOROLOGÍA**

**FACULTAD DE CIENCIAS – DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE BOGOTÁ**

**Bogotá D.C.**

**2017**

**Agradecimientos:**

A Dios.

## Contenido

OBJETIVOS .....	10
Objetivo General.....	10
Objetivos específicos.....	10
RESUMEN .....	11
ABSTRACT .....	11
INTRODUCCIÓN .....	12
1. MARCO TEÓRICO.....	13
1.1 INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS CULTIVOS.....	17
1.2 INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMATICA EN CULTIVOS .....	19
1.3 ESTRÉS ABIÓTICO Y SU RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ (ZEA MAYS) .....	20
1.2.1 Sequía.....	20
1.2.2 Excesos hídricos.....	21
1.2.3 Radiación .....	21
1.3 VULNERABILIDAD Y RIESGO AGROCLIMÁTICO.....	21
1.5 QUINTO INFORME DE EVALUACIÓN AR5 .....	24
1. 6 MODELOS AGROCLIMATICOS .....	25
1.6.1 AquaCrop .....	26
1.6.2 DSSAT.....	28
1.6.3 CROPSYST .....	28
1.7. ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES .....	28
1. 8 EL MAÍZ Y EL ESTADO ACTUAL EN COLOMBIA.....	29
1.8.1 Importancia e impacto del cultivo del maíz .....	31
1.8.2 El maíz a escala mundial .....	31
1.8.3 El maíz a escala continental .....	32
1.8.4 IMPORTANCIA E IMPACTO DEL CULTIVO DEL MAÍZ EN COLOMBIA.....	33
2. METODOLOGIA .....	34
2.1 CULTIVO DE MAÍZ EN EL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA.....	35
2.2 CULTIVO DE MAÍZ EN EL DEPARTAMENTO DE META.....	36
2.3 VARIABLES PARA LA CUANTIFICACION DEL RIESGO.....	37
2.4 FUNCIÓN DE MÉRITO, ALGORITMO PARA DETERMINAR EL MUNICIPIO OBJETO DE ESTUDIO PARA EL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA Y META .....	37
2.4.1 Componente Clima: .....	38
2.4.2 Componente Cultivo:.....	39
2.4.3 Componente Suelo:.....	40

2.4.4 Municipios seleccionados: .....	41
2.5 INFORMACIÓN CLIMÁTICA .....	43
2.5.2 Control de calidad de la información climática .....	48
2.5.3 Selección de series de tiempo tipo para cada área de estudio.....	48
2.5.4 Complemento de series de tiempo tipo en cada área de estudio .....	49
2.6 CARACTERÍSTICAS DE SUELOS DE CÓRDOBA Y META.....	50
2.6.1 Suelos Ciénaga de oro, Córdoba: .....	50
2.6.1.1 Perfiles de los suelos más representativos, Ciénaga de Oro: .....	51
2.6.2 Suelos Puerto López, Meta: .....	52
2.6.2.1 Perfiles de los suelos más representativos Puerto López: .....	52
2.7 BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO DE THORNTHWAITE.....	52
2.7.1 Evapotranspiración potencial.....	53
2.7.2 Método Thornthwaite Balance hídrico y clasificación climática.....	54
Índice de humedad (Ih) .....	54
Índice de aridez (Ia) .....	54
2.8 VARIABILIDAD CLIMATICA .....	56
2.8.2 Análisis de tele-conexiones. ....	57
2.9 SOFTWARE Y MODELOS UTILIZADOS .....	59
2.9.1 R.....	59
2.9.2 Qgis .....	60
2.9.3 Soil Water Characteristics .....	60
2.9.4 ET0 Calculator .....	61
2.9.5 AQUACROP.....	61
2.10 ANALISIS DE CLÚSTER.....	63
3. RESULTADOS.....	65
3.1 CLIMATOLOGIA .....	65
3.1.2 Climatología Puerto López, Meta .....	71
3.2 VARIABILIDAD CLIMATICA Y VARIACION INTERANUAL .....	74
3.2.1 Variabilidad interanual, Ciénaga de Oro, Córdoba.....	74
3.2.2 Variabilidad interanual, Puerto López, Meta.....	77
3.3 AGRUPACION POR COMPONENTES PRINCIPALES - ACP.....	80
3.3.1 Córdoba.....	80
3.3.2 Meta.....	83
3.4 BALANCE HIDRICO Y CLASIFICACION CLIMATICA.....	88
3.4.1 Balance Hídrico Thornthwaite, Ciénaga de Oro, Córdoba. ....	88

3.4.1.1 Balance Hídrico Thornthwaite, Ciénaga de Oro, Córdoba; Evento ENSO El Niño.....	89
3.4.1.2 Balance Hídrico Thornthwaite, Ciénaga de Oro, Córdoba; Evento ENSO LA Niña .....	90
3.4.2 Balance Hídrico Thornthwaite, Puerto López, Meta.....	91
3.4.2.1 Balance Hídrico Thornthwaite, Puerto López, Meta; Años por debajo de lo normal .....	92
3.4.2.1 Balance Hídrico Thornthwaite, Puerto López, Meta; Años por encima de lo normal .....	93
4. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS .....	93
5. CONCLUSIONES .....	106
6. RECOMENDACIONES .....	107
BIBLIOGRAFÍA .....	108

### Índice de tablas

Tabla 1: Áreas cosechadas municipios con mayores producciones del departamento de Córdoba serie 2006 B-2014 A.....	36
Tabla 2: Áreas cosechadas municipios con mayores producciones del departamento del Meta en maíz tecnificado.....	37
Tabla 3: Listado de Estaciones Meteorológicas con Información a Utilizar. ....	44
Tabla 4: Inventario de Series de Tiempo por Parámetro.....	48
Tabla 5: Perfil de suelos Departamento de Córdoba.....	51
Tabla 6: Variables de suelo calculadas. ....	51
Tabla 7: Perfil PL – 23.....	52
Tabla 8: Clasificación por Factor de Humedad, Thornthwaite. ....	55
Tabla 9: Clasificación por Índice de Humedad y Aridez, Thornthwaite. ....	55
Tabla 10: Clasificación por eficiencia termal, Thornthwaite. ....	56
Tabla 11. Datos de entrada para el establecimiento de clústers, Ciénaga de Oro, Córdoba. Serie 1986-2014. ....	64
Tabla 12: Análisis de sensibilidad para las series meteorológicas de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima de la estación de Ciénaga de Oro, Córdoba. ....	65
Tabla 13: Análisis de sensibilidad para las series meteorológicas de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima de la estación de Puerto López, Meta. ....	66
Tabla 14: Valores de la anomalía del Índice ENSO, 1986-2014 .....	76
Tabla 15: Regímenes hídricos, Semestre A, Puerto López, Meta.....	78
Tabla 16: Regímenes hídricos, Semestre B, Puerto López, Meta. ....	79
Tabla 17: Balance Hídrico Climático de Thornthwaite, Ciénaga de Oro, Córdoba.....	89
Tabla 18: Balance Hídrico Climático de Thornthwaite, Puerto López, Meta.....	91
Tabla 19. Valores del Índice de anomalías en rendimientos de maíz variedad HIBRIDO COMERCIAL generados para el municipio de Ciénaga de Oro, Córdoba. Serie 1986-2014 .....	95
Tabla 20. Valores del Índice de anomalías en rendimientos de maíz variedad HIBRIDO COMERCIAL generados para el municipio de Ciénaga de Oro en diferentes fechas de siembra. Córdoba. Serie 1986-2014 .....	97
Tabla 21. Valores del Índice de anomalías en rendimientos de maíz variedad HIBRIDO COMERCIAL generados para el municipio de Puerto López en diferentes fechas de siembra. Serie 1986-2014 semestre A .....	100

Tabla 22. Valores del Índice de anomalías en rendimientos de maíz variedad HIBRIDO COMERCIAL generados para el municipio de Puerto López en diferentes fechas de siembra. Córdoba. Serie 1986-2014 semestre B.....	102
Tabla 23. Valores base y cuartiles para el cálculo del riesgo en el municipio de Ciénaga de Oro. Córdoba. Serie 1986-2014 semestre A. ....	104
Tabla 24. Valores base y cuartiles para el cálculo del riesgo en el municipio de Puerto López. Meta. Serie 1986-2014 semestre A. ....	105
Tabla 25. Valores base y cuartiles para el cálculo del riesgo en el municipio de Puerto López. Meta. Serie 1986-2014 semestre B. ....	105

### Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Regiones índices El Niño.....	19
Ilustración 2: Algoritmo para la cuantificación de la componente clima en el modelo de toma de decisiones.....	38
Ilustración 3: Algoritmo para la cuantificación de la componente cultivo en el modelo de toma de decisiones.....	40
Ilustración 4: Función de mérito para los municipios del departamento de Córdoba en las componentes de clima, cultivo y suelo. ....	41
Ilustración 5. Función de mérito para los municipios del departamento del Meta en las componentes de clima, cultivo y suelo. ....	42
Ilustración 6: Esquema de Tratamiento de la Información a Utilizar. ....	44
Ilustración 7. Estaciones Meteorológicas en cada Área de Estudio.....	47
Ilustración 8. Mapa de calor para las matrices de correlaciones para la estación 3518004.....	58
Ilustración 9: Interfaz de Soil Water Characteristics. ....	60
Ilustración 10: Interfaz del modelo AQUACROP. ....	62
Ilustración 11: Mapa de calor para las matrices de correlaciones de la estación 1307502, Ciénaga de Oro, Córdoba.....	75
Ilustración 12: Mapa de calor para las matrices de correlaciones de la estación 3512501 Puerto López, Meta.....	78
Ilustración 13: ACP para las variables climatológicas de Ciénaga de Oro, Córdoba. ....	81
Ilustración 14: Dendrograma y cuadro de resultados de las agrupaciones obtenidas en el municipio de Ciénaga de Oro, Córdoba con fecha ideal de siembra de comienzos de Mayo. ....	82
Ilustración 15: ACP para las variables climatológicas de Puerto López, Meta. Semestre A.....	83
Ilustración 16: Dendrograma y cuadro de resultados de las agrupaciones obtenidas en el municipio de Puerto López, Meta con fecha ideal de siembra a comienzos de abril.....	84
Ilustración 17: ACP para las variables climatológicas de Puerto López, Meta. Semestre B. ....	86
Ilustración 18: Dendrograma y cuadro de resultados de las agrupaciones obtenidas en el municipio de Puerto López, Meta con fecha ideal de siembra a comienzos de agosto. ....	86
Ilustración 19. Índice de Anomalías en rendimientos de maíz variedad HIBRIDO COMERCIAL generados para el municipio de Ciénaga de Oro, Córdoba. Serie 1986-2014.....	95
Ilustración 20. Estrategias de siembra empleadas en las simulaciones para la región de Ciénaga de Oro, Córdoba.....	96
Ilustración 21. Salidas de Aquacrop con 2 años contrastantes de oferta hídrica. Ciénaga de Oro, Córdoba.....	98
Ilustración 22. Estrategias de siembra empleadas en las simulaciones para la región de Puerto López, Meta. Semestre A.....	98
Ilustración 23. Índice de Anomalías en rendimientos de maíz variedad HIBRIDO COMERCIAL generados para el municipio de Puerto López, Meta, semestre A. Serie 1986-2014.....	99

Ilustración 24. Salidas de Aquacrop con 2 años contrastantes de oferta hídrica. Puerto López, Meta. Semestre A.....	101
Ilustración 25. Estrategias de siembra empleadas en las simulaciones para la región de Puerto López, Meta. Semestre B.....	101
Ilustración 26. Índice de Anomalías en rendimientos de maíz variedad HIBRIDO COMERCIAL generados para el municipio de Puerto López, Meta, semestre B. Serie 1986-2014 .....	102
Ilustración 27. Salidas de Aquacrop con 2 años contrastantes de oferta hídrica. Puerto López, Meta. Semestre A.....	104

### Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Calculo de Riesgo .....	23
Ecuación 2 Calculo de vulnerabilidad .....	23
Ecuación 3. Raíz cuadrada entre la distancia de 2 vectores.....	29
Ecuación 4: Modelo VAR.....	49
Ecuación 5: Variables modelo VAR.....	49
Ecuación 6: índice de calor mensual (i).....	53
Ecuación 7: Evapotranspiración potencial mensual no corregida en mm/día.....	53
Ecuación 8: humedad almacenada del mes actual .....	54
Ecuación 9: Índice de humedad (Ih) .....	54
Ecuación 10: Índice de aridez (Ia) .....	55
Ecuación 11: Factor de humedad (Fh) .....	55
Ecuación 12: Índice de anomalía .....	94

### Índice de Gráficas

Gráfica 1: Producción mundial de maíz.....	32
Gráfica 2: Series climáticas generada.....	66
Gráfica 3: Precipitación, normal climatológica 1981-2010, Ciénaga de Oro, Córdoba .....	67
Gráfica 4: Temperaturas, normal climatológica 1981-2010, Ciénaga de Oro, Córdoba.....	68
Gráfica 5: Brillo solar, normal climatológica 1981-2010, Ciénaga de Oro, Córdoba .....	69
Gráfica 6: Humedad Relativa, normal climatológica 1981-2010, Ciénaga de Oro, Córdoba.....	69
Gráfica 7: Serie climatológica y distribución de los datos para la serie 1981-2014 de las variables de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación en la estación de Ciénaga de Oro, Córdoba. ....	70
Gráfica 8: Precipitación, normal climatológica 1981-2010, Puerto López, Meta.....	71
Gráfica 9: Temperaturas, normal climatológica 1981-2010, Puerto López, Meta.....	72
Gráfica 10: Brillo solar, normal climatológica 1981-2010, Puerto López, Meta.....	73
Gráfica 11: Humedad Relativa, normal climatológica 1981-2010, Puerto López, Meta.....	73
Gráfica 12: Serie climatológica y distribución de los datos para la serie 1981-2014 de las variables de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación en la estación de Puerto López, Meta.....	74
Gráfica 13: Balance Hídrico Climático de Thornthwaite normal climatológica 1981-2010, Ciénaga de Oro, Córdoba.....	89
Gráfica 14: Balance Hídrico Climático de Thornthwaite, Ciénaga de Oro, Córdoba, bajo escenario El Niño. ....	90
Gráfica 15: Balance Hídrico Climático de Thornthwaite, Ciénaga de Oro, Córdoba, bajo escenario La Niña.....	90
Gráfica 16: Balance Hídrico Climático de Thornthwaite, Puerto López, Meta. Normal Climatologica. ....	91



Gráfica 17: Balance Hídrico Climático de Thornthwaite, Puerto López, Meta. Periodos por debajo de las precipitaciones normales. ....	92
Gráfica 18: Balance Hídrico Climático de Thornthwaite, Puerto López, Meta. Por encima de las precipitaciones normales.....	93

### **Índice de Anexos**

Anexo 1: Red activa de estaciones meteorológicas del departamento de Córdoba, IDEAM 2016. ...	116
Anexo 2: Red activa de estaciones meteorológicas del departamento del Meta, IDEAM 2016.....	117
Anexo 3: Función de mérito para los 28 municipios del departamento de Córdoba, Componente Clima, Cultivo y Suelo.....	118
Anexo 4: Función de mérito para los 29 municipios del departamento del Meta, Componente Clima, Cultivo y Suelo. ....	119
Anexo 5: Valores Normal Climatológica 1980-2010, Ciénaga de Oro, Córdoba.....	1
Anexo 6: Valores Normal Climatológica 1980-2010, Puerto López, Meta.....	2
Anexo 7. Mapa de Colores para las matrices de correlaciones para las estaciones 1307501 (Chima) y 1307503 (Turipana), Córdoba.....	3
Anexo 8. Mapa de Colores para las matrices de correlaciones para las estaciones 3518003 y 3518004, Meta. ....	5
Anexo 9: Fecha de siembra para el departamento de Córdoba, Semestre A. ....	7
Anexo 10. Fecha de siembra para el departamento de Meta Semestre A. ....	8

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

- Evaluar el riesgo agrometeorológico asociado a los eventos meteo-climáticos, sobre la producción del cultivo del maíz (*Zea mays*), en los departamentos de Córdoba y Meta.

### **Objetivos específicos**

- Identificar las amenazas de origen meteorológico que afecten al cultivo del maíz en zonas productoras de los departamentos.
- Analizar el riesgo agrometeorológico que incide en el cultivo del maíz (*Zea mays*).
- Determinar herramientas para la toma de decisiones para mitigar las amenazas meteorológicas sobre el cultivo del maíz en la zona de estudio.

## RESUMEN

Fueron identificados y evaluados los riesgos de origen agrometeorológicos para el cultivo del maíz (*Zea mays*) en zonas productoras de los departamentos de Córdoba y Meta, mediante la metodología de función de mérito se seleccionaron municipios con información climática, de suelos y con superficies importantes de maíz cosechado para determinar el área de estudio. Para el análisis climático, se emplearon series diarias de las variables meteorológicas de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, evaporación y brillo solar, que permitieron la caracterización climática de cada una de las regiones y la generación de balances hídricos. Las variaciones interanuales de la precipitación se correlacionaron con análisis de tele-conexiones que permitieron correlacionar 33 índices de variabilidad climática con las series de precipitación, lo que permitió generar balances hídricos para los diferentes escenarios.

Se generaron simulaciones de rendimientos del cultivo de maíz para la serie 1986-2014, con una variedad comercial validada en Colombia para diferentes departamentos incluyendo Córdoba y Meta, estas simulaciones permitieron generar diferentes estrategias para mitigar los diferentes riesgos agroclimáticos en el área de estudio.

**Palabras Clave:** Riesgos agroclimáticos, Variabilidad Climática, Eventos ENSO, *Zea mays*.

## ABSTRACT

It was identified and analyzed Agrometeorological risks for maize crop (*Zea mays*) in producing areas of the departments Córdoba and Meta, using the methodology of merit function were selected municipalities with climatic information, soils and areas of maize harvested to determine The area of study. For the climatic analysis, daily series of the meteorological variables of rainfall, maximum temperature, minimum temperature, relative humidity, evaporation and solar brightness were used, that allowed the climatic characterization of each one of the regions and the generation of water balances. The interannual variations of precipitation were correlated with tele-connection analysis that allowed correlating 33 indexes of climatic variability with the precipitation series, which allowed the generation of water balances for the different scenarios.

Simulations of maize crop yields were generated for the 1986-2014 series, with a comercial variety validated in Colombia for different departments including Córdoba and Meta, these simulations allowed to generate different strategies to mitigate the different agroclimatic risks in the study area

**Keywords:** Agroclimatic risks, Climatic variability, ENSO, *Zea mays*.

## INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays*), históricamente se ha convertido en el cultivo más importante entre los cereales a nivel mundial por su producción (795.935.000 de toneladas, en la temporada 2009-2010, superando al trigo y al arroz), de las cuales el 90% corresponden a maíz amarillo y el 10% restante a maíz blanco. Ocupa el segundo lugar en área de siembra, con alrededor de 140 millones de hectáreas, se siembra en 135 países y se comercializan en el mercado internacional más de 90 millones de toneladas. (FENALCE, 2010).

Los sistemas de producción agropecuarios en Colombia, son altamente dependientes de las ofertas climáticas que sus regiones les ofrecen, muchas veces estas ofertas suelen variar tanto en volumen como en frecuencia, lo que las convierte en un riesgo para los productores, entendiéndose éste como la incertidumbre, a factores que podrían llegar a conducir a un daño o a reducciones significativas de la producción cuando dichas ofertas puedan traer consecuencias negativas, la idea de riesgo es entonces, la probabilidad, mayor o menor, de alcanzar un resultado adverso (Miguez, 2007) partiendo de este concepto de riesgo, los sistemas de producción agropecuarios se vuelven en gran medida vulnerables ya que la toma de decisiones muchas veces se ejecutan en un ambiente de incertidumbre -esto es, conocimiento imperfecto- tanto económicas, como climáticas entre otras, lo que ocasiona el favorecimiento de factores adversos en la producción, el capital productivo y la rentabilidad (Miguez, 2007)

Desde el punto de vista de riesgos agroclimáticos, se observó como en las últimas décadas se han venido presentando una intensificación de las sequías, afectando a todos los sectores socio-económicos, convirtiéndolo en uno de los fenómenos naturales de mayor preocupación en el mundo. En América Latina se han desarrollado importantes estudios en países como Argentina y México (Donnari, 1995) en los cuales la frecuencia de eventos extremos como la sequía, ha venido aumentando en los últimos años. Estados Unidos cuenta con centros especializados para la mitigación de la sequía, que mediante herramientas de imágenes satelitales MODIS, hacen seguimiento a grandes regiones productoras de cereales y frutas basándose en el verdor de la vegetación mediante imágenes recopiladas por sensores de alta resolución (Rojas, 2005). Por otro lado, se observa como los fenómenos de variabilidad climática como La Niña, ocasiona excesos hídricos con consecuencias nefastas para el territorio nacional, dejando por ejemplo pérdidas en los años 2010 – 2011 por 11,2 billones de pesos (BID, 2012), y 3.500.000 ha inundadas correspondientes al 5% del territorio nacional (IGAC 2011, IDEAM 2011, DANE 2011).

Los departamentos de Córdoba y Meta, siendo los 2 principales departamentos productores de la región Caribe y Orinoquia respectivamente (FENALCE, 2010), presentan regímenes de precipitación diferentes (IDEAM, 2005), por lo tanto sus riesgos agroclimáticos son diferentes, es allí, donde el conocimiento detallado de las amenazas hidrometeorológicas principalmente mediante diversas metodologías que abarquen la mayor cantidad de

información se vuelven de vital importancia, tales como: balances hídricos, índices de precipitación, Variaciones Interanuales.

## 1. MARCO TEÓRICO.

La información climática es considerada por la Organización Meteorológica Mundial (WMO por sus siglas en inglés) como una herramienta para el proceso de toma de decisiones en el ámbito agrícola, ya que las condiciones del clima pueden alterar los rendimientos de cultivos y afectar el suministro de alimentos a una población (WMO, 2009). La toma de decisiones en agricultura es un proceso complejo en el que se consideran riesgos relacionados con aspectos productivos, de mercado, legales, sociales y políticos entre otros.

Dentro de estos riesgos las variaciones del clima son uno de los principales factores que impactan la producción y administración en sistemas agrícolas (Sivakumar MVK, 2007). Eventos climáticos extremos como sequías, inundaciones o perturbaciones en la temperatura y los vientos tienen impactos mayores en estos sistemas e impiden el desarrollo agrícola sustentable en una región o país. En este contexto la evaluación de la frecuencia, magnitud y duración de eventos climáticos que afecten la producción agrícola es necesaria para adoptar medidas que contribuyan a reducir los impactos negativos sobre la seguridad alimentaria definida como el aseguramiento de que todas las personas tengan en todo momento acceso físico y económico a una alimentación inocua y nutritiva para satisfacer sus necesidades alimenticias (FAO, 1983).

Se han realizado numerosos estudios a nivel mundial para este propósito. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) estableció un marco general para los programas relacionados con riesgos climáticos y eventos extremos en la estrategia A3 del Marco Estratégico 2000-2015 llamada “Prevención y preparación, alerta de emergencias y rehabilitación de recursos naturales y sistemas de producción de alimentos”, en la cual se resalta la importancia de aumentar la capacidad de los países y sus poblaciones para afrontar los efectos reales y potenciales de emergencias complejas relacionadas con las variaciones del clima en agricultura.

En este marco el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) junto al Instituto Internacional para el Desarrollo Sustentable (IISD por sus siglas en inglés) ejecutaron el proyecto Gestión de Riesgos Climáticos, entendido como el enfoque estructurado para manejar una amenaza a través de una secuencia de actividades que integran evaluación de riesgo, estrategia de desarrollo para manejarlo y mitigación, en siete (7) países (República Dominicana, Honduras, Kenya, Nicaragua, Níger, Perú y Uganda) y generaron una serie de recomendaciones para los gobiernos, organismos de desarrollo y las propias comunidades que contribuyen a comprender cómo podrían desarrollarse los riesgos climáticos en cada país y los cambios que diversos sectores socioeconómicos tendrían que

aplicar a la forma en que se generan ingresos y medios de subsistencia ante las variaciones del clima.

Recientemente otros organismos como la Plataforma de Gestión de Riesgo Agrícola (IPARM por sus siglas en inglés) dependiente del Fondo Internacional para el Desarrollo Agrícola (IFAD por sus siglas en inglés), han sido creados para apoyar el desarrollo de la gestión integral de riesgos en agricultura y facilitar el intercambio de conocimientos en este campo, esto con el objetivo de contribuir al logro de una agricultura sostenible, reducir la inseguridad alimentaria y mejorar los medios de vida de las familias rurales en países en desarrollo.

En África (Tonini F. J., 2012) identificaron áreas propensas a sequía severa en Etiopía mediante análisis de imágenes satelitales con una transformación del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI por sus siglas en inglés) llamado Diferencia Absoluta de NDVI calculado pixel por pixel. Por su parte (Jayanthi, 2015) propusieron un modelo probabilístico para evaluar el riesgo de sequía en cultivos de maíz en Kenia, Malawi y Mozambique y cultivos de mijo en Nigeria. Para esto utilizaron el índice de satisfacción de requerimientos de agua (Minamiguchi, 2005) (WRSI por sus siglas en inglés) y series sintéticas de precipitación a largo plazo lo cual les permitió generar mapas de frecuencia del fenómeno.

En Asia (Minamiguchi, 2005) hace un análisis del monitoreo operacional de sequías y cultivos utilizando imágenes satelitales con sistemas de información de la FAO encontrando una utilidad potencial para sistemas de alerta temprana. (Shahid S., 2008) realiza una evaluación espacial del riesgo de sequía en Bangladesh usando el índice estandarizado de precipitación (ISP) para diferentes periodos de tiempo generando mapas de riesgo con el enfoque amenaza-vulnerabilidad. Por último (Nazarifar, 2014) generaron mapas de producción potencial para cultivos de trigo en Irán integrados a zonas de probabilidad de ocurrencia de sequias según su duración e intensidad, utilizando el ISP y una regionalización definida con el Modelo de Zonificación Agroecológica (ZAE) de la FAO.

En Europa (Pistrika, 2007) proponen una metodología para definir y evaluar el riesgo de inundación y la vulnerabilidad de áreas inundables. La metodología sugerida sigue tres pasos: i) peligro anualizado incorporando probabilidades de ocurrencia y daños potenciales previstos, ii) vulnerabilidad (exposición y capacidad de afrontamiento) en áreas propensas a inundación y iii) riesgo anualizado de inundación. También (Gobin, 2013) discuten el progreso de la investigación en análisis y manejo de riesgos climáticos en agricultura, encontrando que en los últimos quince (15) años ha aumentado el número de estudios que por lo general modelan el impacto de cambios en los valores medios de variables climáticas y el incremento en la frecuencia de eventos extremos en la producción agrícola.

En Estados Unidos (Cabrera, s.f.) realizan una revisión sistemática de métodos de incorporación de información climática, en particular de variabilidad climática relacionada con el ciclo ENOS (El Niño – Oscilación del Sur), en la gestión de riesgos agrícolas encontrando que existen actualmente necesidades de información para la formulación de

planes agrícolas y políticas rurales. No obstante, se señala que la investigación actual en el tema se limita al estudio de cultivos específicos en pequeñas áreas con poco énfasis en otras partes del sistema agrícola.

En Latinoamérica (De la Casa, 1999) simularon la fluctuación estacional del uso del agua en el cultivo de papa en la provincia de Córdoba (Argentina) con el modelo YIELD para evaluar el riesgo de sequía, encontrando un potencial limitado del cultivo debido a la frecuencia alta de condiciones hídricas desfavorables caracterizadas por grandes diferencias entre la evapotranspiración máxima y la precipitación efectiva.

Otro enfoque se encuentra en Venezuela donde (Mendoza, 2003) caracterizan la sequía meteorológica utilizando el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) y Deciles (ID), determinando para ambos los umbrales de lluvias correspondientes a una situación de sequía y la severidad de la misma sobre la base de su cobertura espacial. Los autores determinaron que la caracterización por el índice ID reporta eventos más severos en mayor área del país que la realizada con el SPI, siendo este un índice más restrictivo. Otros autores como (Martínez, 2009) investigadores del Centro Internacional de Investigación del El Niño (CIIFEN), resaltan la importancia del fortalecimiento de sistemas de información y alertas tempranas que sean útiles para la toma de decisiones en administración de riesgos climáticos.

En Colombia se han realizado varios estudios para caracterizar y evaluar la sequía con el uso de índices basados tanto en el parámetro de precipitación como en el concepto de balance hídrico del suelo. (Hurtado, 2002) encontraron que el Índice de Anomalía de Humedad (Z) es el que refleja de forma más apropiada las condiciones de sequía en el país, no obstante el Índice Estandarizado de Precipitación (PSI por sus siglas en inglés) tiene un cálculo más sencillo y una correlación alta con el índice Z. Más adelante (Mayorga, 2006) utilizaron el PSI para caracterizar la sequía en el país encontrando que en el periodo 1991-1992 se presentó el evento más extremo y con mayor extensión territorial en Colombia afectando especialmente los valles de los ríos Magdalena y Cauca, la cuenca del río Sogamoso y San Andrés y Providencia.

Otros estudios pretenden determinar los efectos de la variabilidad del clima y el cambio climático sobre los sistemas agrícola. Peña *et al.* (2011) determinaron las tendencias en series estacionales de temperatura y precipitación utilizando la prueba no paramétrica de Mann Kendall encontrando que existe una amenaza extendida en la agricultura de tierras altas de los departamentos de Boyacá y Cundinamarca debido al aumento de la temperatura máxima en las últimas tres décadas.

(Ruíz, 2013) determinaron la correlación existente entre el comportamiento de series estacionales de precipitación y la producción agrícola de diferentes cultivos en el departamento del Atlántico teniendo en cuenta el efecto de los fenómenos de El Niño y La Niña, encontrando que el cultivo de maíz incrementa sus rendimientos si en el veranillo de

mitad de año se registran volúmenes de precipitación por encima de lo normal, y los reduce si estos se registran en la segunda temporada lluviosa.

(Téllez, 2001) determinaron los efectos del cambio climático sobre los balances hídricos de diversos cultivos del país utilizando un escenario real (1969-1990) y un escenario de duplicación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) simulado por el modelo del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR por sus siglas en inglés) y el Modelo Climático Comunitario del NCAR (CCM3 por sus siglas en inglés). En cultivos transitorios, cuyos ciclos de desarrollo siembra-cosecha duran menos de 1 año, como el maíz, se encontró que las épocas de siembra son fundamentales para auspiciar unas condiciones favorables de humedad del suelo a lo largo de los ciclos de desarrollo. En este contexto los meses de siembra de enero y octubre en el escenario simulado presentaron las mayores diferencias de distribución territorial de excesos y déficit hídricos respecto al escenario real. En general se determinó que las condiciones hídricas para los cultivos transitorios en las regiones Caribe y Orinoquia serán más críticas en el escenario simulado.

Es destacable el trabajo de (Boshell, 1998) los cuales caracterizaron y evaluaron los riesgos agroclimáticos para diferentes cultivos en Colombia, esto con el objetivo de medir las consecuencias de estos riesgos en diferentes regiones y épocas como una ayuda para definición de medidas de prevención y manejo. El documento presenta los mapas de distribución porcentual de zonas con diversos niveles de intensidad o impacto de riesgo de sequía, inundación, heladas, vientos fuertes o granizadas en cada departamento.

Los referentes mostrados a nivel nacional e internacional conforman la base teórica para la evaluación de riesgos agroclimáticos en el cultivo de maíz (*Zea mays*) en los departamentos de Córdoba y Meta llevada a cabo en la presente investigación. Los trabajos revisados han caracterizado y evaluado riesgos agroclimáticos mediante el uso de índices, la interpretación multitemporal de imágenes satelitales y la generación de cartografía temática en el contexto del enfoque vulnerabilidad-amenaza-riesgo. Estos referentes establecen los lineamientos técnicos bajo los cuales se formuló la metodología aplicada.

Los impactos del cambio climático en la agricultura han sido investigados, examinando el impacto de las variables climáticas en el rendimiento y la pertinencia de la producción de maíz. Los estudios de la variabilidad climática difieren en la extensión y dirección de los posibles impactos climáticos en la agricultura, ya que algunos autores como (Schlenker W. W., 2006) demuestran que estos cambios climáticos van a beneficiar la producción en la agricultura (Huang, 2010), esto indica, que en algunas regiones donde potencialmente se siembra esta especie, las condiciones ambientales van a variar, ocasionando en algunos casos, condiciones favorables que incidan de una manera positiva en los rendimientos.



## 1.1 INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS CULTIVOS

El cambio climático se refiere al incremento de la temperatura de la tierra debido a la liberación de gases como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CFCs, N<sub>2</sub>O y O<sub>3</sub> en la atmósfera de la tierra (IPCC, 2007). El cambio climático presenta un reto para los investigadores que intentan cuantificar su impacto local debido a la escala global y la diversidad de los ecosistemas. De la misma forma el efecto de cambio climático puede ser dramático, debido a las cantidades de CO<sub>2</sub> disponibles para la fotosíntesis. En adición, los factores climáticos como temperatura, precipitación, humedad y presión afectan el desarrollo de las plantas (Ulukan, 2008)

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007) ha concluido que las altas concentraciones de gases de efecto invernadero puede producir una desecación de las zonas subtropicales a finales de este siglo creando una crisis por sequía en estas zonas. Una de las mayores amenazas que existen en la agricultura es la escasez de agua debido a varios factores dentro de estos están el aumento de la población y un cambio climático mundial. Esta problemática amenaza la agricultura como la conocemos hoy, ya que las actividades de agricultura usan cerca de un 75% del agua potable del mundo (Yang, 2010).

El calentamiento global ha marcado cambios en la distribución de la variabilidad de temperaturas y se han presentado patrones extremos de precipitaciones, sin embargo se mantiene la incertidumbre entre la relación entre calentamiento global y variabilidad climática (Huntingford, 2013). En muchas regiones del mundo se han evidenciado alteraciones en los ecosistemas y aumentado la frecuencia de eventos extremos como sequías, inundaciones y temperaturas extremas, principalmente desde la segunda mitad del siglo XXI. Se han causado desastres provenientes de climas extremos que causan daños a los cultivos y los sistemas de infraestructura de alimentos. En años recientes cerca de un cuarto de todos los daños y pérdidas en países desarrollados han sido relacionados con el sector agrícola. Estos desastres se esperan sean más frecuente en los próximos años, por esta razón las políticas deben fortalecer la información científica para el desarrollo de planes para la gestión de desastres y mecanismos de adaptación frente a fenómenos climáticos (IPCC, 2012)

En muchas regiones del mundo han habido cambios considerables en la naturaleza de las sequías, inundaciones y temperaturas extremas, eventos que comienzan a ser evidentes desde la mitad del siglo veinte. Sobre las áreas de agricultura se han presentado grandes desastres causados por climas extremos como sequias, inundaciones, oleadas de calor, granizada y heladas entre otros, causando daños en los cultivos. Con la potencialidad de desestabilizar las infraestructuras alimentarias de los países (Lesk, 2016)

Un evento climático o un evento climático extremo puede resultar en un desastre no solo por su severidad, también depende de la vulnerabilidad y la exposición de los sistemas humanos y naturales que se encuentren expuestos. Las investigaciones pasadas han abordado las condiciones climáticas extremas asociadas a los efectos en la agricultura con definiciones fijas como son el grado de días sobre algún umbral (Lesk, 2016)

El reporte del IPCC del 2013 reafirma que el cambio climático y la variabilidad climática va a impactar la producción de alimentos y fibras alrededor del mundo debido al efecto negativo

sobre crecimiento y rendimiento en plantas gracias a las altas concentraciones de CO<sub>2</sub>, altas temperaturas, alteración en las precipitaciones, aumento en los regímenes de transpiración; adicionalmente se verán afectados factores de tipo biótico tales como modificación de la dinámica de las malezas, plagas y patógenos en los cultivos (IPCC , 2014).

Para satisfacer las necesidades futuras exigen que nuestros sistemas agrícolas produzcan un 50% más de alimentos para alimentar los 9 billones de personas que se estiman para el 2050 adicionalmente, estos alimentos deben satisfacer una adecuada nutrición para la población (Bruinsma, 2003)

El estrés por sequía y salinidad afectan la producción de la mayoría de los cultivos en varios grados de severidad dependiendo de la etapa fenológica donde se presente el estrés, duración e intensidad del estrés. Por ejemplo el maíz (*Zea mays*) un cultivo básico, es muy sensible al estrés por deficiencia de agua, ya que la polinización y el desarrollo embrionario durante la fase posterior a la polinización resulta muy afectada por el suministro de agua (Bolanos J, 1996). La agricultura es un sector que se encuentra ampliamente ligado con el clima por lo tanto este puede verse severamente afectado por los cambios climáticos. Los rendimientos del maíz en el mundo están pronosticados a declinar en respuesta a un aumento en la temperatura. (Fisher, 2012)

Una de las consecuencias del incremento progresivo en las temperaturas globales será el aumento progresivo en los costos de los alimentos, indudablemente el tiempo y el clima inducen una inestabilidad en los alimentos y las fibras (Ziska LH, 2014)

Las proyecciones de varios modelos climáticos sugieren que año a año la variación va a incrementar más los efectos de las temporadas haciendo más severos los fenómenos de sequía y de humedad. Por ejemplo, en Estados Unidos en el Medio Oeste el número de días con lluvias se triplicó comparado con los 50 años anteriores, particularmente en la primavera. Se presentaron adicionalmente un aumento en la temperatura en verano y debido a esto se aumentó la evaporación y la transpiración de los cultivos, aumentando las deficiencias de agua y produciendo pérdidas económicas (Tilman, 2006). Una de las maneras de hacer frente al inminente cambio climático es el incremento de la diversidad agroecosistémica, usando rotaciones en los diferentes cultivos de importancia agrícola y pecuaria (Gaudin, 2015).

En Colombia el aumento promedio previsto de la temperatura promedio anual para el 2050 se estima que sea de 2.5C y es posible que la precipitación aumente en un 2.5% a mediados del siglo. Las temperaturas más altas vendrán acompañadas del descongelamiento de glaciares en los Andes y la desaparición de páramos importantes, ecosistemas que hoy son fuente importante de agua. Entre tanto la variabilidad de la temperatura anual seguirá siendo tema de preocupación en todo el país, cobrando mayor importancia el almacenamiento de agua (Lau, Jarvis, & Ramírez, 2011)

## 1.2 INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN CULTIVOS

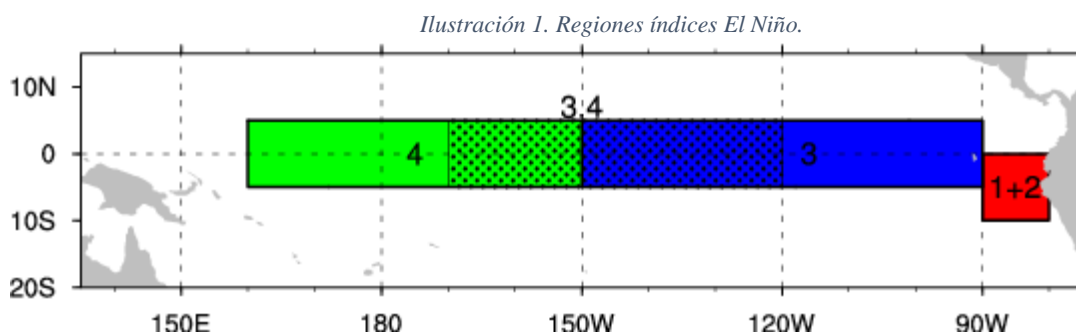
Es evidente la estrecha relación que existe en las alteraciones del clima en la escala inter-anual por eventos de variabilidad climática, estudios como los desarrollados por (Román A, 2016) (Rojas B, 2011) (Guarin G, 2001), han demostrado las altas correlaciones existentes entre eventos de variabilidad climática y rendimientos, fechas de siembra, propagación de plagas y enfermedades en diferentes cultivos transitorios y permanentes de alto impacto socio-económico nacional como papa, maíz, banano entre otros.

Como término general, la variabilidad climática se refiere a la variación recurrente del clima en tiempos relativamente cortos, que se presentan en escalas intraestacionales hasta la escala interdecadal, para esta investigación específica, el estudio de los cambios importantes en las precipitaciones se centrará, en la variabilidad climática interanual, donde en la mayoría de los casos los eventos ENSO inciden directamente en diferencias de los valores normales de precipitación en Colombia, estudios como los desarrollados por (Montealegre Bocanegra, 2009), (Pabon C J. D., 2013), (Pabon C J. D., 2006), (Poveda, 2004); han demostrado la influencia de eventos ENSO en las regiones andinas y caribe de Colombia.

En términos generales, la influencia de los océanos Pacífico y Atlántico en la variabilidad de la precipitación de Colombia, parecen ser los responsables más determinantes de la variabilidad interanual de esta variable, en este sentido los procesos de interacción océano-atmósfera, son determinantes principalmente en los cambios significativos de la precipitación en el área continental del país; para Colombia, los efectos directos de la interacción del océano Pacífico con las precipitaciones, se ha estudiado a lo largo de los últimos años con el índice ENSO.

### 1.2 Fenómeno El Niño

El ciclo ENSO, tiene un periodo promedio de recurrencia entre 2 y 7 años, es un índice de variabilidad climática de acople oceánico y atmosférico, el primero se denomina fenómeno El Niño y monitorea el calentamiento anómalo de la franja del pacífico ecuatorial, la profundización de la termoclina y el monitoreo de las corrientes de la costa peruana (Montoya, 2008), citado por (Román A, 2016) y la componente atmosférica se denomina Oscilación del sur, que es la fluctuación de la presión atmosférica en tendencia opuesta entre el centro de alta presión del pacífico sudeste y el de baja presión de indonesia (SNHP, 2011), citado por (Román A, 2016), en la ilustración 1 se aprecian las regiones del pacífico ecuatorial que hacen parte del Niño.



### **1.3 ESTRÉS ABIÓTICO Y SU RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ (ZEA MAYS)**

#### **1.2.1 Sequía**

La sequía es un fenómeno característico normal y recurrente que ocurre virtualmente en todas las zonas climáticas alrededor del mundo, causando pérdidas por billones de dólares anualmente para la comunidad agropecuaria (Sivakumar 2011). Recientemente los estrés de tipo abiótico como sequía y aumento de temperaturas son más frecuentes en la mayoría de las partes del mundo. La agricultura en el futuro debe estar mejor adaptada a un rango de estrés bióticos y abióticos para hacer frente a las consecuencias directas e indirectas de un progresivo cambio climático (Neenu, 2013). El Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales de Colombia ha identificado los siguientes tipos de sequía: sequía meteorológica, hidrológica, agrícola, estacional y contingente.

Según (Mati, 2000) para la zona de Kenya en el 2030 la temperatura puede aumentar en un 2.29C y la precipitación se mantendrá igual, por lo cual se esperan cambios en los calendarios de siembra. Este aumento de la temperatura resultará en un aumento en las tasas de evapotranspiración, lo cual causará una reducción de la producción de productos alimentarios en estas áreas (Mati, 2000). Las bajas precipitaciones tienden a ocurrir con altas temperaturas, o baja humedad en el suelo tiende a calentar el aire porque se reduce el flujo de calor latente, en estos casos la temperatura y el rendimiento están respondiendo directamente a la precipitación (Lobell D. B., 2013). Al mismo tiempo, hay muchos mecanismos que pueden explicar las relaciones observadas, como por ejemplo la sensibilidad de la floración al estrés por calor. El maíz es particularmente sensible al calor ya que en el intervalo posterior a la antesis el polen puede ser deshidratado bajo condiciones de sequía extrema (Lobell D. B., 2013)

Una de las posibles soluciones para este tipo de problemas es el cambio en las fechas de siembra, la investigación en el desarrollo de nuevas variedades que produzcan altos rendimientos bajo condiciones de sequía y con una madurez precoz, incremento de la conciencia de los productores frente al cambio climático, explicar la vulnerabilidad del cultivo y socialización de estrategias de mitigación, búsqueda de alternativas de maíz seco en zonas secas, incluyendo el riego, cosecha de aguas lluvias. Otra de las necesidades es el de futuras investigaciones de mitigación contra los cambios climáticos adversos en el sector de la alimentación (Mati, 2000)

Se han encontrado correlaciones negativas entre el rendimiento y la temperatura media estacional; esto se encuentra reportado para grandes productores como Estados Unidos, China, Brasil y África. Se ha encontrado que la principal causa de esta relación negativa es la sensibilidad del maíz a temperaturas extremas (definidas como la acumulación de grados día sobre 30C) en climas templados como en climas tropicales (Lobell D. B., 2013).

### 1.2.2 Excesos hídricos

Las regiones que se ubican en las latitudes medias a altas pueden no experimentar un decrecimiento en el rendimiento como el esperado en las zonas tropicales donde se espera sea la peor afectación, sufriendo pérdidas considerables en la producción agrícola. Un aumento en la precipitación causará serias inundaciones como las registradas en el Chocó en el 2014. Para el 2055 se proyecta una reducción del 10% en la producción de maíz para África y Latinoamérica bajo varios escenarios donde se pueden presentar pérdidas de 2 billones de dólares por año (Altieri, 2015). Como es el caso de los cultivos de Maíz, trigo y otros de importancia han experimentado reducciones asociadas al clima de 40 millones de toneladas por año desde 1981 al 2002 en una escala mundial (Lobell D. B.-R., 2011)

Los cambios en las temporadas de precipitación o en su patrón también afectará la producción de cultivos, pero la mayoría de modelos coinciden en asegurar que los efectos más relevantes serán dados por la temperatura más que por la precipitación (Altieri, 2015)

### 1.2.3 Radiación

(Yin, 2016) Realizaron un estudio en la zona nordeste agrícola de China ya que en esta zona se ubica un área de alta producción en maíz. A pesar de que el rendimiento del maíz ha mostrado un incremento durante las recientes décadas, la producción de maíz ha sido afectada por el cambio climático. Dentro de algunas de las variables que se estudiaron fue la radiación. En este estudio reportan que uno de los posibles beneficios del aumento de la radiación en los cultivos es el aumento de la fotosíntesis y de la asimilación neta. Pero por otro lado los efectos negativos se pueden observar si estos aumentos de radiación se dan en la etapa de floración, estos eventos están ligados a aumentos en la temperatura. Si estos eventos de alta radiación se presentan en conjunto con baja disponibilidad de agua en el suelo entonces la temperatura en el dosel de la planta aumentará y esto afectaría la producción de semilla negativamente durante este periodo reduciendo el rendimiento (Yin, 2016). Adicionalmente los efectos de una alta radiación pueden estar ligados a otros factores como la acumulación de ozono, el cual disminuye la fotosíntesis y contribuye a la pérdida de rendimiento (Zhang, 2014).

## 1.3 VULNERABILIDAD Y RIESGO AGROCLIMÁTICO

El riesgo es la probabilidad de que ocurra un daño o una pérdida de carácter económico, social o ambiental sobre un elemento dado (personas, elementos materiales o ambientales) en un determinado sitio y en un periodo determinado. El riesgo es el resultado de la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. Es decir, los factores que lo componen son la amenaza y la vulnerabilidad (IPCC, 2012)

La gestión de riesgos en la agricultura se realiza mediante diversos instrumentos o acciones que persiguen, entre otros objetivos, contribuir a reducirlos, a mitigarlos o a tomar la decisión de transferirlos a la industria del seguro. Para un correcto uso de los instrumentos se debe contar con la información pertinente como por ejemplo: el comportamiento del clima, información sobre las fechas de las diferentes actividades productivas, su vulnerabilidad y la

exposición a diversas fuentes de riesgos. La valoración del riesgo es crítica, ya que permite justificar técnicamente la implementación de acciones estratégicas que lo reduzcan o aumenten en su resiliencia (Basualdo, 2015).

En América Latina y el Caribe, las evaluaciones relacionadas con niveles de riesgo de desastre reafirman que las condiciones de vulnerabilidad son altas y que las pérdidas son significativas. Asociadas principalmente a fenómenos hidrometeorológicos (Basuardo *et al.*, 2015).

Los derivados para seguros climáticos conocidos en inglés como *weather derivatives* son un modelo Arrow-Debreu, que realiza pagos anticipados si el evento climático que se anticipó sucede. El mercado ha crecido rápidamente, apenas en 1997 el mercado por derivados del clima no existía. En 1998 el mercado fue estimado en \$500 millones de dólares. Los derivados para seguros climáticos usa herramientas como los grados de días de calor, grados de días frío, grados días de crecimiento, temperaturas promedio, temperaturas máximas, temperaturas mínimas, precipitación, humedad y brillo solar (Campbell, 2011).

Cada fase del desarrollo en una planta requiere un mínimo de acumulación de temperatura para llegar a su término y permite a la planta pasar a la siguiente fase. Esta acumulación es llamada tiempo térmico, suma de calor, suma térmica o en inglés *growing degree-day (GDD)*. Se obtiene a partir de las temperaturas máximas y mínimas del día (ver función 1) y la temperatura base del cultivo (Rawson, 2001). Un estudio que incorpora los GDD en el modelamiento del rendimiento es el de (Schlenker W. &., 2006) y permite una mejor predicción de los fenómenos de producción, en este estudio se encontró una relación no lineal entre temperatura y el rendimiento del maíz que tiene una aproximación al concepto de grados día, presentando un aumento del rendimiento con el aumento de temperatura para temperaturas moderadas, pero cuando la temperatura excede los 30C el aumento es perjudicial para el rendimiento.

Existe un gran número de temperaturas de referencia que dependen del cultivo. Por ejemplo, la temperatura de referencia base mínima del maíz es de 7.5C para el caso de México (García-Pacheco, 2002) Para el caso de Colombia en los departamentos de Meta y Tolima la temperatura base mínima es de 8C y la temperatura base máxima es de 38C (Fernandez, 2013).

Por cada grado centígrado de calentamiento global el rendimiento del grano está proyectado que disminuirá en un 5%. Sin embargo, desde 1980 la producción de trigo y maíz es entre un 3 a un 5% menor aún sin la influencia del calentamiento global. El incremento de la frecuencia e intensidades de las sequías e inundaciones han también afectado significativamente la agricultura (Bruinsma, 2003).

#### **1.4 EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD**

Cambio climático se refiere al cambio en el estado del clima que puede ser identificado por cambios en el promedio y/o en la variabilidad de sus propiedades que persisten y se extienden periódicamente, típicamente se evalúa por décadas o en lapsos mayores. Los cambios

climáticos pueden deberse a procesos internos naturales o fuerzas externas como modulación de ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropogénicos en la composición de la atmósfera o el uso del suelo (IPCC, 2014)

La definición de peligro en la temática de cambio climática debe entenderse como la potencial ocurrencia de un evento físico natural o inducido por el hombre; una amenaza o impacto físico que puede causar la pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, también daños y pérdidas de la propiedad, infraestructura, bienestar, provisión de servicios, ecosistemas y recursos medioambientales (IPCC, 2014)

Exposición es la presencia de personas, especies o ecosistemas, funciones ecosistémicas, servicios, recursos, infraestructura, activos sociales, culturales o económicos que puedan ser afectados negativamente (IPCC, 2014)

Vulnerabilidad, la predisposición de ser adversamente afectado. La vulnerabilidad reúne varios conceptos y elementos incluyendo la susceptibilidad al daño y la falta de capacidad para hacer frente y adaptarse (IPCC, 2014)

Riesgo son las consecuencias posibles donde algo de valor está en juego y el resultado es incierto. El riesgo es presentado como una probabilidad de ocurrencia de un evento de peligro. Los riesgos resultan de la interacción de vulnerabilidad, exposición y peligros (IPCC, 2014). Se usa el término riesgo para referirse a la probabilidad de pérdidas superiores al umbral (Chen, 2010)

Se debe tener presente que no todo fenómeno físico genera una crisis que se catalogue de desastre, depende de la vulnerabilidad, es decir, del grado de susceptibilidad o la incapacidad de hacer frente a los efectos adversos; la vulnerabilidad a su vez es función de la sensibilidad del sistema y de la capacidad de adaptación entendida como la capacidad para ajustarse al cambio climático, para regular daños potenciales, aprovechar las oportunidades o hacer frente a las consecuencias. La metodología para la estimación de la vulnerabilidad establecida por el Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales - IDEAM se expresa en las ecuaciones 1 y 2 (Ocampo, 2011).

Ecuación 1. Calculo de Riesgo

$$Riesgo = Amenaza * (Vulnerabilidad) \text{ Ecuación [1]}$$

Ecuación 2 Calculo de vulnerabilidad

$$Vulnerabilidad = (Sensibilidad * Capacidad adaptación) \text{ Ecuación [2]}$$

Para responder al cambio climático, se requiere un proceso de gestión de riesgo que involucra un conjunto de acciones que permiten identificar y evaluar los riesgos, con el fin de emprender en forma efectiva las medidas necesarias para responder ante ellos. Para la gestión del riesgo climático se han empleado herramientas tecnológicas que permiten la evaluación y monitoreo: desarrollo de indicadores de vulnerabilidad, establecimiento de sistemas de alerta temprana, información satelital, modelos de simulación de cultivos, sistemas de información

geográfica (SIG), métodos geostadísticos, recolección y transmisión automática de datos (Ocampo, 2011).

El proceso adaptativo supone ajustes para reducir la vulnerabilidad y fortalecer la capacidad de recuperación tras los cambios observados y esperados del clima (Parry, 2007)

## **1.5 QUINTO INFORME DE EVALUACIÓN AR5**

El Panel Intergubernamental en Cambio Climático por sus siglas en inglés (IPCC) es un grupo internacional encargado de la evaluación de la ciencia relacionada con el cambio climático, impacto del cambio climático y las opciones para la adaptación y mitigación. El IPCC se encarga de presentar proyecciones del cambio climático futuro basado en diferentes escenarios y el riesgo del cambio climático, pero no se encarga de la creación de políticas (IPCC, 2014). Uno de sus resultados es el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5), el cual provee una descripción general del estado del conocimiento de la ciencia del cambio climático, enfatizando en los nuevos resultados desde la publicación del Cuarto Informe de Evaluación (AR4) en el 2007 (Pachauri, 2014).

En el AR5 los riesgos climáticos futuros, vulnerabilidades, y los impactos de estos son evaluados a través de experimentos, analogías y modelos basados en estudios previos. Cuando se hace referencia a los experimentos se habla del cambio de una o más factores climáticos de un sistema que afectan al objeto de interés, esto permite anticipar condiciones futuras. Analogías hace el uso de variaciones existentes y son usadas cuando los experimentos controlados son inviables debido a razones éticas, abarca grandes áreas, un gran tiempo es requerido o es un sistema muy complejo. Los modelos son típicamente simulaciones numéricas de los sistemas del mundo real calibrados y validados usando observaciones de experimentos o analogías y posteriormente estos modelos son usados con datos que representan el clima futuro (Pachauri, 2014).

Los modelos son generalmente definidos como una simplificación o abstracción de un sistema real (Loomis, 1979). Esto aplica en especial para la modelación de sistemas biológicos como cultivos, donde la realidad es compuesta por un vasto número de componentes y procesos que interactúan sobre una amplia variedad de niveles organizacionales. Específicamente un modelo de un cultivo puede ser descrito como un esquema que predice el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo, dado a partir de un grupo de características y variables climatológicas (Steduto P. H., 2009).

Los modelos de cambio climático son una herramienta de investigación fundamental para entender el clima. Los modelos regionales son un método de investigación complementario que permiten estudiar y simular más detalladamente procesos regionales bajo condiciones locales. Al generar estos modelos, estos proveen los insumos clave para un estudio de impactos. También como los planes de adaptación, pronosticando posibles daños y oportunidades relacionadas a la variabilidad climática y el cambio climático (Rummukainen, 2010).



La calidad de la simulación de los modelos regionales y locales es dependiente de la calidad de los modelos en sí mismos (Yhang, 2008). Otro factor con la misma importancia es la calidad de los datos crudos y los límites de las variables. Los modelos regionales son evaluados bajo condiciones locales con límites perfectos. En estos experimentos las condiciones límites son derivadas de análisis globales meteorológicos o reanálisis que son compilaciones que provienen más de la observación que de las condiciones simuladas (Rummukainen, 2010).

El esfuerzo en la modelación de cultivos se enfoca principalmente en la integración del conocimiento de fisiología, algunos de estos modelos se enfocan a la investigación a nivel de planta y otros son enfocados al desarrollo del dosel y estas herramientas enfocadas al manejo de herramientas para la toma de decisiones (Steduto P. H., 2009).

Dependiendo del propósito y los objetivos del modelo del cultivo se puede distinguir una aproximación científica o ingenieril. El primer enfoque trata de mejorar el conocimiento del comportamiento del cultivo, su fisiología y su respuesta a los cambios ambientales. El segundo intenta proveer alertas a productores o predicciones para la toma de decisiones políticas (Steduto P. H., 2009).

## **1. 6 MODELOS AGROCLIMATICOS**

El desarrollo y mejoramiento de los recursos computacionales han proporcionado herramientas para almacenar grandes volúmenes de datos y realizar cálculos numerosos. Permitiendo realizar un mejor entendimiento de las respuestas y comportamiento biológico de los sistemas de producción agrícolas bajo diferentes escenarios y condiciones climáticas contrastantes. La respuesta de los cultivos al déficit hídrico es compleja para esta estimación se han usado diferentes métodos como el desarrollado por (Doorenbos, 1977) el cuál usa parámetros empíricos, otra alternativa es la simulación biofísica que se usan para la predicción del crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo basado en las características genéticas, agronómicas y condiciones ambientales durante el desarrollo de los cultivos desarrollado por Monteith (1996). Ahora se usan modelos diferentes para simular la respuesta de los cultivos en condiciones diversas de producción a nivel parcelario (Flores-Gallardo, 2013).

La mayoría de estos modelos están descritos a nivel de campo y estos pueden poseer un gran potencial para los estudios regionales y procesos globales como el cambio climático y las tecnologías que se deben adoptar. En algunos de estos estudios los rendimientos simulados se acercan a los rendimientos presentados en campo (Rosenzweig). 2013).

Los modelos usados en agricultura como DSSAT, CROPSYST, WOFOST y AquaCrop intentan predecir los posibles comportamientos de los cultivos a partir del modelamiento de procesos físicos como el balance hídrico en el suelo, las respuestas de los cultivos frente a la acumulación de grados día-GDD y los puntos de marchitez de las plantas. Estos modelos también incorporan los efectos de las prácticas de manejo como son irrigación, aplicación de

fertilizantes y coberturas. En muchos casos estos modelos representan el conocimiento disponible sobre la agricultura, biología de la planta y manejo (Jame, 1996).

Un modelo es una representación simplificada de un sistema real, dependiendo del nivel de detalle, asumen diferentes grados de complejidad en la simulación del sistema, su utilidad no solamente radica en modelar la realidad, sino que los procesos más importantes sean identificados y pronosticados (Link E. J., 2005), (P Steduto, 2006) citado por (G, 2001).

### 1.6.1 AquaCrop

AquaCrop es un modelo desarrollado por la FAO que simula el crecimiento y desarrollo de cultivos de tipo herbáceo basado en el consumo de agua en diferentes condiciones ya sea de tipo secano o de riego suplementario total. Siendo posible su aplicación para un amplio rango de condiciones ecológicas y sistemas productivos. Este modelo integra el efecto de las variables edáficas y climáticas, junto con las variables de manejo, para simular la producción de los cultivos en respuesta al agua en el sistema suelo-planta. El modelo puede trabajar con un paso temporal diario y requiere relativamente pocos datos, sencillos y normalmente disponibles o posibles de ser estimados a partir de la literatura existente. Algoritmos y procedimientos de cálculo modelan la infiltración del agua, el drenaje fuera de la zona radicular, el desarrollo del dosel de las plantas y de la zona de las raíces, la evaporación y la tasa de transpiración, dando como resultados un balance de agua en el suelo, la producción de biomasa y la formación del rendimiento de los cultivos (Morla, 2012)

Este modelo usa parámetros de tipo conservativo y no conservativo. Los parámetros denominados conservativos, son prefijados, como productividad del agua normalizada (WP\*) coeficientes de cobertura del dosel (CDC), coeficientes del cultivo (Kc) índice de cosecha de referencia (Hio), presumiblemente aplicables a diferentes condiciones; y parámetros no específicos, que pueden ser modificados según el genotipo y el manejo a utilizar (Hsiao, 2009). Los parámetros conservativos son específicos para cada cultivo y estos presentan muy pocos cambios a pesar de variaciones en el manejo agronómico que tenga el cultivo, el tiempo o la ubicación del cultivo. Estos parámetros se deben estimar con datos de una cosecha en condiciones favorables y que no presenten algún tipo de limitaciones (Steduto P. H., 2012)

Adicionalmente posee parámetros No Conservativos que son propios de cada región que el modelo lo divide en diferentes módulos, módulo del clima, módulo de cultivo, módulo de suelo, módulo de manejo del cultivo (Cortés, 2013). Para poder realizar una estimación con el modelo AquaCrop se debe definir los parámetros No Conservativos, los cuales se basan en la disponibilidad de información agronómica para las diferentes etapas fenológicas del cultivo, esta información es vital ya que sirve para la validación del modelo, dado el caso que no se ajuste es necesario reiniciar o reevaluar algunos parámetros ingresados (Morla, 2012).

El componente de Materia Verde del Cultivo (CC) es un factor importante de AquaCrop ya que a través de la expansión de la CC, conductancia y senescencia se determina la cantidad de agua transpirada, la cual puede servir para la determinación de la biomasa producida

(Raes, 2009). AquaCrop cuantifica el desarrollo foliar a través de del CC y no usa el índice de área foliar (IAF) ya que el CC simplifica el modelo además el CC puede ser fácil de obtener a partir de fuentes de percepción remota o incluso simularse con AquaCrop (Raes, 2009).

AquaCrop simula el CC desde la emergencia del cultivo, a través del desarrollo y la senescencia del dosel de la planta. El CC y la evapotranspiración de referencia se emplea junto con el coeficiente del cultivo y es usado para el cálculo de la transpiración en condiciones sin estrés. AquaCrop puede realizar un balance diario de agua que incluye las entradas y salidas de flujos de agua (infiltración, escorrentía, percolación, evaporación y transpiración) (Heng, 2009). La transpiración es traducida a biomasa mediante la productividad del agua normalizada por la demanda evaporativa atmosférica y la concentración de dióxido de carbono del aire, específicos del cultivo a simular (Raes, 2009).

El modelo de AquaCrop ha sido usado para la modelación de varios cultivos en diferentes condiciones y ha presentado buenos resultados. En especial para el caso del maíz.

AquaCrop ha sido parametrizado y probado en maíz usando datos experimentales de seis temporadas de cultivo en la universidad de California Davis (Hsiao, 2009). Para maíz se reportó que AquaCrop es capaz de simular el comportamiento de algunas variables como la cobertura del dosel, desarrollo de biomasa y el rendimiento del grano de cuatro variedades de maíz sobre seis diferentes ciclos de cultivo que difieren en densidad de siembra (Abedinpour, 2012).

El modelo AquaCrop fue usado en México para la simulación de un cultivo de maíz en condiciones de estrés hídrico y se concluyó que la simulación estuvo cerca de los valores observados en campo, además lo propone como un modelo útil para la evaluación de escenarios de estrés hídrico, requerimientos de riego, el impacto de diferentes condiciones de manejo agronómico y estimar rendimientos dependientes de las condiciones climáticas de la región (Flores-Gallardo, 2013)

Buenos resultados también se obtuvieron con AquaCrop en la simulación de CC, aumento de biomasa y producción del grano en condiciones de no estrés y mediano estrés. El modelo fue menos satisfactorio en la simulación de un estrés severo especialmente cuando el estrés ocurre en la etapa de senescencia. El modelo fue capaz de simular el uso de agua del cultivo (ET) bajo una alta demanda evaporativa y condiciones climáticas de Bushland, Texas (Heng, 2009).

De la misma forma (Cortés, 2013) evaluó este modelo para la estimación de rendimientos para el cultivo de maíz en Colombia en los departamentos de Córdoba, Meta, Tolima y Valle del Cauca. Donde los resultados tuvieron un rango del 10% de diferencia entre los valores simulados y los obtenidos en campo. La modelación con el software AquaCrop presentó resultados con aceptable precisión de los rendimientos esperados en campo y fechas evaluadas. Y se concluye que el modelo AquaCrop presenta similitud con los resultados del rendimiento del grano y biomasa seca de los híbridos del cultivo de maíz evaluados en las zonas.

La simplicidad de AquaCrop gracias a su mínimo de datos de entrada, los cuales están disponibles o son fáciles de coleccionar lo convierten en un modelo amigable con el usuario y puede ser fácilmente por los usuarios finales (Heng, 2009).

### **1.6.2 DSSAT**

Por sus siglas en inglés (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) DSSAT es un modelo predictivo, determinístico, con herramientas que modelan la dinámica del nitrógeno en el suelo, el comportamiento hídrico y temperatura en campo, adicionalmente es empleado para diferentes investigaciones enfocadas a evaluar los efectos del cambio climático en cultivos (Ospina, 2006) actualmente DSSAT cuenta con las herramientas de modelo para poder simular el desarrollo de 16 cultivos de importancia económica, con la interacción de 6 módulos que simulan diferentes condiciones de clima, suelo y tecnología.

Los datos de entrada para alimentar el modelo corresponden a datos de cultivo, de suelo y meteorológicos, en este caso es importante conocer las características del cultivo a modelar en un sitio específico, los datos mínimos climáticos incluyen información diaria de las variables de radiación solar, temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación que correlacionan el comportamiento del cultivo con la oferta climática. Para el caso específico del maíz, DSSAT consta del módulo IXIM el cual contiene información por defecto con duración estándar de cada fase fenológica del mismo; se resalta la compatibilidad con Sistema de Información Geográfico y análisis estadísticos modificables por el usuario.

### **1.6.3 CROPSYST**

El CROPSYST (Cropping Systems Simulation Model) es un modelo genérico, que simula procesos que intervienen en la relación clima, cosecha, manejo y suelo. Genera simulaciones a escala diaria y en su configuración se pueden modelar varios años incluyendo varios sistemas de cultivo. Tiene la ventaja de tener una interfase muy amigable con acoples de Sistemas de Información Geográfico, para poder espacializar los resultados modelados, se destaca la generación de datos climáticos con el paquete Climgen (Stöckle, 2003).

El modelo simula sobre un área el balance hídrico y nitrógeno en el suelo y la planta, los estados fenológicos del cultivo, el dosel y el desarrollo radicular, producción de biomasa, producción, cosecha, residuos agrícolas, la erosión hídrica y las prácticas de manejo del cultivo. Se alimenta de las características propias del suelo, es un modelo gratuito.

## **1.7. ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES**

Para el análisis de la respuesta al cultivo frente a diferentes variaciones climáticas se realizó un análisis de clúster, con el objetivo de identificar componentes principales (ACP). Estudios como el reportado por (Vilanova, 2015) encontraron relaciones entre la respuesta del cultivo y las variables climáticas; explicadas por ACP. Para entender mejor el comportamiento de los ciclos se realizó un análisis de componentes principales (ACP). El primer paso realizado fue

el cálculo del mejor número de clústers para los ciclos, esto se realizó con el paquete NbClust desarrollado por (Charrad, 2015). Este paquete consta de 30 índices para la determinación del número de clústers y propone el mejor número los mismos, los resultados fueron calculados con una distancia euclidiana descrita en la ecuación 3. Algunos de los periodos simulados fueron eliminados debido a la falta de información de la variable precipitación, esto podría generar ruido estadístico en el establecimiento de los clústers.

*Ecuación 3. Raíz cuadrada entre la distancia de 2 vectores.*

$$d(x, y) = (\sum_{j=1}^d (x_j - y_j)^2)^{1/2} \quad \text{Ecuación [3]}$$

## 1. 8 EL MAÍZ Y EL ESTADO ACTUAL EN COLOMBIA

En Colombia, las fuentes de recopilación, gestión y divulgación de información climática incluyen entidades de gobierno agremiaciones de productores centros de investigación, instituciones académicas, entre otras. El principal centro gestor de información ambiental en el país es el Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC), que se sustenta en un proceso de concentración interinstitucional, intersectorial e interdisciplinario, liderado por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (Blundo Canto) resalta la escasez de iniciativas relacionadas con la predicción agroclimática en América Latina, esto ofrece una gran oportunidad para contribuir con una iniciativa dirigida e integrada que involucre a los actores.

La Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas (FENALCE) con más de 5 estaciones meteorológicas automáticas en las principales zonas de maíz y frijol registran variables climáticas fundamentales que influyen en el desarrollo de los cultivos, adicionalmente, sensores de humedad y temperatura del suelo a varias profundidades.

Según el censo nacional agropecuario del 2014, del total del área censada en uso agrícola (8.4 millones de hectáreas), el 83.9% correspondió a siembras de cultivos transitorios y/o permanentes, de las cuales se distribuyen de la siguiente forma 13% a áreas de descanso y el 3.1% a áreas de barbecho. El sector colombiano se caracteriza por un gran número de pequeñas unidades productivas agropecuarias con poca área 69.9% con menos de 5 hectáreas, en contraste con un número reducido de grandes unidades de producción con mucha área (Blundo Canto)

El cultivo de maíz es uno de los renglones más importantes de la producción agrícola colombiana, ha sido el cultivo colonizador en muchas regiones del país, y se encuentra cultivado desde la Guajira hasta el Amazonas y desde la Costa Pacífica hasta los Llanos Orientales, desde el nivel del mar hasta 3000 metros de altitud y con precipitaciones desde 300 mm hasta 10.000. Córdoba superó las 177 mil toneladas de maíz con un área cosechada de más de 36 mil hectáreas y rendimientos aproximados de 4.4 toneladas por hectárea para el año 2013.

Los principales municipios en los que se sembró maíz tecnificado en Córdoba en el 2013 fueron Ciénaga de Oro, Cereté, Chimá, San Pelayo, Lorica, Montería y Cotorra en una

superficie de aproximadamente 30.000 hectáreas. En tecnificado se siembran híbridos, con un rendimiento promedio de 5.5 toneladas por hectárea. Los agricultores dependen en gran medida de las condiciones climáticas, pero el problema que se reporta es la carencia de información climática confiable. Los agricultores dependen en gran medida de las condiciones climáticas, pero el problema que se ha reportado es la carencia de información climática local confiable. De esta manera el agricultor desea recibir información climática para mejorar la toma de decisiones en el momento de la siembra. Una de las maneras de favorecer la adopción de nuevas tecnologías es a través de parcelas o vitrinas experimentales (Blundo Canto)

Los agricultores de Córdoba se han visto afectados por eventos climáticos adversos en años recientes, principalmente por altas temperaturas y déficit de lluvia al momento de sembrar y durante las fases críticas del desarrollo del cultivo. Como resultado provocó un endeudamiento progresivo de los productores. La capacidad de adaptación de los agricultores es limitada (Blundo Canto)

En Córdoba, los sistemas de cultivo se basan en maíz híbrido o transgénico en rotación con algodón, o en sistemas mixtos de maíz híbrido y maíz tradicional, en rotación con cultivos como ñame y yuca (Blundo Canto)

El programa de Investigación en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CGIAR), junto con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas (FENALCE) el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) y el Centro de Investigación de Agricultura Tropical (CIAT) realizan estas reuniones en el departamento colombiano de Córdoba como parte de un esfuerzo conjunto para integrar conocimientos y acciones sobre seguridad alimentaria y agricultura sostenible frente a las amenazas de variabilidad y el cambio climático, dirigidos especialmente a los agricultores más vulnerables (CCAFS, 2016)

El cultivo del maíz se encuentra ampliamente difundido en todas las regiones naturales, dada su adaptación a diversas condiciones agroclimáticas y socioeconómicas. El 33.2% del área sembrada pertenece a la variedad de maíz blanco y el 66.8% a la de maíz amarillo (DANE, 2005)

La mayor parte de los agricultores no utilizan fertilizantes, simplemente adicionan materia orgánica descompuesta al momento de la siembra; normalmente en cultivos de maíz tecnificado, se aplica entre una o dos dosis de fertilizante nitrogenado industrial en la fase de desarrollo del cultivo. La aplicación de riego no es común. Las siembras, desarrollo y producción del cultivo están determinadas por la disponibilidad hídrica en el suelo, que normalmente está regulada por las lluvias (Bello, 2013)

El cultivo de maíz en Colombia posee un rendimiento económicamente alcanzable que está en el orden del 80% del rendimiento potencial. En la zona del Caribe de Colombia la producción oscila entre 5 y 9 toneladas por hectárea, la cual está asociada con las condiciones

climáticas de la región. En los Valles interandinos, Meta y Valle de Cauca los rendimientos potenciales varían entre 7 y 10.5 toneladas por hectárea (Bello, 2013)

(Bello, 2013) Crearon un modelo para la simulación frente a la toma de decisiones para la adaptación de cultivos ante fenómenos de variabilidad y cambio climático. El modelo Aquacrop permite elegir apropiadamente las fechas idóneas de siembra y permite tomar decisiones de adaptación a los fenómenos ambientales y antropogénicos.

En el caso del departamento de Córdoba se creó la Mesa Técnica Agroclimática que es un enlace entre actores generadores de predicciones agroclimáticas, de meteorólogos y productores, en especial del cultivo de maíz. Como resultado los participantes reciben de modo directo y presencial, alertas agroclimáticas tempranas, analizándolas desde diferentes perspectivas (CCAFS, 2016). Es importante resaltar, que FENALCE ha liderado esta mesa técnica desde el año 2014, transfiriendo conocimientos a los productores de cereales y leguminosas en el territorio nacional.

Los pronósticos agroclimáticos para la selección de las mejores medidas de adaptación, se establecen a partir del uso de modelos de predicción climática y modelos de cultivos, donde son necesarias varias condiciones para el uso efectivo de las predicciones climáticas en la mejora de la toma de decisiones (Blundo Canto):

### **1.8.1 Importancia e impacto del cultivo del maíz**

El maíz es uno de los granos alimenticios más antiguos que se conoce, y considerado como uno de los cultivos más importantes para el desarrollo de la humanidad debido a sus grandes bondades y multitud de usos. Este grano además de consumirse de forma directa y al ser procesado, también es fuente importante para la producción de biocombustibles y aceites (FAO, 2012).

El cultivo se originó en América Central, donde se siembra tradicionalmente en colinas., es una especie C4 típica de lugares con veranos calurosos, sin embargo, hoy en día la siembra de este cereal ha llegado a diferentes ambientes como los 58 de latitud norte, en Canadá y Rusia y hasta los 40 latitud sur, en Argentina y Chile (FENALCE, 2010).

Es el primer cereal a transformaciones tecnológicas en su forma de cultivo, que incluyó la producción de híbridos de un alto potencial productivo. El maíz es una de las especies cultivadas con mayor potencial de producción y el de mayor rendimiento de grano por hectárea, con registros a nivel experimental de 24 t/ha. El éxito de la tecnología desarrollada para el mejoramiento del maíz ha estimulado una revolución agrícola generalizada para muchos otros cultivos en el mundo (FENALCE, 2010).

### **1.8.2 El maíz a escala mundial**

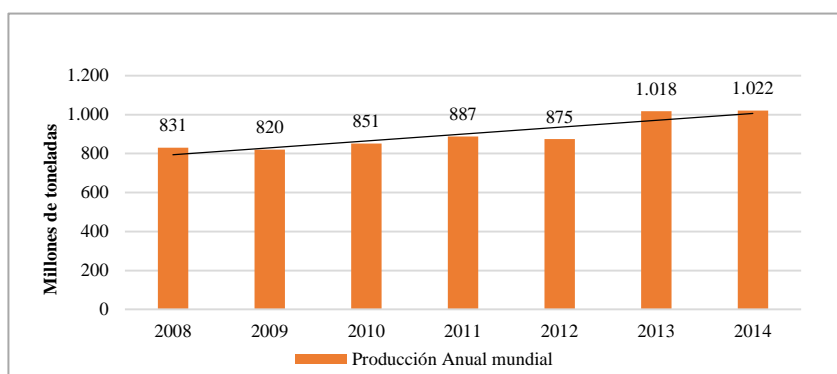
Para el periodo 2008 – 2014 el crecimiento promedio se estimó en un 2% anual. Los países con mayor área destinada al cultivo de maíz son: China continental con 36 millones de Ha

estimadas para el año 2014, seguido de Estados Unidos de América con 35 millones para el mismo periodo de tiempo, (FAO, 2016).

En cuanto al rendimiento promedio mundial para el mismo periodo de tiempo se calcula en 4,6 ton Ha<sup>-1</sup>, sin embargo, países como Estados Unidos de América, alcanzan un rendimiento promedio de 10 ton Ha<sup>-1</sup>, seguido de Francia con 7 ton Ha<sup>-1</sup> (FAO, 2016). Gran parte de este incremento obedece a una mayor densidad de siembra, el manejo adecuado de la fertilización, la estructura óptima del dosel y variedades de madurez tardía con ciclos biológicos más prolongados, (FAO, 2012).

El dato más actualizado estimado por la FAO sobre producción mundial de maíz se calculó en 1.022 millones de toneladas producción correspondiente al año 2014, (FAO, 2016), los principales países productores para este mismo año fueron: Estados Unidos de América con, China, Brasil, Argentina y Ucrania. Casi todas las variedades de maíz de alto rendimiento son híbridas. El aumento del uso de híbridos en la década de 1930 condujo a una aceleración evidente en el incremento del rendimiento con el tiempo (FAO, 2012)

Gráfica 1: Producción mundial de maíz



Fuente: (FAO, 2016)

### 1.8.3 El maíz a escala continental

En América del Sur los datos estimados por la FAO para el año 2014, indica que el país que más área destina para el cultivo de maíz es Brasil, con aproximadamente 15 millones de Ha, seguido de Argentina con 5 millones de Ha, otros países de la región no alcanzan a superar el millón de Ha. Colombia en el 2014 reportó a la FAO un total de 654.093 ha cosechadas.

En cuanto a la producción de maíz en esta región, para el año 2014, dato más actualizado de la FAO, América del Sur alcanzó una producción de 126 millones de toneladas. Los principales países productores para este mismo año fueron Brasil y Argentina con 79 y 33 millones de toneladas respectivamente.



#### 1.8.4 IMPORTANCIA E IMPACTO DEL CULTIVO DEL MAÍZ EN COLOMBIA

El maíz se encuentra ampliamente difundido en todas las regiones naturales del país, dada su especial adaptación a diversas condiciones agroclimáticas y socioeconómicas; por eso, este grano se cultiva desde la Guajira hasta el Amazonas y desde la Costa Pacífica hasta los Llanos Orientales; desde el nivel del mar hasta 3000 metros de altitud, en situaciones bien contrastantes y con precipitaciones desde 300 mm al año en la Guajira, hasta 10.000 mm, en el Chocó. Este se siembra principalmente como monocultivo y una menor parte en asocio con fríjol, ñame y arveja, en relevo con fríjol y papa e intercalado con yuca, algodón, caña, café y otros cultivos perennes en su etapa de instalación (FENALCE, 2010).

En Colombia el contexto histórico de la evolución del cultivo de maíz (FENALCE, 2010), ha presentado eventos de importancia tanto para el desarrollo de este cultivo como para el desarrollo general de la agricultura del país, los siguientes apartes resumen los eventos que forjaron a través del tiempo el progreso de este cereal:

- En el año 1965 se registra la mayor área sembrada en el país con 868.900 ha y una producción de 870.800 ton.
- En la década del 70 se mantiene un área total promedio de 600.000 ha, de las cuales 100.000 pertenecían al sector tecnificado.
- A partir del año 1986 se observa un aumento en las áreas sembradas para llegar a una cifra de 786.800 ha en el año 1990 y una producción de 1.155.000 toneladas.
- En 1990 se alcanzan las 786.800 ha sembradas con una producción de 1.155.000 ton. El sector tradicional continuaba con una alta participación, 86% del área y 75% de producción.
- Hasta comienzos de la década del 90 el país era autosuficiente en maíz. En 1991 las importaciones fueron de solo 8.043 toneladas, pero ya en el 1992 se importaron 505.901 ton y continuaron creciendo para llegar a 1.918.489 en el 2000 y a 3'212.000 en el 2009.
- Durante los años 90, conocida como la década perdida para la agricultura nacional, el área de maíz comienza a disminuir como consecuencia de la entrada en vigencia de la política de apertura económica, que reduce los aranceles, libera las importaciones, en una época de bajos precios internacionales, con una tasa de cambio revaluada que favorece las importaciones.
- Consecuentemente desde el año 1991 comienza una reducción en el área de maíz de 735.000 ha que continúa hasta el año 2000 cuando se sembraron 407.519 ha y la producción llegó 960.109 ton, la más baja de los últimos años.
- En el 2001 empieza una recuperación como consecuencia de un mejoramiento en los precios internos y estímulos especiales que ofreció el gobierno a través del programa Proagro. En este año el área sube a 497.529 ha, de las cuales 156.689 ha (31.5%) corresponden ya al sector tecnificado.

- En el año 2002 se formaliza la cooperación técnica entre FENALCE, la Federación de Cafeteros y el Cimmyt para la investigación y el fomento de la producción de maíz, en la zona cafetera, que contó con el apoyo de Ministerio de Agricultura.
- Para el año 2009 la superficie sembrada fue de 542.053 ha con una producción de 1.446.879 ton., 979.445 de amarillo y 467.434 de blanco. Las importaciones alcanzaron la cifra de 3.212.000 toneladas.

## 2. METODOLOGIA

Dos grandes sistemas de producción en Colombia se han desarrollado, el tecnificado y el tradicional. El sector tecnificado, generalmente está localizado en zonas con buena oferta ambiental, hace uso de la mecanización, semillas mejoradas, fertilizantes y plaguicidas obteniendo rendimientos que van de 4.5 a 11 ton ha<sup>-1</sup>. En varias zonas del Valle del Cauca, Córdoba, Meta, Huila, Tolima y la Zona Cafetera, los rendimientos superan con frecuencia las 7 toneladas. El sector tradicional, está localizado tanto en zona plana como de ladera, con suelos relativamente pobres y ambientes con déficit de precipitación. El agricultor cultiva menos de 10 hectáreas, y casi no usa semillas mejoradas ni fertilizantes, de ahí que su rendimiento sea muy bajo, del orden de 1,8 ton ha<sup>-1</sup>. (FENALCE, 2010)

Los cultivos de maíz y la producción del mismo, están estrechamente influenciados por factores climáticos y características de los suelos. Habitualmente la materia orgánica descompuesta hace parte del fertilizante usado por los agricultores en este tipo de cultivos, a diferencia del maíz tecnificado donde son usados los fertilizantes sintéticos. En cuanto al riego, este no es común, sin embargo, se observa en algunas plantaciones el uso de métodos de surcos y de aspersión. Las etapas de siembra, desarrollo del cultivo y producción del

mismo, están condicionadas por la disponibilidad hídrica en el suelo, que normalmente está regulada por las lluvias (FAO - MADR, 2013)

En el país se cultivan dos tipos de maíz: amarillo y blanco. El amarillo se usa principalmente para consumo animal e industrial y una pequeña parte para consumo humano (ABA el 75%, 11% trilla, 6% otros usos, 5% molienda húmeda, 2% Cervecería y Expandidos y 1% harinas precocidas). Debido al incremento en la demanda y a los programas de fomento del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y FENALCE, el maíz amarillo ha venido creciendo hasta representar en el año 2009, el 66% de la producción nacional, desplazando así en importancia al maíz blanco. El blanco se utiliza esencialmente para consumo humano (62% trilla, 25% harinas precocidas y 13% otros usos) y su producción que representó cerca del 60% del total nacional hasta 1998, ahora es solo del 34% (FENALCE, 2010)

Para la serie de 2009-2014, el departamento de Córdoba cuenta con una mayor participación porcentual dentro del total nacional de producción maíz, en comparación con el departamento del Meta. Se observa una tendencia decreciente en la producción, especialmente en el departamento de Córdoba, la misma tendencia se observa para la producción total del país.

Los pequeños productores, es decir aquellos cuya producción se da en terrenos menores a 5 hectáreas, conforman el 85% de la producción nacional de maíz. La localización de la producción nacional se ve con mayor representatividad en la región de la zona cafetera 22% del territorio nacional, seguido de la región de Santander y Cesar con el 15%, Tolima y Cundinamarca con el 14% y Córdoba con 13%. En menor porcentaje se presentan el Valle con 12%, Meta 9%, Huila 8%, Sucre 5%, y costa norte con 3% (Superintendencia de Industria y Comercio, 2010)

## 2.1 CULTIVO DE MAÍZ EN EL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA

Según datos oficiales de las Encuestas Nacionales Agropecuarias, para los años comprendidos entre 2006 y 2014 en el departamento de Córdoba en promedio fueron sembradas 35.885 ha año<sup>-1</sup>, seguido de Sucre con un promedio anual de 16.173 ha año<sup>-1</sup> y Cesar con 5.524 ha año<sup>-1</sup>, estas estadísticas convierten a Córdoba en el departamento de la región caribe con mayor cobertura de maíz tecnificado sembrado. Dentro de Córdoba, la región correspondiente al Sinú Medio cuenta la mayor área sembrada y cosechada de maíz para todo el departamento, esta región comprende los municipios de San Pelayo, Cereté, Ciénaga de Oro y San Carlos que en promedio para la temporalidad comprendida entre el semestre B del año 2006 y Semestre A del año 2014, representaron el 49% del total departamental de áreas cosechadas y sembradas de maíz tecnificado, adicionalmente, estos mismos municipios presentan rendimientos promedio más altos comparativamente con los demás municipios del departamento de Córdoba que fueron estimados en 4.63 t ha<sup>-1</sup> y 3.94 t ha<sup>-1</sup> para los semestres A y B respectivamente, versus 4.01 t ha<sup>-1</sup> y 3.75 t ha<sup>-1</sup> para los otros municipios. En la

Tabla 1 se detallan las áreas y rendimientos de los 5 municipios que registraron más áreas cosechadas y sembradas para el departamento de Córdoba serie 2006 B-2014 A (AGRONET, 2016).

Para la región de Sinú Medio, en promedio el semestre A se registró que el 92.4% del total de área sembrada fue cosechada, en comparación con los otros municipios productores de maíz tecnificado de Córdoba, que registraron un promedio de 90.3%; para el semestre B, fue calculado el mismo porcentaje, donde se reporta el 84.3% para la zona del Sinú Medio en comparación con los otros municipios que reportaron el 94.3% (EVA, 2006-2014).

Tabla 1: Áreas cosechadas municipios con mayores producciones del departamento de Córdoba serie 2006 B-2014 A

MUNICIPIO/ SEMESTRE	2006 B	2007 A	2007 B	2008 A	2008 B	2009 A	2009 B	2010 A	2010 B	2011 A	2011 B	2012 A	2012 B	2013 A	2013 B	2014 A
<b>CERETE</b>	200	6000	200	5500	200	4326		4423	1300	6450	1200	6000	1000	5500		6000
<b>CIENAGA DE ORO</b>	580	6000	250	4000	250	6200	200	6280	148	5750	125	5700	120	5800	150	6000
<b>CHIMA</b>	1395	1820	250	600	350	4670		4750		4150		2695		4100		2500
<b>COTORRA</b>	500	4200	750	4000	850	4150		4150		4150		3800		3700		3200
<b>SAN PELAYO</b>	120	5800	650	4000	650	4680	2080	3850	3200			3850	3200	3080	400	3000

Fuente: Evaluaciones Agropecuarias Municipales. 2006 B – 2014 A, AGRONET.

## 2.2 CULTIVO DE MAÍZ EN EL DEPARTAMENTO DE META

Las estadísticas oficiales, registran en promedio para la temporalidad 2006–2014, un total de 15.904 ha sembradas en el departamento de Meta, para otros departamentos se reporta solamente Casanare con tan solo 540 ha sembradas, esto indica que para la región de la Orinoquia, bajo este punto el único departamento con áreas significativas reportadas en estadísticas oficiales es el Meta. Se han identificado los 5 municipios con mayor área sembrada registrada para el departamento (2006-2014), correspondientes a: Granada, Puerto Gaitán, Puerto López, Villavicencio y Vista Hermosa, en promedio, entre el semestre B de 2006 y el semestre A de 2014 estos 5 municipios aportaron el 66.3% del total del áreas departamental para el semestre A, y el 70.1% para el semestre B del total departamental de áreas cosechadas y sembradas de maíz tecnificado; adicionalmente cuentan con los mayores rendimientos comparativamente con los demás municipios, registrando para el semestre A un promedio de 5.2 t ha<sup>-1</sup> y 4.7 t ha<sup>-1</sup> para el semestre B, versus, 4.6 y 4.4 t ha<sup>-1</sup> para los semestres A y B de los otros municipios respectivamente (EVA, 2006-2014). En la Tabla 2 se detallan las áreas cosechadas de los 5 municipios con mayores producciones del departamento del Meta en maíz tecnificado.

A diferencia de los municipios del departamento de Córdoba, las Evaluaciones Municipales Agropecuarias (2006 B – 2014 A) registran que el 100% de las áreas sembradas fueron cosechadas, tanto para el semestre A como para el B, en los 5 municipios con las mayores áreas registradas, para los otros municipios, el semestre A registra que el 96.2% de las tierras cultivadas fueron cosechadas y el semestre B el 100% (EVA, 2006-2014).

Tabla 2: Áreas cosechadas municipios con mayores producciones del departamento del Meta en maíz tecnificado.

MUNICIPIO/ SEMESTRE	2006 B	2007 A	2007 B	2008 A	2008 B	2009 A	2009 B	2010 A	2010 B	2011 A	2011 B	2012 A	2012 B	2013 A	2013 B	2014 A
GRANADA	520	1240	610	1325	1058	1181	924	461	353	420	430	2295		2029	2295	2295
PUERTO GAITAN		67	1030	270	150	1000	2700	379	1300	1000	2100	1129	3200	3248	3500	
PUERTO LÓPEZ		2690	1150	2095	1385	2401	750	2174	2400	2496	3200	2178	3545	1244	3380	2600
VILLAVICEN CIO	48	646	40	120	40	63	40		15			2160	1560	1800	1560	2200
VISTA HERMOSA	120	282	150	2200	865	865	500	450	500	300	450	940		320	990	1000

Fuente: Evaluaciones Agropecuarias Municipales. 2006 B – 2014 A.

### 2.3 VARIABLES PARA LA CUANTIFICACION DEL RIESGO

Entendiendo el riesgo como una función dependiente de la exposición y la vulnerabilidad, se pretende incorporar a la ecuación de riesgo para este estudio un análisis de la amenaza, que será cuantificada con el análisis multifactorial de la relación directa clima (eventos extremos como sequía, excesos hídricos, temperaturas mínimas, temperaturas máximas), suelo (características físicas de los suelos de las regiones establecidas) y cultivo (anomalías de rendimientos), de este modo se obtiene la primera componente de la ecuación. Por otro lado, como se observa en la ecuación número 2, la variable de vulnerabilidad, se obtiene de la relación de sensibilidad con la capacidad adaptativa, en este sentido, se pretenden evaluar componentes extrínsecas e intrínsecas que afectan negativamente el cultivo del maíz, para este estudio se emplearon las siguientes variables; para sensibilidad: Índice de presión hídrica al ecosistema, porcentaje de área asegurada respecto al total de área sembrada e índice de aridez; por otro lado las variables tenidas en cuenta para la capacidad adaptativa correspondieron a la asistencia técnica prestada para cada unidad de producción agrícola UPA (Valor tomado del año 2015), porcentaje de UPA con maquinaria agrícola (Valor tomado del año 2015) e índice de eficiencia en el uso del agua.

### 2.4 FUNCIÓN DE MÉRITO, ALGORITMO PARA DETERMINAR EL MUNICIPIO OBJETO DE ESTUDIO PARA EL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA Y META

Para la correcta elección del área de estudio, a continuación, se presenta el árbol de toma de decisiones diseñado en la presente investigación, para determinar espacialmente cual es el municipio de cada uno de los departamentos, que tiene áreas sembradas de maíz tecnificado, estadísticas de cultivo (áreas sembradas, cosechas, producción y rendimientos), información climática e información edáfica. Empleado la metodología de funciones del mérito que surgen para determinar en un algoritmo que resuelve un problema de optimización, si el siguiente iterando es el mejor o peor que la iteración anterior en el sentido de acercarse más a la solución, en el caso de ecuaciones no lineales. En optimización no lineal con restricciones se busca balancear entre violar las restricciones y acercarse más a la solución. La función del mérito es una función de  $x$  donde se obtiene un escalar que determina cuál es la mejor iteración (Leonenko, 2013).

Bajo esta metodología, se pondero la información disponible de variables climáticas, de cultivo y de suelo en cada departamento, de la siguiente manera.

#### 2.4.1 Componente Clima:

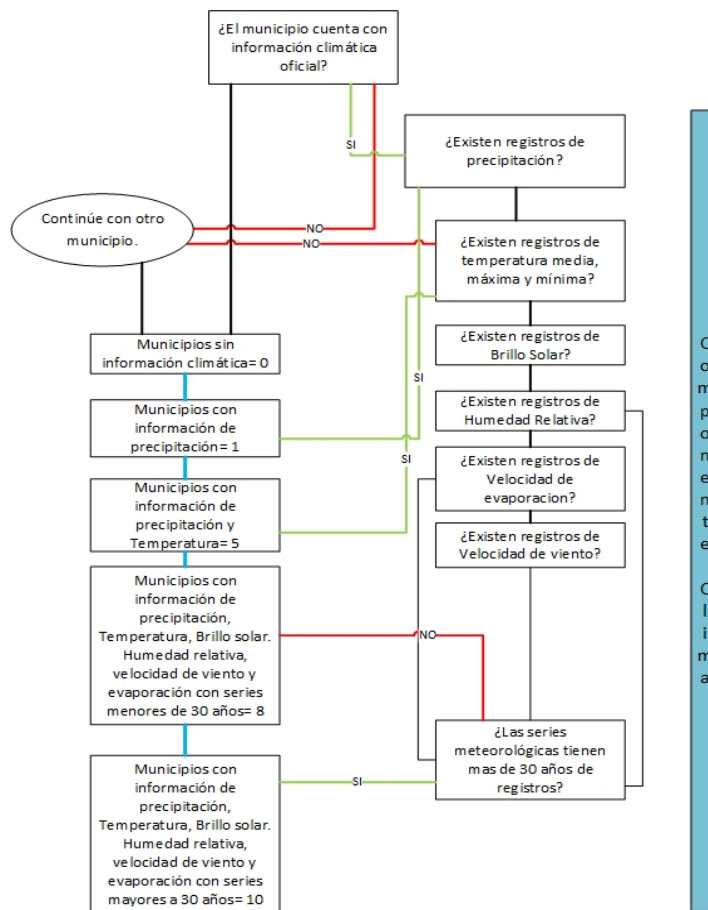
Se le asignó el peso más importante dentro del modelo, correspondiente al 45%, esto debido principalmente a que la presente investigación es de riesgos meteorológicos y climáticos y esta variable es la que va a definir en si la incidencia (positiva o negativa) en el cultivo del maíz. Para ello, se contó con la información de la red de estaciones del IDEAM, donde se consultó el inventario de estaciones meteorológicas que actualmente estuvieran activas y con mínimo 30 años de información, para cada uno de los 28 municipios del departamento de Córdoba y 29 municipios del departamento del Meta relacionados en el Anexo 1 y Anexo 2

En este sentido, fueron asignados los siguientes valores:

- 0 = Municipios que no reportan estaciones meteorológicas
- 1 = Municipios con instrumentos de medición solamente para la variable de precipitación (estaciones Pluviométricas y Pluviográficas)
- 5 = Municipios con instrumentos de medición para las variables meteorológicas de precipitación y temperaturas (Media, Máxima y Mínima) (estaciones Pluviométricas, Pluviográficas y Climatológicas Ordinarias)
- 10 = Municipios con instrumentos de medición para las variables meteorológicas de precipitación, temperaturas (Media, Máxima y Mínima), Brillo Solar, Evaporación, Velocidad del Viento y Humedad Relativa (estaciones Pluviométricas, Pluviográficas, Climatológicas Ordinarias, Climatológicas Principales, Agrometeorológicas y Sinópticas Secundarias)

En la ilustración 2, se puede apreciar el algoritmo desarrollado para la cuantificación de la información climática para cada uno de los 28 municipios del departamento de Córdoba y 29 para el departamento del Meta, lo cual permite determinar el (los) municipio (s) con la mejor información meteorológica disponible.

*Ilustración 2: Algoritmo para la cuantificación de la componente clima en el modelo de toma de decisiones.*



Fuente: elaboración propia

#### 2.4.2 Componente Cultivo:

Esta componente contó con criterios disponibles en las Evaluaciones Municipales Agropecuarias, para la serie 2006 B – 2014 A; asignándole un valor dentro del modelo del 35% siendo el segundo más importante después del de clima, debido a que se pretende seleccionar un municipio con importantes áreas sembradas de maíz que representen y aporten a los departamentos de Córdoba y Meta información relevante, en este sentido, se tuvieron en cuenta los municipios que registraban en las estadísticas nacionales áreas de maíz tecnificado cosechadas y sembradas, la participación de cada uno dentro del total departamental y la longitud de la serie (2006 B – 2014 A) para ser comparada con los datos modelados.

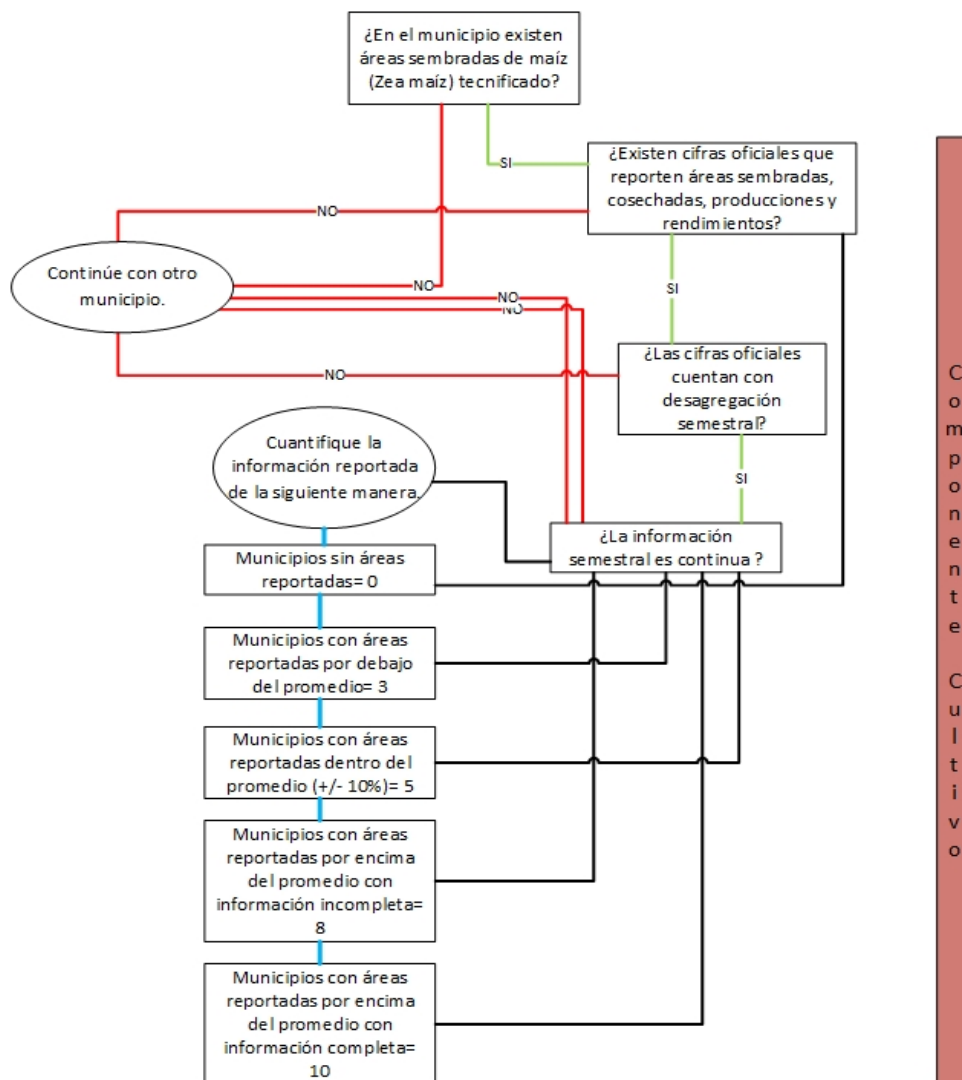
Para este módulo fueron asignados los siguientes valores:

- 0 = Municipios que no reportan áreas de Maíz tecnificado sembrado.
- 1 = Municipios con áreas sembradas por debajo del promedio departamental, con estadísticas del semestre A y semestre B.
- 5 = Municipios con áreas sembradas dentro del promedio departamental +/- 10%, con estadísticas del semestre A y semestre B.
- 8 = Municipios con áreas sembradas superiores al promedio departamental con series no completas, con estadísticas del semestre A y semestre B.

- 10 = Municipios con áreas sembradas superiores al promedio departamental con series completas.

Al igual que la componente climática, el de cultivo fue diseñado un algoritmo de toma de decisiones que permite cuantificar el componente de cultivo a partir de información oficial de áreas y producción, en este sentido, como se muestra en la Ilustración 3

Ilustración 3: Algoritmo para la cuantificación de la componente cultivo en el modelo de toma de decisiones



Fuente: elaboración propia

### 2.4.3 Componente Suelo:

Componente contemplada con un valor dentro del modelo de toma de decisiones de 20%, debido a que si bien, es una componente importante en la modelación de cultivos, para esta investigación no es la componente principal. Para la ponderación se tuvo en cuenta los análisis de suelos disponibles e información descrita y entregada por el Instituto Geográfico



Agustín Codazzi-IGAC. Para fines pertinentes, se contó con 2 estudios edafológicos, uno para cada departamento y se asignaron los siguientes valores para el modelo:

- 1 = Estudio del IGAC
- 2 = Análisis edafológico local

#### **2.4.4 Municipios seleccionados:**

Una vez empleado los algoritmos en los 57 municipios de los departamentos de Córdoba y Meta, se presentan a continuación los 2 municipios seleccionados y que serán objeto de estudio en la presente investigación. En el Anexo 3 y Anexo 4 se presentan la ponderación de cada municipio contemplando el componente climático, cultivo y suelo.

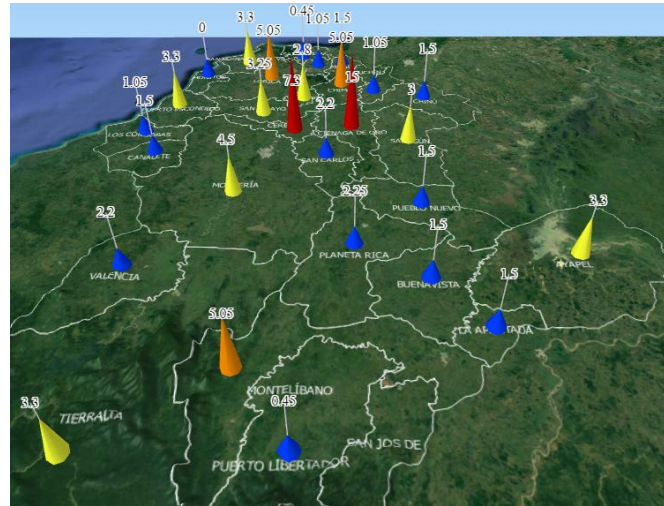
##### **2.4.4.1 Ciénaga de Oro, Córdoba**

Bajo estadísticas oficiales del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural-MADR, el municipio de Ciénaga de Oro, para la temporalidad del segundo semestre del 2006 y primer semestre de 2014, reportó el mayor número de hectáreas sembradas en promedio para el semestre A, con un total de 5.716, para el semestre B en promedio se reportaron 228 hectáreas, siendo el que menos maíz siembra dentro de los 5 municipios más productores del departamento.

Para la componente climática, Ciénaga de Oro cuenta con tres estaciones pluviométricas y una estación Climatológica Ordinaria (El Salado), con registros meteorológicos desde el año 1964 para las variables de Precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y humedad relativa. La componente de cultivo, reporta datos de áreas sembradas, cosechadas, producción y rendimientos para todos los 16 semestres comprendidos entre 2006 B y 2014 A, adicionalmente es el municipio que registra la mayor área de maíz tecnificado sembrado. Bajo la metodología de función de mérito, el municipio obtuvo el mayor índice con un total de 15.4 puntos.

En la Ilustración 4 se presenta el mapa de relieve con los municipios que componen el departamento de Córdoba y la cuantificación de los tres componentes bajo la metodología de función de mérito, donde los municipios con conos azules representaron las funciones de mérito más bajas, seguidos de los colores amarillo naranja y rojo respectivamente, siendo los colores rojos los municipios con los mejores índices de función de mérito y los posibles seleccionados para el área de estudio.

*Ilustración 4: Función de mérito para los municipios del departamento de Córdoba en las componentes de clima, cultivo y suelo.*



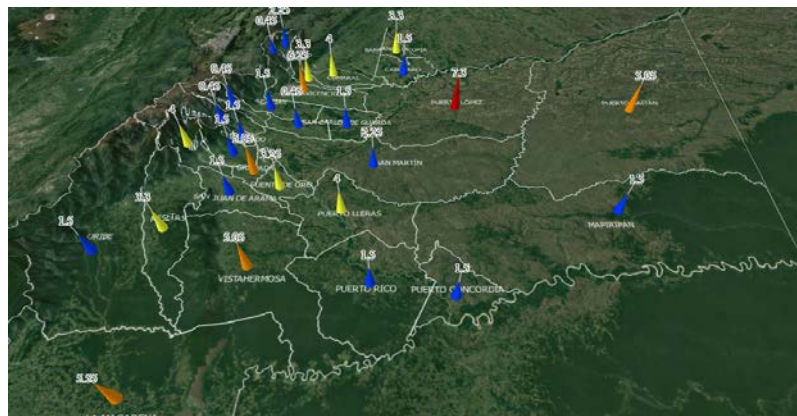
Fuente: Elaboración propia

#### 2.4.4.2 Puerto López, Meta

Las estadísticas oficiales, establecen que los municipios de Granada, Puerto Gaitán, Puerto López, Villavicencio y Vista Hermosa, son los que más áreas sembradas de maíz tecnificado reportan, siendo Puerto López el municipio que cuenta con la mayor área sembrada para el semestre A y el semestre B, adicionalmente la información publicada en las estadísticas nacionales, aportan una serie completa desde el primer semestre del año 2007 hasta el primer semestre del año 2014, serie temporal que permitirá comparar los rendimientos modelados con los rendimientos reales. La componente climática, cuenta con una estación Climatológica ordinaria (3512501-Hacienda las Margaritas) con información disponible desde el año 1975 de las variables de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, brillo solar y humedad relativa.

Bajo la metodología de función de mérito, se reportó un índice de 7.7, lo que permitió la selección del municipio.

Ilustración 5. Función de mérito para los municipios del departamento del Meta en las componentes de clima, cultivo y suelo.



Fuente: Elaboración propia

## 2.5 INFORMACIÓN CLIMÁTICA

La información climática es el conjunto de observaciones y registros de las variables del clima observadas en una región y tiempo específicos medidos con instrumentos particulares bajo un conjunto de procedimientos estándar. En Colombia, el IDEAM cuenta con un sistema de observación, medición y vigilancia, el cual se ocupa de la generación y el acopio permanente de la información, mediante la operación de la red de estaciones meteorológicas.

La estación meteorológica es el sitio donde se hacen observaciones, mediciones puntuales y registros de diferentes parámetros asociados a variables climáticas. La red meteorológica es el conjunto de estas estaciones, convenientemente distribuidas en una región para facilitar la determinación del estado del tiempo y el clima. Esta red cuenta con distintas categorías de estaciones, definidas por su capacidad de medir diferentes parámetros en periodos de tiempo variables, entre las cuales se encuentran las estaciones pluviométricas (PM), pluviográficas (PG), climatológicas principales (CP) y climatológicas ordinarias (CO).

Las estaciones pluviométricas están dotadas de un pluviómetro que permite medir la cantidad de lluvia caída entre dos observaciones consecutivas mientras que las estaciones pluviográficas registra en forma mecánica y continua la precipitación, en una gráfica que permite conocer la cantidad, duración, intensidad y periodo en que ha ocurrido la lluvia. Por su parte las estaciones climatológicas principales son aquellas en las cuales se hacen observaciones de variedad de parámetros climáticos, incluida la precipitación, por parte de instrumentos registradores, mientras que las estaciones climatológicas ordinarias están dotadas de instrumentos que permiten medir lluvias y temperaturas extremas e instantáneas.

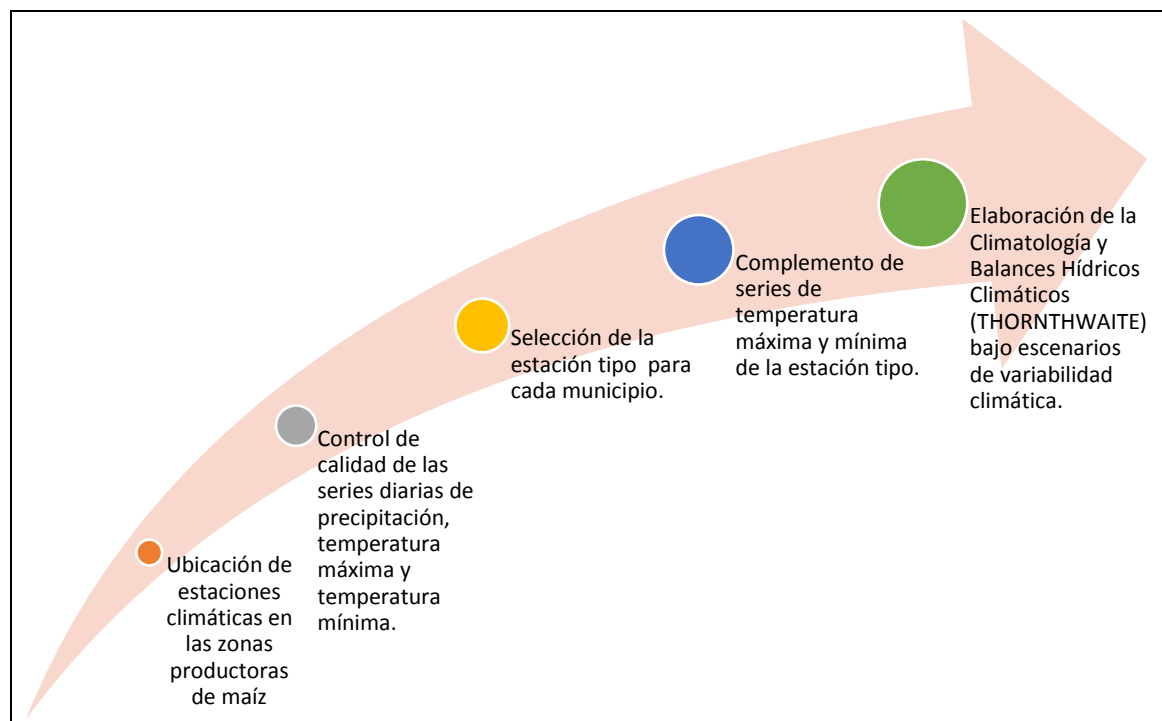
Los principales criterios utilizados por el IDEAM para la localización de las estaciones en la red meteorológica a nivel nacional son: i) representar los procesos ambientales de las subzonas climatológicas, ii) cubrir las zonas de mayor importancia socioeconómica, iii) superar la insuficiencia en cobertura de estaciones en determinadas áreas, iv) conocer el comportamiento climático de los diferentes ecosistemas del país, v) ampliar la cobertura a zonas de interés nacional sin información meteorológica y vi) representar los procesos ambientales de los principales conglomerados urbanos.

Es importante resaltar que las series de tiempo de datos climáticos pueden presentar heterogeneidades que pueden estar vinculadas tanto a la variabilidad climática regional en diferentes escalas de tiempo, como a factores no climáticos, como pueden ser: i) cambios en la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas, ii) cambios en los instrumentos de medición, iii) errores de medición y observación y iv) deterioro de los instrumentos de medición por cumplir su vida útil, entre otros.

Debido a que los cambios vinculados a factores no climáticos suelen tener la misma magnitud que los debidos a fenómenos, tendencias o ciclos relacionados con el clima, un análisis directo de las series puede llevar a conclusiones erróneas sobre las condiciones atmosféricas

en la región. En este contexto el control de calidad de las series de tiempo está asociada con la aplicación de criterios que permitan diferenciar los cambios generados por la señal del clima de los causados por otros factores. La información climática se analizará en la presente investigación según lo mostrado en la siguiente ilustración:

Ilustración 6: Esquema de Tratamiento de la Información a Utilizar.



Fuente: Elaboración propia

Se identificaron y ubicaron las estaciones meteorológicas del IDEAM con información climática disponible en dos áreas de estudio en los municipios de Ciénaga de Oro (Córdoba) y Puerto López (Meta), en los cuáles existe producción de maíz. Para cada zona se seleccionaron todas las estaciones ubicadas alrededor del perímetro municipal con un área de influencia de treinta (30) km, lo cual permitió obtener un número mayor de puntos con información.

Como resultado de esta actividad se encontraron cuarenta y dos (42) estaciones meteorológicas ubicadas en el área de influencia del municipio de Ciénaga de Oro (Córdoba) y veintidós (22) estaciones meteorológicas localizadas en la zona alrededor del municipio de Puerto López (Meta). El listado de estaciones ubicadas en cada área puede verse a continuación:

Tabla 3: Listado de Estaciones Meteorológicas con Información a Utilizar.

ÁREA DE ESTUDIO	CÓDIGO	NOMBRE	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	ALTITUD
Córdoba	12040010	Jaramagal	Puerto Escondido	Córdoba	90

*“EVALUACIÓN DEL RIESGO AGROCLIMÁTICO EN EL CULTIVO DE MAÍZ (ZEA MAYS) EN LOS DEPARTAMENTOS DE CÓRDOBA Y META”*

ÁREA DE ESTUDIO	CÓDIGO	NOMBRE	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	ALTITUD
Córdoba	12040020	Canalete	Canalete	Córdoba	40
Córdoba	12045020	Cristo Rey	Puerto Escondido	Córdoba	15
Córdoba	13050010	Santa Lucia	Montería	Córdoba	120
Córdoba	13050020	Hacienda Santa Cruz	Montería	Córdoba	220
Córdoba	13055030	Galán	Montería	Córdoba	30
Córdoba	13060010	San Anterito	Montería	Córdoba	75
Córdoba	13070020	Momil	Momil	Córdoba	20
Córdoba	13070030	Sabana Nueva	San Pelayo	Córdoba	20
Córdoba	13070040	Rabolargo	Cereté	Córdoba	19
Córdoba	13070050	Cereté	Cereté	Córdoba	20
Córdoba	13070060	Ciénaga de Oro	Ciénaga de Oro	Córdoba	25
Córdoba	13070070	Boca de la Ceiba	Montería	Córdoba	20
Córdoba	13070080	El Siglo	Ciénaga de Oro	Córdoba	40
Córdoba	13070090	San Carlos	San Carlos	Córdoba	60
Córdoba	13070100	Santa Rosa	San Carlos	Córdoba	140
Córdoba	13070110	Carrizal	San Carlos	Córdoba	40
Córdoba	13070120	Callemar	San Carlos	Córdoba	95
Córdoba	13070130	California	Montería	Córdoba	13
Córdoba	13070140	Coroza 1	Cereté	Córdoba	9
Córdoba	13070150	Mocari	Montería	Córdoba	14
Córdoba	13070160	Berástegui	Ciénaga de Oro	Córdoba	20
Córdoba	13070170	Buenos Aires	San Carlos	Córdoba	9
Córdoba	13070180	Carrillo	San Pelayo	Córdoba	20
Córdoba	13070190	Coroza 2	San Carlos	Córdoba	9
Córdoba	13070200	Corocito	San Pelayo	Córdoba	20
Córdoba	13070210	Cotorra	Cotorra	Córdoba	20
Córdoba	13070220	Flor del Sinú	Montería	Córdoba	13
Córdoba	13070230	Horizonte	Montería	Córdoba	10
Córdoba	13070260	Lamas	Montería	Córdoba	18
Córdoba	13070270	Montería	Montería	Córdoba	17
Córdoba	13070280	Sabanal	Montería	Córdoba	10
Córdoba	13070290	Tampa	Montería	Córdoba	20
Córdoba	13070340	Palma de Vino	Montería	Córdoba	20
Córdoba	13075010	Chima	Chima	Córdoba	20
Córdoba	13075020	El Salado	Ciénaga de Oro	Córdoba	40
Córdoba	13075030	Turipaná	Cereté	Córdoba	20
Córdoba	13075050	Universidad de Córdoba	Montería	Córdoba	15
Córdoba	13080010	San Antonio	San Pelayo	Córdoba	50
Córdoba	13085040	Aeropuerto Los Garzones	Montería	Córdoba	20
Córdoba	25021210	Trementino	Sahagún	Córdoba	150

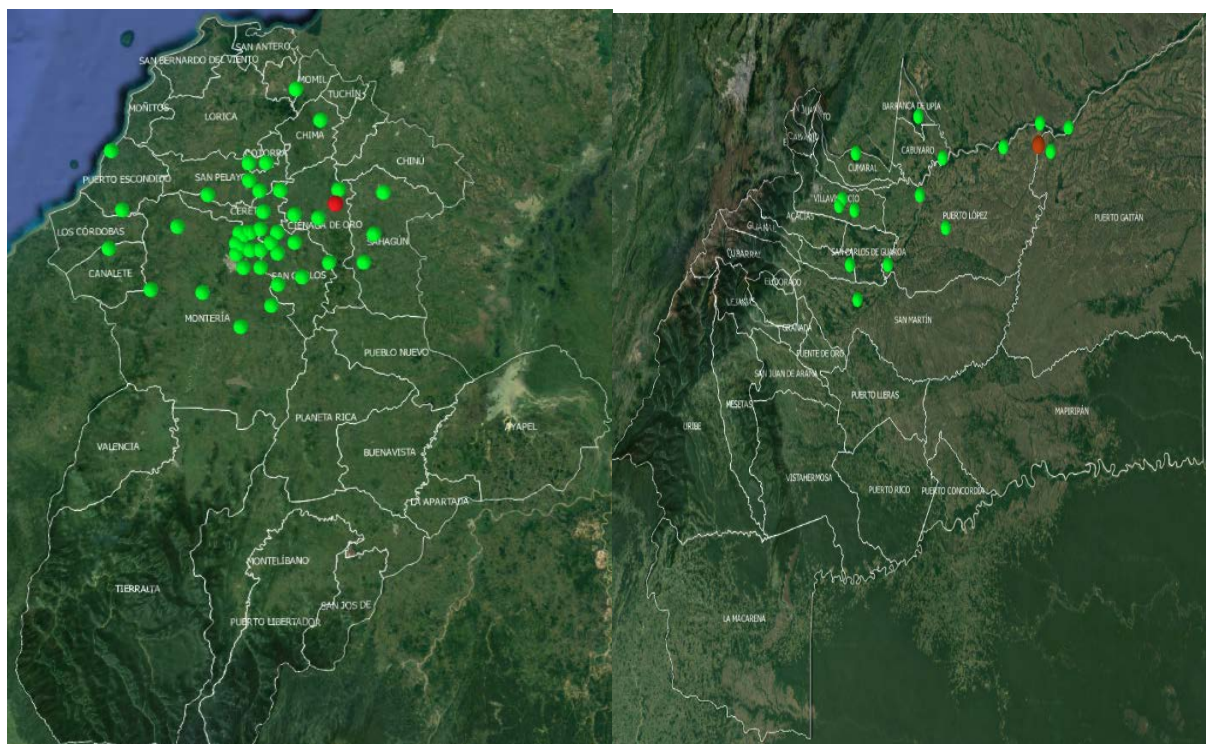
ÁREA DE ESTUDIO	CÓDIGO	NOMBRE	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	ALTITUD
Córdoba	25025170	Colomboy	Sahagún	Córdoba	125
Meta	32120010	San Ignacio	Mapiripan	Meta	168
Meta	35010010	Puerto López	Puerto López	Meta	182
Meta	35010060	El Toro	Castilla La Nueva	Meta	230
Meta	35010080	Nare	Puerto López	Meta	200
Meta	35010150	Yaguarito	San Carlos de Guaroa	Meta	275
Meta	35010230	Bajo Nare	Puerto López	Meta	183
Meta	35015030	San Carlos Guaroa	San Carlos de Guaroa	Meta	230
Meta	35015050	Barbascal	San Martín	Meta	250
Meta	35020060	Pompeya	Villavicencio	Meta	260
Meta	35020070	Los Salados	Puerto López	Meta	182
Meta	35025020	La Libertad	Villavicencio	Meta	336
Meta	35030050	Ojo de Agua	Villavicencio	Meta	300
Meta	35045020	Hacienda La Cabaña	Cumaral	Meta	305
Meta	35055010	El Japón	Paratebueno	Cundinamarca	280
Meta	35100020	Cabuyaro	Cabuyaro	Meta	180
Meta	35105050	Guaicaramo	Barranca de Upía	Meta	190
Meta	35120010	Puerto Gaitán	Puerto Gaitán	Meta	150
Meta	35125010	Hacienda Las Margaritas	Puerto López	Meta	150
Meta	35130010	La Plata	Puerto López	Meta	225
Meta	35180030	Fundo Nuevo Humapo	Puerto López	Meta	155
Meta	35180040	La Poyata	Maní	Casanare	147
Meta	35180050	Puerto Texas	Maní	Casanare	142

Fuente: Catalogo de estaciones del IDEAM.

Se observó que el 81,0% de las estaciones encontradas en el área de estudio del municipio de Córdoba (correspondiente a 34 estaciones) son de categoría Pluviométrica (PM) y Pluviográfica (PG), es decir que tienen equipos que permiten medir el volumen de lluvia por unidad de área caída en un sitio específico, mientras que el restante 19,0% (8 estaciones) corresponden a estaciones de categoría Climatológica Principal (CP) provista para realizar observaciones del tiempo atmosférico actual, cantidad, visibilidad, precipitaciones, temperatura del aire, humedad, viento, radiación solar, evaporación, Climatológica Ordinaria (CO) provista obligatoriamente de psicrómetro, de un pluviómetro y un pluviógrafo, Agrometeorológica (AM) con mediciones y observaciones meteorológicas y biológicas, incluyendo fenológicas y otro tipo de observaciones que puedan ayudar a la determinación de las relaciones entre el tiempo y el clima, por una parte y la vida de las plantas y los animales, por la otra. Incluye el mismo programa de observaciones de la estación climatológica principal, más registros de temperatura a varias profundidades (hasta un metro) y en la capa

cercana al suelo (0, 10 y 20 cm sobre el suelo). y Sinóptica Secundaria (SS) con visibilidad, fenómenos especiales, tiempo atmosférico, nubosidad, estado del suelo, precipitaciones, temperatura y humedad del aire, viento. en donde puede registrarse observaciones meteorológicas de varios parámetros climáticos como temperatura, humedad relativa y brillo solar. Para la zona de influencia del municipio de Puerto López (Meta) la proporción es la siguiente: 68,2% de estaciones de categoría Pluviométrica y Pluviográfica (correspondiente a 15 estaciones) y 31,8% (7 estaciones) de categoría climatológica, especial o sinóptica.

Ilustración 7. Estaciones Meteorológicas en cada Área de Estudio.



Mapa Izquierda: Departamento de Córdoba (puntos verdes, estaciones contempladas; punto rojo, estación seleccionada).

Mapa Derecha: Departamento de Meta, (puntos verdes, estaciones contempladas; punto rojo, estación seleccionada).

Fuente: Elaboración propia

También, se identificaron los parámetros climáticos registrados en las estaciones seleccionadas. Se consideraron las series de tiempo a nivel diario de los parámetros de precipitación total (mm), temperatura máxima y mínima (Celsius), humedad relativa (porcentaje) y brillo solar (horas) en el periodo 1981 – 2014. Además se consideran las series mensuales de número de días con lluvia teniendo en cuenta los registros superiores a 0,1 mm. Se encontraron setenta y seis (76) series de tiempo de información climática para el área de estudio del municipio de Córdoba, de las cuales el 44,7% corresponden a series de parámetros diferentes a la precipitación, mientras que para la zona influenciada por el municipio de Puerto López (Meta) el 61,4% de las cincuenta y siete (57) series de tiempo tienen esta característica.

Es importante señalar que el número total de series de tiempo es mayor al número de estaciones meteorológicas, ya que algunas estaciones pueden registrar información de varias series de tiempo para diferentes parámetros climáticos. El inventario total es de ciento treinta y tres (133) series de tiempo (64 de precipitación total y 54 de otros parámetros) registradas en sesenta y cuatro (64) estaciones meteorológicas en ambas áreas de estudio. La información mencionada anteriormente se incorporó y organizó en una base de datos crudos disponibles para el análisis estadístico, elaboración de climatologías y balances hídricos climáticos bajo escenarios de variabilidad climática. Como resultado de esta actividad se cuenta con hojas de cálculo en formato digital por cada parámetro climático para cada área de estudio.

Tabla 4: Inventario de Series de Tiempo por Parámetro.

PARÁMETRO (DIARIO)	UNIDAD	CIENAGA DE ORO	PUERTO LÓPEZ	TOTAL
Precipitación Total	mm	42	22	64
Temperatura Máxima	° C	8	7	15
Temperatura Mínima	° C	8	7	15
Humedad Relativa	%	8	7	15
Brillo Solar	h	2	7	9
<b>TOTAL</b>		<b>76</b>	<b>57</b>	<b>133</b>

### 2.5.2 Control de calidad de la información climática

Con base en estadísticas relativas a la longitud, continuidad y confiabilidad de las series de tiempo se realizó el diagnóstico inicial de las ciento treinta y tres (133) series de tiempo (64 de precipitación total y 54 de otros parámetros) consideradas en ambas áreas de estudio. En este diagnóstico se evaluó la longitud en años y el porcentaje de datos faltantes de las series de tiempo teniendo en cuenta el periodo 1981 – 2014. Para estos efectos se estableció un porcentaje de registros faltantes máximo del 15%, de acuerdo a las recomendaciones dadas por la Organización Meteorológica Mundial (WMO). De esta forma se rechazaron las series que no cumplían con el criterio de calidad adoptado y se aceptaron solo las series de comprobada confiabilidad.

### 2.5.3 Selección de series de tiempo tipo para cada área de estudio

Para cada área de estudio se seleccionó una estación meteorológica tipo con información de los siguientes parámetros a considerar: precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. Para el área de estudio del municipio de Córdoba se seleccionó la estación El Salado (código 13075020) ubicada en el municipio de Ciénaga de Oro en el Departamento de Córdoba a 40 msnm, mientras que para la zona alrededor del municipio de Puerto López (Meta) se seleccionó la estación Hacienda Las Margaritas (código 35125010) ubicada en el municipio de Puerto López en el Departamento de Meta a 150 msnm.



#### 2.5.4 Complemento de series de tiempo tipo en cada área de estudio

Las series tiempo de datos climáticos presentan, por lo general, datos faltantes, debido principalmente a problemas técnicos u operativos ocurridos durante la observación y medición de un parámetro climático en las estaciones meteorológicas, dando lugar a registros dudosos o incompletos. Con el objetivo de mejorar la calidad de la información del clima, de forma que esta sea útil para el análisis a realizar en cada área de estudio se eliminaron estas ausencias de registros. Se realizó el complemento de diez (10) series de tiempo de registros meteorológicos correspondientes a las series de precipitación, temperatura máxima y mínima, humedad relativa y brillo solar en cada una de las áreas de estudio.

La estimación de registros faltantes en las series de datos climáticos se realizó mediante la aplicación de modelos vector autorregresivos (VAR) (Cordano, 2012), que permiten caracterizar y reproducir la variabilidad temporal de una serie con el fin de predecir los valores que toma en un momento determinado, teniendo en cuenta el comportamiento histórico de diferentes parámetros en varias estaciones. Para esto se utilizó el paquete RMAWGEN de R, cuya utilidad está restringida de porcentajes bajos de datos faltantes en varias estaciones que se encuentren relacionadas y que no presenten mucha variabilidad.

Para este módulo se utilizaron datos de varias estaciones en el periodo 1986 – 2014 para las variables temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, ya que interactúan entre sí para completar los datos faltantes. Los modelos VAR se aplicaron teniendo en cuenta su capacidad para mantener la correlación espacial y temporal entre las variables. Un conjunto de  $K$  variables puede ser descrito por un modelo VAR ( $K, p$ ) de la siguiente forma:

*Ecuación 4: Modelo VAR*

$$x_t = A_1 \cdot x_{t-1} + A_2 \cdot x_{t-2} + \dots + A_p \cdot x_{t-p} + C \cdot d_t + u_t \quad \text{Ecuación [4]}$$

Donde  $x_t$  es un vector de  $K$  dimensiones que representa el conjunto de variables meteorológicas generadas en el día  $t$  y por el modelo, llamadas variables endógenas,  $d_t$  es un conjunto de procesos conocidos de  $K$  dimensiones, cuyos componentes son conocidos como variables exógenas,  $A_i$  es una matriz de coeficientes de  $K \times K$  dimensiones para todos los  $i = 1, 2, \dots, p$ ,  $C$  es un matriz de coeficientes para la variable exógena y  $u_t$  es el residuo del modelo.

Para procesos estocásticos de  $K$  dimensiones, como los del problema estudiado en la presente investigación,  $x_t$  y  $u_t$  usualmente se normalizan con el propósito de tener una media nula (igual a cero). De esta forma  $u_t$  es un ruido blanco estandarizado, es decir, un proceso aleatorio continuo con media igual a cero y valores independientes (no correlacionados) para cada  $t$ . Los modelos VAR funcionan correctamente si la variable  $x_t$  está normalmente distribuida. Esto requiere un procedimiento de normalización de la variable meteorológica que se puede resumir como:

*Ecuación 5: Variables modelo VAR*

$$x_t = G_m(z_t)$$

Ecuación [5]

$$z_t = G_m^{-1}(x_t)$$

En donde  $Z_t$  es la serie de tiempo de la variable meteorológica y  $G_m$  es una función definida de forma que  $x_t$  está distribuida multi-normalmente y puede variar con el tiempo. Para el caso univariado, la normalización se realiza utilizando la estimación de cuantiles (Dada una variable aleatoria  $X$  y  $0 < p < 1$ , se define el cómo cuantil de orden  $p$ ), mientras que para el caso multivariado se lleva a cabo mediante un método iterativo basado en el análisis de componentes principales descrito en el capítulo 1.7 del documento. El resultado tiende a estar normalmente distribuido con una reducción de la divergencia Kullback-Leiber en cada iteración. Para la creación de modelos VAR en la presente investigación se utilizó el procedimiento de normalización univariada para cada mes.

Previo al complemento de las series se realizó el análisis estadístico descriptivo, control de calidad y análisis de homogeneidad de las series de tiempo con la ayuda del paquete estadístico RCLimTool desarrollado por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y el MADR (Llanos, 2014). Se llevó a cabo también el cálculo de los valores medios, máximos y mínimos mensuales a nivel multianual para la totalidad de las series completadas. También se encontraron otras medidas de variabilidad para las series. Cabe resaltar que estos datos se calculan con base en el periodo comprendido entre 1981 y 2010, es decir, la última normal climática teniendo en cuenta las consideraciones de la Organización Meteorológica Mundial (WMO).

## 2.6 CARACTERÍSTICAS DE SUELOS DE CÓRDOBA Y META.

El suelo comprendido como un medio dinámico y progresivo a través del tiempo, comprende diferentes factores de formación como el clima, material parental, relieve, organismos, y tiempo. La relación del suelo y estos factores, constituye un criterio teórico para la formación y delimitación de las unidades cartográficas y la definición de las categorías del sistema de clasificación taxonómica. Estos factores afectan los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. Dichos factores, su dinámica con el suelo y los procesos, es de vital importancia reconocerlos, ya que esta información facilita la predicción del comportamiento futuro del recurso para tomar las medidas adecuadas para su uso y manejo. (IGAC, 2009).

### 2.6.1 Suelos Ciénaga de oro, Córdoba:

El departamento de Córdoba está situado a orillas del Mar Caribe, con una extensión de 23.980 km<sup>2</sup>. El territorio de Córdoba tiene la doble influencia de la llanura del Caribe y de las últimas estribaciones de la cordillera de los Andes

Sus suelos son fértiles por lo general son profundos, de buena textura, contienen porcentajes aceptables de los minerales más importantes para el crecimiento de las plantas y para

mantener la fertilidad si se cultiva de forma adecuada. Los mejores suelos, que abarca la mayor parte del valle, son los llamados aluviones recientes. Las características de su drenaje varían desde muy buenas a deficientes en algunas áreas.

En los terrenos bajos, sometidos a inundaciones prolongadas, los suelos contienen más arcillas y por consiguiente su porosidad es inferior a la que presentan los terrenos más elevados con mejores desagües naturales. Las limitaciones más importantes para la producción están asociadas a los planos de inundación y las zonas montañosas de extremo pendiente. Las 2'502.060 hectáreas que tiene Córdoba por uso del suelo se distribuyen así: 209.400 ha (8.36%) son agrícolas, 1.580.600 ha (63.17%) pecuarias, 600.000 ha (23.98%) forestales, 112.060 ha (4.47%) otros usos: ciénagas, humedales y ríos (Gobernación de Córdoba, 2016)

### 2.6.1.1 Perfiles de los suelos más representativos, Ciénaga de Oro:

Las terrazas son uno de los tipos de relieve más predominante en la región, dentro de estos el perfil cultural del suelo (PC 8), se caracteriza por ser moderadamente profundos, texturas medias y finas, susceptibilidad a encharcamientos, drenaje natural imperfecto a moderado, fertilidad moderada y alta, reacción fuertemente ácida o neutra en los primeros centímetros y ligeramente alcalina en profundidad. Son originados a partir de sedimentos mixtos con diferente textura en cada uno de los horizontes. El perfil muestra secuencia de horizontes A (14 y 18 cm), B (20 cm) y C; Las principales limitaciones para el uso de estos suelos son las fluctuaciones del nivel freático y el clima seco.

En la tabla 5 se presenta las características principales de los tipos de suelos más representativos para el municipio de Ciénaga de Oro, Córdoba, según estudios realizados por el laboratorio de física de suelos del CIAT, en el marco del convenio CIAT-MADR.

Tabla 5: Perfil de suelos Departamento de Córdoba

Profundidad (cm)	Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura	C.H.S. (cm/h)	Densidad aparente inicial g/cc	Densidad real g/cc	Porosidad total %	Humedad de campo %
0-29	7,1	44,2	48,7	Arcillo Limoso	4,88	1,6	2,7	39,0	17,1
29-100	12,5	50,3	37,2	Tranco Arcilloso Limoso	3,29	1,5	2,7	43,8	14,3
0-23	4,3	41,8	53,9	Arcillo Limoso	2,68	1,4	2,7	47,1	18,0
23-100	2,3	47,8	49,9	Arcillo Limoso	1,63	1,5	2,7	46,2	23,0

Fuente: Convenio CIAT-MADR.

Una vez obtenidos las propiedades físicas del suelo, se corrió el modelo Soil Water Characteristics, donde fueron calculadas las variables descritas en la tabla 6 esto con el fin de alimentar el módulo de suelo en las simulaciones del cultivo de maíz para la región de Córdoba.

Tabla 6: Variables de suelo calculadas.

PROFUNDIDAD	Saturación	Capacidad de campo	
		(mesa de tensión 75 cm)	1 Bar
cm.	%		
0-12	42	20	38
12-35	44	18	38
35-53	36	22	42
53-104	32	20	48
104-156	30	20	50

Fuente: Elaboración propia, estimados a partir de los datos de la tabla 6 usando modelo SWC.

## 2.6.2 Suelos Puerto López, Meta:

El municipio presenta cuatro geomorfologías definidas, donde el mayor porcentaje corresponde suelos de altillanura con un 59.3%, seguido de formas subordinadas a la red hidrográfica con el 23.4%, y en menor porcentaje los suelos de terrazas aluviales con el 9.1% y suelos de planicie aluvial activa de desborde con un 8.1%. Estas unidades de suelos son obtenidas a partir del mapa de suelos del IGAC en 1997, en escala 1:200.000 (CORMACARENA, 2006 - 2018)

### 2.6.2.1 Perfiles de los suelos más representativos Puerto López:

El estudio de suelos del departamento del Meta, consta de información de unidades cartográficas con la descripción de perfiles específicos y puntuales de suelo en diferentes puntos, para la caracterización de los suelos del municipio del Meta, se empleó la información descrita en el informe técnico del (IGAC, 2004), donde para el municipio se encontraba descrito el perfil laminar del suelo (PL-23) descrito en la tabla 7.

Tabla 7: Perfil PL – 23

PERFIL	PROFUNDIDAD	Granulometría		
		Arena %	Limo %	Arcilla %
PL-23	13-35	44	18	38
	35-53	36	22	42
	53-104	32	20	48
	104-156	30	20	50

Fuente: (Gobernación Meta - IGAC, 2004)

## 2.7 BALANCE HÍDRICO CLIMÁTICO DE THORNTHWAITE

Para la caracterización climática de la zona de estudio, se empleó la Metodología de Balance Hídrico Climático – BHC; se seleccionó este método puesto que, con datos meteorológicos como temperatura media mensual y precipitación media mensual, y datos de georreferenciación del lugar de estudio, se estiman las siguientes variables requerida para fines agrícolas: Evapotranspiración potencial mensual (mm), Déficit de humedad (mm),

Reserva de agua (mm), Utilización de la reserva (mm), Exceso de agua (mm), Falta de agua (mm) e Índice de humedad (adimensional), con la ventaja técnica que con información meteorológica (precipitación y temperatura) de variables se obtienen este tipo de índices.

### 2.7.1 Evapotranspiración potencial

El método de Thornthwaite se desarrolló, a partir de datos de precipitación y escorrentía para diversas cuencas de drenaje. El resultado es una relación empírica entre la evapotranspiración potencial - ETP y la temperatura del aire. Entre las diferencias más notorias del método de Thornthwaite se encuentra la suposición de que existe una alta correlación entre la temperatura y algunos de los otros parámetros pertinentes tales como radiación, humedad atmosférica y viento.

El método de Thornthwaite permite estimar la evapotranspiración, donde se relaciona la ETP, con factores climáticos como temperatura, precipitación, radiación solar incidente, velocidad del viento, entre otros. Además otras variables a tener en cuenta según el cultivo son las clases de suelo, agua disponible y rendimiento de las cosechas. Este método es considerado el más aplicado en hidrogeología para el cálculo de infiltración de lluvia útil (Universidad de Murcia, 1988). A continuación, se describe su forma de uso:

Se calcula el índice de calor mensual ( $i$ ) y el índice ( $I$ ) para el índice de calor anual respectivamente, a partir de las temperaturas medidas diarias del aire, para esto se usa la siguiente ecuación

*Ecuación 6: índice de calor mensual ( $i$ )*

$$i = (t/5)^{1,514} \quad I = \sum_{i=1}^{12} i \quad \text{Ecuación [6]}$$

Al obtener el índice de calor anual, como resultado de la suma de los doce valores de índice de calor mensual, y asumiendo meses teóricos de 30 días y de 12 horas diarias de sol, el método propone la siguiente fórmula:

*Ecuación 7: Evapotranspiración potencial mensual no corregida en mm/día*

$$ETP = 16(10 t/I)^a \quad \text{Ecuación [7]}$$

Dónde:

ETP = Evapotranspiración potencial mensual no corregida en mm/día

t = temperatura media mensual en C

I = índice de calor anual

a = Función completa de I donde,  $a=675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3 - 771 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 + 1792 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0.49239$

Los valores de la ETP obtenidos deben ser corregidos en función de la duración del mes y del número de horas de insolación teórica, variables en relación a la latitud en que se encuentra la estación meteorológica que ha suministrado los datos (Universidad de Murcia , 1988)

### 2.7.2 Método Thornthwaite Balance hídrico y clasificación climática

Este método se usó para el cálculo del Balance Hídrico Climático con datos medidos de estaciones climatológicas ordinarias, principales y sinópticas, con el objetivo principal de observar con los promedios mensuales multianuales como se comparte el agua en el suelo a lo largo del año.

*Ecuación 8: humedad almacenada del mes actual*

$$HA_i = HA_{i-1} + P_i - ETP_i \quad \text{Ecuación [8]}$$

Donde:

$HA_i$  = humedad almacenada del mes actual (mm);

$HA_{i-1}$  = humedad almacenada del mes anterior (mm);

$P_i$  = precipitación del mes actual (mm);

$ET_{0i}$  = evapotranspiración de referencia del mes actual (mm)

Existe déficit de humedad si  $HA_{i-1} + P_i - ET_{0i} < 0$ ; por otro lado, hay exceso hídrico si  $HA_{i-1} + P_i - ET_{0i} >$  la Capacidad de Almacenamiento (CA). Si el valor numérico obtenido del cálculo se encuentra entre cero y CA, ese valor corresponde a la humedad almacenada (HA) del período y es el que se considera para el cálculo en el período subsecuente (O Ruiz-Álvarez, 2012)

### Índice de humedad (I<sub>h</sub>)

El índice de humedad relaciona los excesos y déficits con la demanda evapotranspirativa del medio, lo que proporciona una clara descripción del clima. La ecuación que describe esta relación es:

*Ecuación 9: Índice de humedad (I<sub>h</sub>)*

$$I_h = \frac{100 (EXC)}{ET_0} \quad \text{Ecuación [9]}$$

Dónde:  $I_h$  = índice de humedad (%);

EXC = exceso hídrico (mm año<sup>-1</sup>);

DEF = déficit hídrico (mm año<sup>-1</sup>);

$ET_0$  = evapotranspiración de referencia (mm año<sup>-1</sup>).

A partir de este índice se realiza la clasificación de climas propuestos por Thornthwaite.

### Índice de aridez (I<sub>a</sub>)

El índice de aridez relaciona los déficits hídricos y la evapotranspiración potencial, la ecuación que lo describe es:

*Ecuación 10: Índice de aridez (Ia)*

$$Ia = \frac{100 (DEF)}{ET_0} \quad \text{Ecuación [10]}$$

Dónde:  $I_A$  = índice de aridez (%);  
 DEF = déficit hídrico (mm año<sup>-1</sup>);  
 $ET_0$  = evapotranspiración de referencia (mm año<sup>-1</sup>).

A partir de este índice se realiza la clasificación de climas propuestos por Thornthwaite.

**Factor de humedad (Fh)** en esta

Índice que tiene una consideración anual del comportamiento de los elementos climáticos, utilizando para ello el 100% índice de humedad y el 60% del índice de aridez. Si el valor obtenido es mayor a cero corresponde a climas húmedos, si el valor obtenido es menos a 0 corresponde a climas secos respectivamente.

*Ecuación 11: Factor de humedad (Fh)*

$$Fh = \frac{100*(exc-def)}{ET_0} \quad \text{Ecuación [11]}$$

Basados en el factor de humedad (Fh), la clasificación climática se describe bajo los siguientes criterios, correspondientes a la primera letra de la clasificación climática:

*Tabla 8: Clasificación por Factor de Humedad, Thornthwaite.*

Fh	Símbolo	Tipo climático
>100.1	A	Superhúmedo
80.1 a 100	B4	Muy húmedo
60.1 a 80.0	B3	Húmedo
40.1 a 60.0	B2	Semihúmedo
20.1 a 40.0	B1	Ligeramente húmedo
0.10 a 20.0	C2	Subhúmedo
-20.0 a 0.0	C1	Seco
-40.1 a -20.1	D	Semiárido
-60.0 a -40.1	E	Árido

La segunda letra corresponde a los índices de humedad y Aridez de acuerdo a los siguientes criterios:

*Tabla 9: Clasificación por Índice de Humedad y Aridez, Thornthwaite.*

Índice	Símbolo	Grado de humedad
(Ia)		Déficit de agua
0.00 a 16.7	R	Poco o nada
16.7 a 33.3	S	Moderada en verano
16.7 a 33.3	W	Moderada en invierno
> 33.3	s2	Grande en verano
> 33.3	w2	Grande en invierno
(Ih)		Superávit de agua
0 a 10	D	Poco o nada
10 a 20	s´	Moderado en verano
10 a 20	w´	Moderado en invierno
> 20	s´2	Grande en verano
> 20	w´2	Grande en invierno

La tercera componente de clasificación climática, contempla el índice de eficiencia termal, dado por la evapotranspiración potencias, bajo los siguientes criterios:

Tabla 10: Clasificación por eficiencia termal, Thornthwaite.

Ep (mm)	Símbolo	Clima
< 142	E´	Hielos
142 a 285	D´	Tundra
285 a 427	C´1	Mirotermal
427 a 570	C´2	Microtermal
570 a 712	B´1	Mesotermal
712 a 855	B´2	Mesotermal
885 a 997	B´3	Mesotermal
997 a 1140	B´4	Mesotermal
> 1140	A´	Megatermal

## 2.8 VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Para el análisis de correlación de índices de variabilidad climática y el comportamiento del clima en las regiones de estudio, se empleó la caracterización de las series de tiempo de precipitación únicamente ya que es la variable que nos define para las zonas de estudio los balances hídricos y las clasificaciones climáticas principalmente, esto indica que esta variable será la única a correlacionar con los diferentes índices de variabilidad climática contemplados, en este sentido se tiene la caracterización de las series de tiempo (1986-2014) con los diferentes índices que permiten identificar relaciones existentes entre la precipitación y los fenómenos océano-atmosféricos tales como el El Niño-Oscilación del Sur (por sus siglas en inglés ENSO), Oscilación del Atlántico Norte (por sus siglas en inglés NAO) e



Índice Multivariado del ENSO (por sus siglas en inglés MEI). Para este fin, se contempla el análisis de tele-conexiones definidas como las relaciones o enlaces existentes entre 2 anomalías climáticas de zonas o regiones distantes entre sí.

### **2.8.2 Análisis de tele-conexiones.**

La variabilidad intra-anual en Colombia está asociada principalmente con las fluctuaciones de la Zona de Confluencia Intertropical-ZCIT, las dinámicas de los océanos Pacífico y Atlántico y las dinámicas de las cuencas del Amazonas y del Orinoco y a sus interrelaciones complejas (Escobar, 2012). Estas interacciones también son conocidas como tele-conexiones, conocidas como asociaciones estadísticas entre variables climáticas en lugares geográficos fijos muy distantes entre sí, causadas por grandes estructuras espaciales como modos de variabilidad océano-atmósfera acoplados a escala de cuencas, corrientes de latitudes medias y trayectoria de tormentas (IPCC, 2013).

Este es el caso del fenómeno El Niño, La Niña, donde oscilaciones en la temperatura del océano Pacífico tiene repercusiones directas en el comportamiento de la precipitación en la mayoría del globo y son responsables en gran medida de la variabilidad inter-anual de la precipitación en Colombia. Para este estudio se van a analizar las relaciones existentes entre las series de tiempo de precipitación registradas en las estaciones de cada uno de los municipios, centralizándose en la estación de El Salado del municipio de Ciénaga de Oro, Córdoba y Hacienda Las Margaritas del municipio de Puerto López, Meta respectivamente, y un conjunto de 33 índices océano-atmosféricos o indicadores macro-climáticos propuestos por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EEUU, que registran la evolución temporal de distintos indicadores relacionados principalmente con la evolución de los océanos Pacífico y Atlántico, y las series temporales de las variables meteorológicas en las estaciones de estudio como lo proponen estudios recientes en regiones de La Mojana (Lecanda X, 2016).

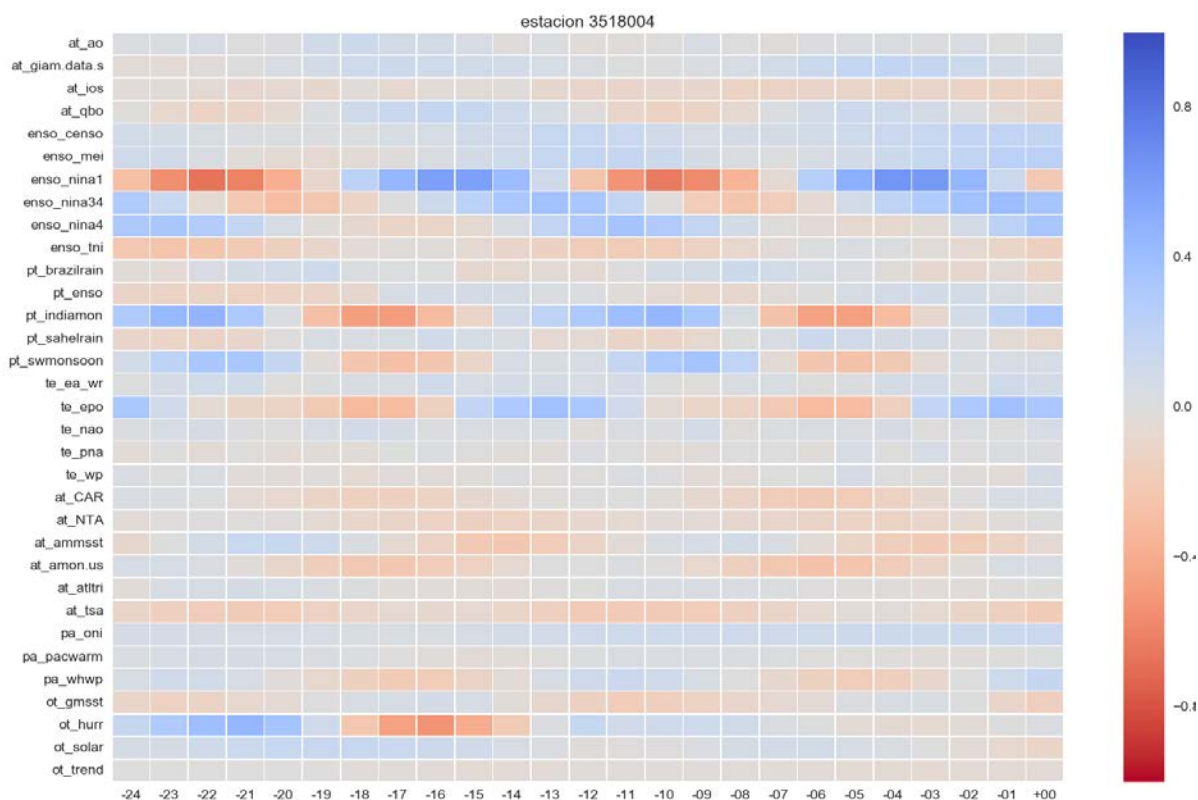
Los análisis de correlaciones con índices macro climáticos y registros de series de precipitación buscan encontrar relaciones directas entre la evolución de la precipitación y de los diferentes indicadores analizados. Estudios como los de (UPME, 2013) y (Velasco, 2016) muestran la utilidad del empleo de la matriz de correlaciones cruzadas para evidenciar las posibles relaciones entre los diferentes indicadores macro-climáticos y la variabilidad en los regímenes de precipitaciones o caudales para distintas regiones de Colombia. Como desde cuando se produce un fenómeno climatológico hasta los efectos que pueden ser evidenciados o correlacionados en la variable analizada, pueden pasar largos periodos de tiempo, el análisis de correlaciones entre variables e indicadores se realiza con rezagados hasta de 24 meses con la finalidad de encontrar evidencia de aquellas relaciones causa-efecto lineal entre las ambas series de tiempo.

Para el desarrollo del estudio de que índice influye en más en la precipitación de los 2 municipios, se correlacionaron todas las estaciones meteorológicas que miden precipitación,

y los 33 índices descritos en la ilustración 8; los cuales se corrieron hasta con 24 meses de rezago.

Ilustración 8. Mapa de calor para las matrices de correlaciones para la estación 3518004





Superior: Figura depurada que representa únicamente los valores correspondientes a correlaciones estadísticamente significativas; Inferior: Figura que muestra el índice de correlación entre las variables mediante color. Fuente: La presente investigación.

## 2.9 SOFTWARE Y MODELOS UTILIZADOS

Para el desarrollo del presente estudio, fueron utilizados diferente software libre para los diferentes componentes de la presente investigación, de esta manera, para los análisis estadísticos de la información climática y los análisis de correlación de índices de variabilidad climática se empleó R, para la generación de los mapas se utilizó Qgis y para la preparación de las simulaciones del cultivo se empelaron Soil Water Characteristics, ETo calculator y AQUACROP.

### 2.9.1 R

Los modelos VAR y se corrieron en R (Team R. C., 2012), que es un lenguaje y ambiente no comercial diseñado principalmente para tareas relacionadas con estadística computacional y desarrollo de gráficos. Este software también fue útil al momento de desarrollar los modelos de correlaciones entre variables climáticas e índices de variabilidad climática. Su última versión se encuentra disponible en el link<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> <https://www.rstudio.com/products/rstudio/download3/>

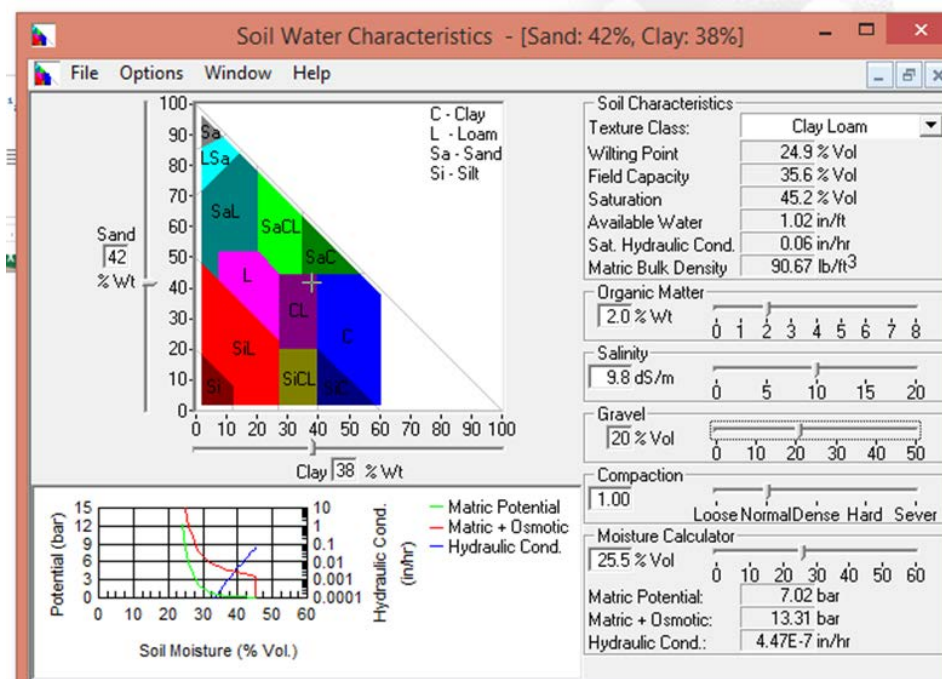
## 2.9.2 Qgis

Los mapas generados en el presente estudio fueron realizados por el software libre Qgis, desarrollado por el equipo de Quantum (Team Q. G., 2016), el cual permite de manera amigable, espacializar datos climáticos, generar cartografía con diferentes métodos de interpolación, mostrar puntos cartográficos, mostrar modelos de elevación entre otros, se encuentra disponible en el link<sup>2</sup>.

## 2.9.3 Soil Water Characteristics

Software libre desarrollado por el servicio de conservación de recursos naturales del departamento de agricultura de los Estados Unidos (por sus siglas en ingles USDA); con este programa fueron estimados los parámetros de punto de marchitez (%), la capacidad de campo (%), saturación (%) y la conductividad hidráulica (dada en pulg hora<sup>-1</sup> y corregida a mm día<sup>-1</sup>), basados en las propiedades físicas del suelo de textura, materia orgánica, grava, salinidad y compactación; que fueron la base de entrada del módulo de suelo de AQUACROP, se encuentra disponible en el link<sup>3</sup>, en la ilustración 9 se observa la interfaz del programa.

Ilustración 9: Interfaz de Soil Water Characteristics.



<sup>2</sup> <http://www.qgis.org/es/site/>

<sup>3</sup> <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/manage/?cid=stelprdb1045311>

Fuente: La presente investigación. Tomado de la interface del software Soil Water Characteristics.

### 2.9.4 ET0 Calculator

Software desarrollado por división de tierra y agua de la FAO, cuya función principal es la de calcular la evapotranspiración de referencia (ET0) de acuerdo a estándares de FAO; en este sentido el programa se alimenta de datos meteorológicos (FAO - MADR, 2013) de variables como humedad relativa, temperatura máxima, temperatura mínima, velocidad del viento, radiación solar para calcular la ET0 por medio de la ecuación de Penman-Monteith. El programa se consigue en el link<sup>4</sup>, cabe resaltar que la componente de clima (Evapotranspiración y temperatura) del software aquacrop se alimenta de la salida de este software.

### 2.9.5 AQUACROP

Al Igual que ET0 calculator, aquacrop es desarrollado por la división de tierra y agua de la FAO. Se define como un modelo de cultivo que simula la biomasa y el potencial cosechable en función de la respuesta hídrica; bajo este punto estima rendimientos de cultivos herbáceos que incluyen forrajes, vegetales, frutales, raíces y tubérculos, el modelo simula la respuesta en el rendimiento de acuerdo al agua transpirada por el cultivo, basado en el contenido de agua en el suelo (ya sea este precipitado o por riego). Por otro lado, permite determinar épocas de siembra de acuerdo a parámetros climáticos, edáficos, de cultivo y manejo agronómico, se encuentra disponible en el link <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.

El modelo cuenta con 4 módulos principales correspondientes a:

**Clima:** Para este módulo se contemplan las variables meteorológicas de precipitación que en este particular corresponde a datos diarios, evapotranspiración de referencia, temperatura máxima y mínima y concentraciones de CO<sub>2</sub> dadas en parte por millón en la atmosfera. Todas las variables anteriormente nombradas componen los archivos \*.CLI que son los empleados para el componente climático del modelo.

**Cultivo:** se describen las características intrínsecas del cultivo del maíz, para el desarrollo de este trabajo, se empleó la variedad HIBRIDO COMERCIAL para las simulaciones de la presente investigación, las cuales fueron validadas por FAO (FAO - MADR, 2013) y muestra por medio del coeficiente de Spearman relaciones fuertemente significativas (i.e valores de probabilidad menores a 0.05) entre las variables simuladas y las variables observadas en campo, con valores de coeficientes de 0.98 (probabilidad 0.0001) para biomasa seca, 0.89 (probabilidad 0.0005) para rendimiento del grano, 0.90 (probabilidad 0.0004) para índice de cosecha y 0.96 (probabilidad 0.0002) para cobertura del dosel. En este sentido, se cuenta con una variedad que emerge a los 7 días, el máximo desarrollo del dosel al día 60, inicio de la senescencia al día 95 y madurez al día 110.

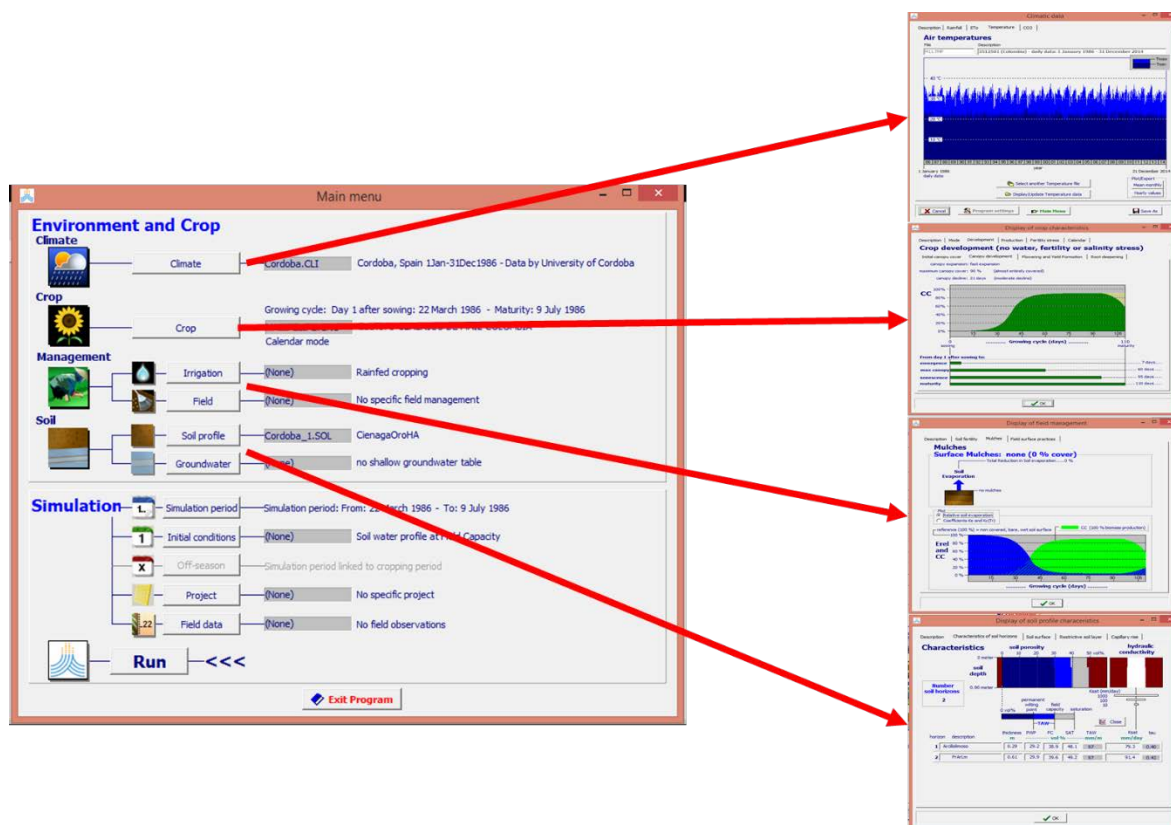
<sup>4</sup> <http://www.fao.org/nr/water/eto.html>

**Manejo:** en este módulo se incorporan las variables de riego y características de campo, para el primero en este caso no se contempla, ya que el objeto de estudio es identificar los riesgos agroclimáticos y el riego se contemplaría como una medida de mitigación, para el caso del submódulo de campo se contemplan valores por defecto referentes a fertilidad del suelo, materia orgánica superficial para disminuir las pérdidas de agua por evaporación del suelo y prácticas de campo como arado, los cuales no son restrictivos en las simulaciones.

**Suelo:** Modulo que describe e integra en las modelaciones las características del suelo en los diferentes horizontes, para el caso específico del desarrollo de esta investigación se utilizó la descripción de 2 horizontes, descritos anteriormente en las tablas 5 y 6, las descripciones corresponden a características de los diferentes horizontes, superficie del suelo, capas de restricción que afecten el desarrollo radicular y ascenso capilar.

En la ilustración 10 se muestra la interfaz del modelo con el panel principal de manejo y cada uno de los 4 módulos que lo componen.

*Ilustración 10: Interfaz del modelo AQUACROP.*



Fuente: La presente investigación. Tomado de la interface del software Aquacrop.

## 2.10 ANALISIS DE CLÚSTER

Se realizó una clasificación jerárquica para el agrupamiento según lo propone Husson (Husson F. J., 2010). Posteriormente se hizo un agrupamiento jerárquico con el paquete FactoMineR (Husson, 2016) para establecer y construir una jerarquía de grupos con el cual se construyeron los dendrogramas y fueron agrupados con el paquete de R. El método de agrupamiento fue el de Ward. Posteriormente a la clasificación jerárquica se comparó con los periodos de déficits hídricos o excesos hídricos, guiados por la variación interanual, de cada zona para determinar la participación estadística de cada uno de estos periodos en el rendimiento anual de cada región para cada una de las corridas en el periodo 1986-2014.

Se realizaron tres simulaciones una para Córdoba (fecha ideal de siembra inicios de mayo), otra para Meta en el primer semestre del año (Fecha ideal de siembra Inicios de abril) y la final se realizó para el departamento del Meta segundo semestre (Fecha ideal de siembra inicios de agosto). Se unió la base de datos generada por el software AquaCrop, que contiene los resultados de los tres modelos de cultivo, con la información meteorológica que el modelo requiere, para cada uno de los dos (2) municipios objeto de estudio. Se calculó el rendimiento del ciclo, la suma de la precipitación, la temperatura mínima, temperatura máxima, el promedio del brillo solar, y la suma de los grados días. Todos estos valores se calcularon para cada ciclo modelado, como se aprecia en la tabla 11.

Tabla 11. Datos de entrada para el establecimiento de clústers, Ciénaga de Oro, Córdoba. Serie 1986-2014.

<b>ANOMALIA</b>	<b>Año</b>	<b>Ciclo</b>	<b>max.yield</b>	<b>sum.prec</b>	<b>t.min</b>	<b>t.max</b>	<b>brillo.mean</b>	<b>gd.sum</b>
Normal	1986	1	0	474.5	20.4	36.5	5.83	1842.3
El Niño	1987	2	8.49	706.4	21.2	35.7	4.79	1877.5
La Niña	1989	4	11.83	644.7	20.5	38.4	5.05	1835.8
Neutro	1990	5	1.38	639.9	21.5	38.4	5.61	1875.6
Neutro	1991	6	3.07	588.5	20	36.5	4.92	1868.2
El Niño	1992	7	12.96	704.6	20.1	36.4	4.95	1852.8
Neutro	1993	8	9.21	544.4	17.4	38.4	4.61	1778.2
Neutro	1994	9	9.34	912.2	18.6	36.8	5.21	1821.9
El Niño	1995	10	0	662.6	17.8	36.2	4.33	1785.7
La Niña	1996	11	12.49	707.5	19	35.4	4.26	1789.8
Neutro	1997	12	0	400.1	20.8	37.8	5.46	1874
El Niño	1998	13	9.24	658.6	18.4	36.2	4.67	1870.6
La Niña	2000	15	9.61	634.2	21	36	4.08	1879.6
La Niña	2001	16	9.21	599.5	21.5	35.8	4.72	1892
Neutro	2002	17	8.97	521.7	21.1	37.4	5.8	1896.5
El Niño	2003	18	11.62	521.9	21.4	38.2	4.64	1880.7
Neutro	2004	19	10.11	418.5	21.4	36	5.77	1878.2
La Niña	2005	20	12.63	733.8	21.7	35.4	4.62	1881.4
La Niña	2008	23	10.7	539.1	21.8	34.8	4.11	1879.2
Neutro	2009	24	12.56	544.8	21.6	37	4.62	1876.5
El Niño	2010	25	13.27	807	21.7	37.2	3.85	1864.3
La Niña	2011	26	12.75	755.6	20.2	35.7	4.39	1846.9
La Niña	2012	27	11.15	605.7	20.2	34.8	5.32	1843.2
Neutro	2013	28	13.31	927.4	20.8	35.2	5.32	1853.5
Neutro	2014	29	12.44	664.6	20.2	37.5	4.77	1874.3

Fuente: La presente investigación.



### 3. RESULTADOS

#### 3.1 CLIMATOLOGIA

La climatología de los municipios que comprenden la zona de estudio, fueron calculadas con la normal climatológica 1981-2010; en este sentido, los datos meteorológicos a escala diaria proporcionados por el IDEAM, se llevaron de escala diaria a escala mensual, debido a que la componente de clima del software Aquacrop fue alimentada con datos diarios de variables meteorológicas, para así obtener los promedios mensuales multianuales, para caracterizar climáticamente las regiones, fueron calculadas las normales climatológicas de las siguientes variables: Precipitación, Temperatura media, Temperatura Máxima, Temperatura Mínima, Brillo Solar y Humedad Relativa; la variable de evapotranspiración potencial será descrita en el capítulo del Balance Hídrico Climático.

Las series de temperatura máxima y mínima utilizadas no tienen valores de datos faltantes, fueron generados por métodos VAR, descritos anteriormente; para la serie de precipitación, no se emplearon series completas ya que los análisis de sensibilidad para esta variable generaron datos no confiables, razón por la cual se decidió utilizar las series originales y así no generar ruido estadístico en las modelaciones (M Fonseca-Hernandez, 2015).

Como se puede observar en las siguientes tablas, se tomaron aleatoriamente 5 datos para cada una de las variables meteorológicas de cada estaciones utilizadas y se extrajeron de la serie y se generaron los datos, el análisis de sensibilidad para las series generadas, demuestra que los modelos VAR tienen una buena aproximación a datos reales en la generación de los datos meteorológicos de temperaturas, donde las diferencias para la temperatura máxima y mínima oscilaron entre -6.2% y 7.9%, esto debido especialmente a que el coeficiente de variación térmica no es muy amplio, el modelo para la generación de datos de precipitación, evidencia que subestima los datos generados para los 2 municipios, con porcentajes de diferencia mayores para el departamento del Meta, lo que concluyó que al generar series de precipitación, estaríamos subestimando los valores de la serie.

Tabla 12: Análisis de sensibilidad para las series meteorológicas de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima de la estación de Ciénaga de Oro, Córdoba.

	Original	Generado	% diferencia
<b>Precipitación</b>	15.5	1	<b>-93.5%</b>
	63	8	<b>-87.3%</b>
	1.2	0.1	<b>-91.7%</b>
	13.5	5.7	<b>-57.8%</b>
	5.4	1	<b>-81.5%</b>
<b>T max</b>	33.8	33.99	0.6%
	31.6	29.98	-5.1%
	30.2	31.87	5.5%
	33.6	31.67	-5.7%

	30.2	32.5	7.6%
	23.4	22.87	-2.3%
	22	20.63	-6.2%
<b>T min</b>	20.6	19.44	-5.6%
	22.4	22.95	2.5%
	20.5	20.95	2.2%

Fuente: La presente investigación.

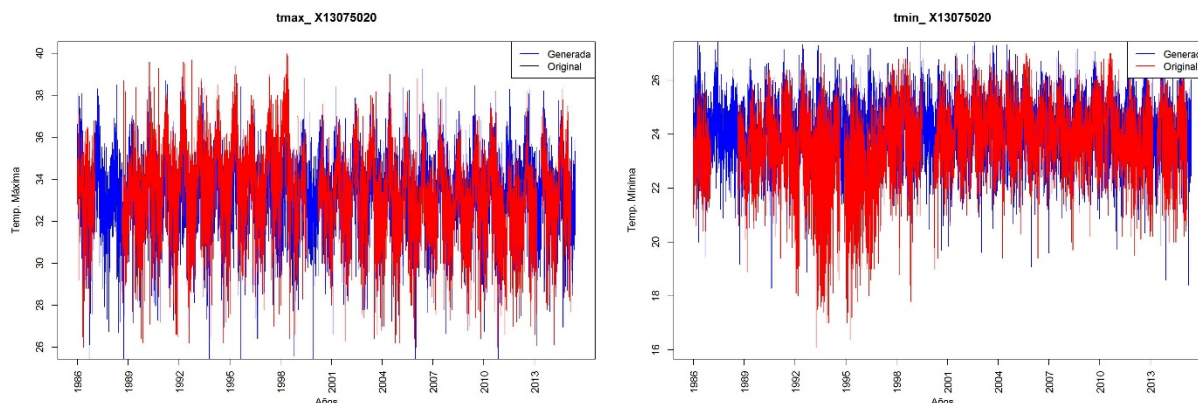
Tabla 13: Análisis de sensibilidad para las series meteorológicas de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima de la estación de Puerto López, Meta.

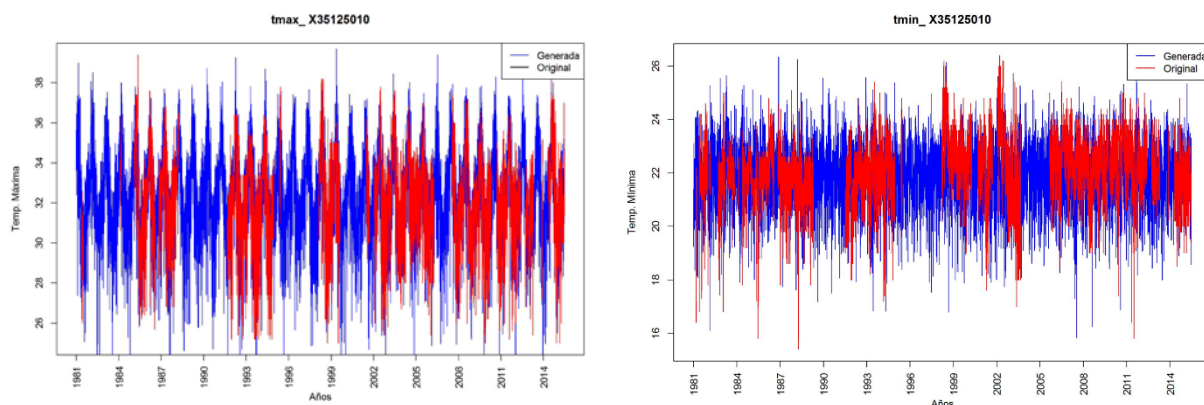
	Original	Generado	% diferencia
<b>Precipitación</b>	10.3	6.3	<b>-38.8%</b>
	26.7	5.6	<b>-79.0%</b>
	45.2	15	<b>-66.8%</b>
	39.8	21.4	<b>-46.2%</b>
	15.4	8.4	<b>-45.5%</b>
<b>T max</b>	29.3	31.4	7.2%
	33.1	32.9	-0.6%
	32.4	33.3	2.8%
	34.3	34	-0.9%
	31.4	32.84	4.6%
<b>T min</b>	22.2	23.58	6.2%
	23.8	23.9	0.4%
	22.1	22.9	3.6%
	21.6	23.3	7.9%
	23	22.99	0.0%

Fuente: La presente investigación.

Las series generadas se observan en la siguiente gráfica.

Gráfica 2: Series climáticas generada.





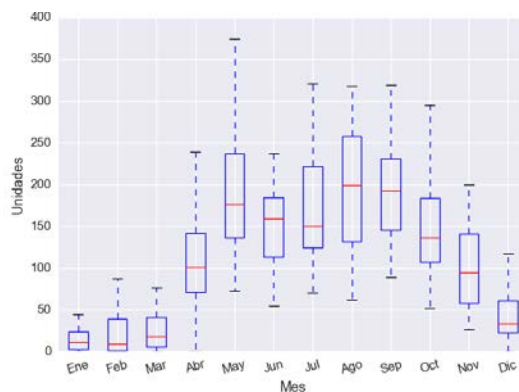
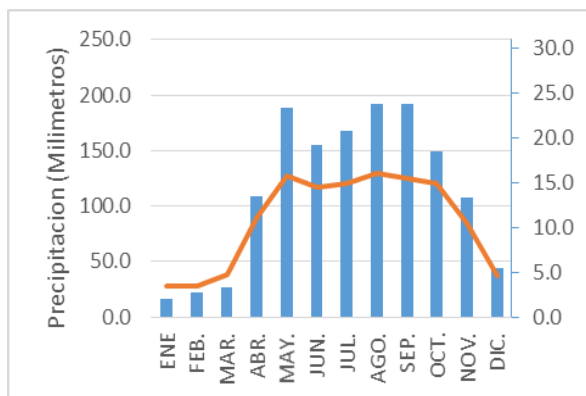
Superior izquierda, Serie de temperatura máxima de Ciénaga de Oro; Superior derecho, Serie de temperatura mínima de Ciénaga de Oro; Inferior izquierda, Serie de temperatura máxima de Puerto López; Inferior derecho, Serie de temperatura mínima de Puerto López. En Azul representan datos generados y rojo original. Fuente: La presente investigación.

### 3.1.1 Climatología Ciénaga de Oro, Córdoba.

La estación de El Salado, ubicada en el municipio de Ciénaga de Oro, fue la seleccionada para obtener la información climática de la región, a partir de información a escala diaria, normalmente la zona se comporta de la siguiente manera, ver anexo 5:

**Precipitación:** En promedio al año, el municipio de Ciénaga de Oro, perteneciente a la región del Sinú Medio, recibe  $1.370 \text{ mm año}^{-1}$ , distribuidos principalmente entre los meses de mayo a octubre, en un régimen de precipitaciones monomodal, siendo el trimestre de Julio, Agosto y Septiembre el que más precipitaciones registra con un total de 550 milímetros (40% del total de la precipitación), el mes de mayo presenta un pico alto de precipitaciones con un promedio de 190 mm, precedido de abril, mes de transición para la temporada de lluvias, El primer trimestre del año se registra como el más seco con precipitaciones promedio de  $20 \text{ mm mes}^{-1}$ , en general, bajo criterios hídricos, se puede concluir que la temporada seca se encuentra en los meses de diciembre y marzo, abril mes de transición para la temporada de lluvias y noviembre mes de transición a la temporada seca. Por otro lado, en promedio la precipitación se distribuye en 10.8 días al mes, teniendo en la temporada de lluvias con un promedio de  $15.3 \text{ días de lluvia mes}^{-1}$ , los mayores valores, a diferencia de la época seca que en promedio llueven 4 días, los meses de transición registran en promedio 10.5 días respectivamente (ver gráfico 3).

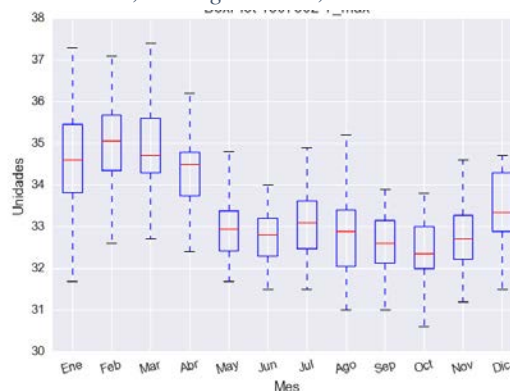
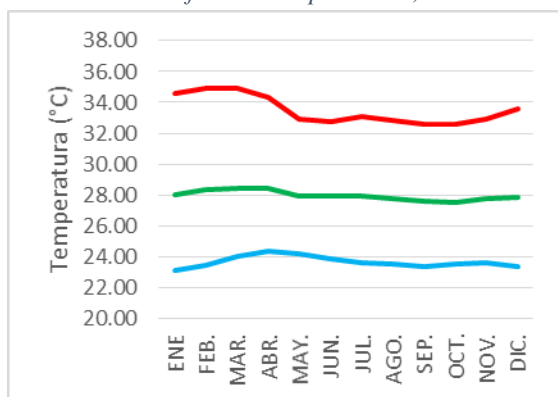
Gráfica 3: Precipitación, normal climatológica 1981-2010, Ciénaga de Oro, Córdoba

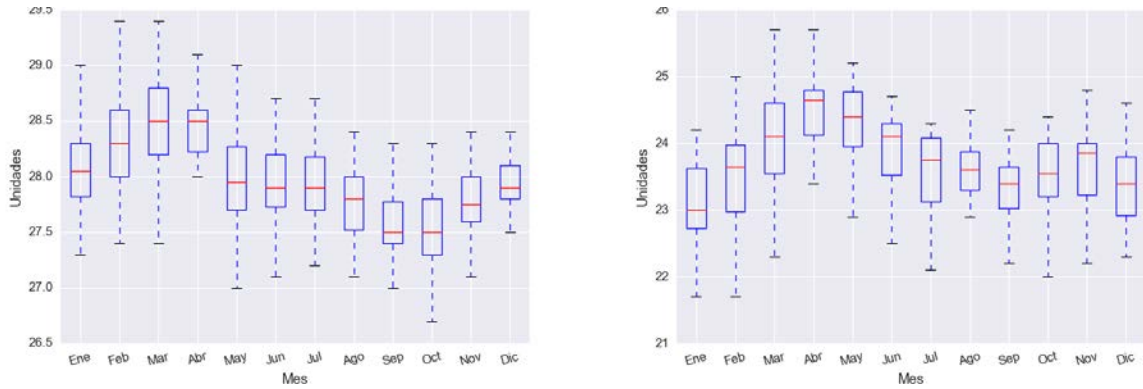


Izquierda: Precipitaciones (Barras azules) y Número de días con lluvia (línea naranja, eje secundario); Derecha: Boxplot precipitación. Fuente: La presente investigación.

**Temperatura:** Para esta variable, la temperatura media no tiene oscilaciones intra-anales significativas, en promedio a lo largo del año se encuentra en 28 C, siendo el mes de abril el de más alta temperatura media registra, con 28.4 C y octubre con la temperatura media más baja. La temperatura máxima en promedio se registra en 33.5 C a lo largo del año, inversamente proporcional con el régimen de precipitaciones, siendo el periodo seco el que registra las temperaturas más altas, febrero con 34.9 C se reporta con temperaturas máximas más altas en contraste con septiembre con promedios de 32.5 C como el de menores temperaturas máximas. La variable de temperatura mínima, en la región en promedio se registra 23.7 C, que al igual que la temperatura media no tiene variaciones significativas a través del año, se destaca el mes de abril con las temperaturas mínimas más altas, en promedio 24.4 C, la época seca con las temperaturas mínimas más bajas, con promedios de 23.3 C.

Gráfica 4: Temperaturas, normal climatológica 1981-2010, Ciénaga de Oro, Córdoba

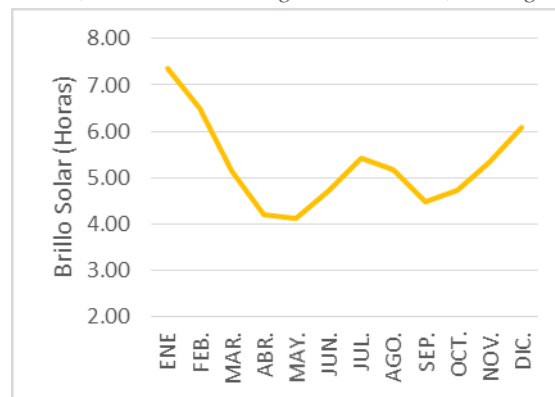




Temperatura Máxima (Línea Roja), Temperatura Media (Línea Verde) y Temperatura Mínima (Línea Azul), Superior derecho: Boxplot de temperatura máxima; Inferior izquierdo: Boxplot de temperatura media e inferior derecho: Boxplot de temperatura mínima. Fuente: La presente investigación.

**Brillo Solar:** Si bien, la estación de El Salado, no cuenta con registros de esta variable, se tomó la información de la estación de Turipana, ubicada cerca del área de estudio. Se puede apreciar un régimen bimodal claramente definido, donde en promedio anual se registraron  $5.3 \text{ h día}^{-1}$ , donde claramente la época seca muestra los valores de esta variable meteorológica más altos, siendo enero con  $7.6 \text{ h día}^{-1}$ , el de mayor brillo solar, el mes de transición (temporada seca a lluvias) registra los valores más bajos a lo largo del año de brillo solar con un promedio de  $4.1 \text{ h día}^{-1}$ , posteriormente el trimestre de Junio-Julio-Agosto sube en promedio a  $5.1 \text{ h día}^{-1}$ , para disminuir en el trimestre más lluvioso con un promedio de  $4.8 \text{ h día}^{-1}$ .

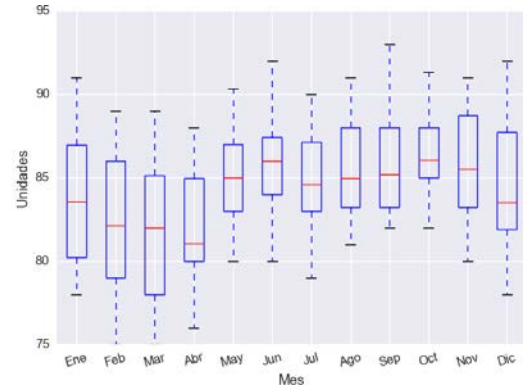
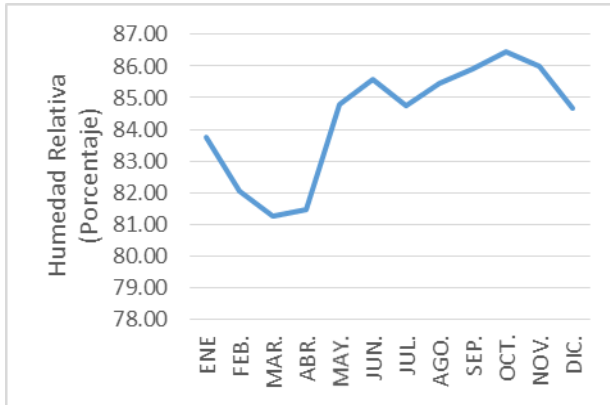
Gráfica 5: Brillo solar, normal climatológica 1981-2010, Ciénaga de Oro, Córdoba



Fuente: La presente investigación.

**Humedad Relativa:** En promedio esta variable para la región se encuentra en 84.3%, su distribución es directamente proporcional en la temporada de lluvias, siendo el trimestre de septiembre-octubre-noviembre el más húmedo del año, octubre con 86.5% el mes que registra el valor más alto, el mes de marzo en contraste registra en promedio 81.2% y el trimestre de febrero-marzo-abril como el menos húmedo con un promedio de 81.6%.

Gráfica 6: Humedad Relativa, normal climatológica 1981-2010, Ciénaga de Oro, Córdoba

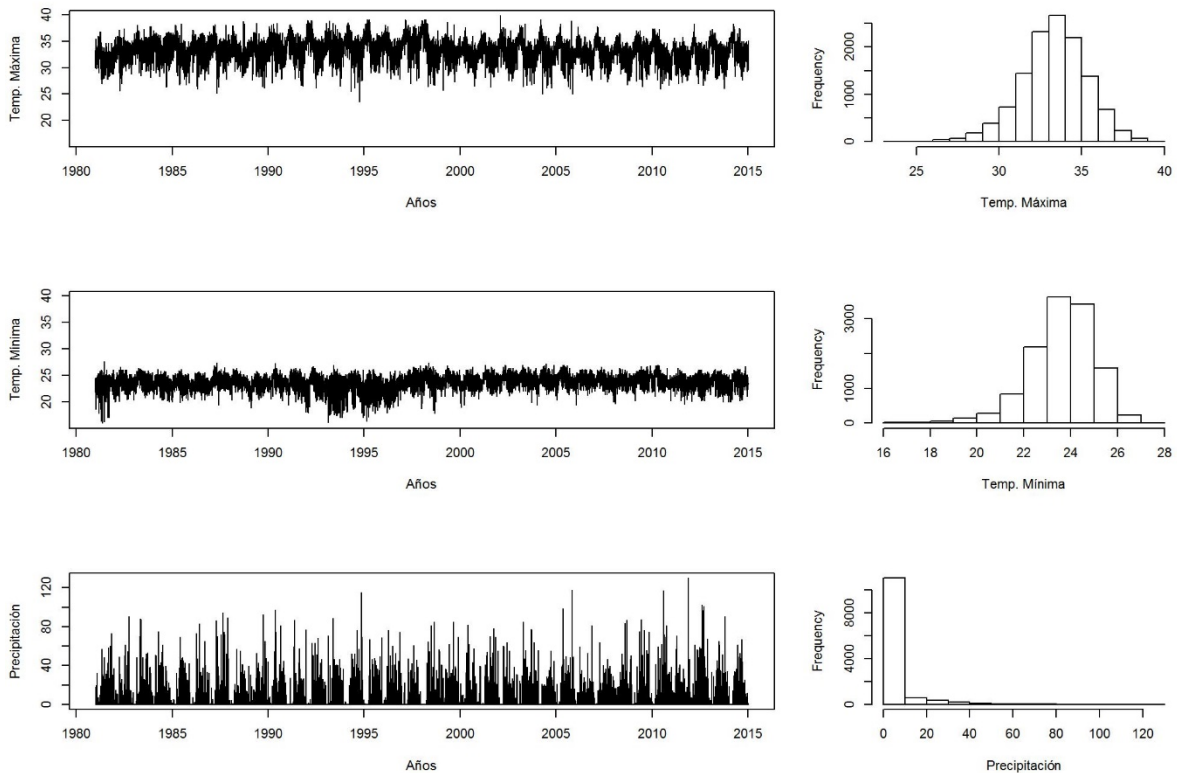


Izquierda: Humedad relativa, normal climatológica; derecha: Boxplot humedad relativa. Fuente: La presente investigación.

En el grafico 7 se aprecia la serie climatológica de la temporalidad 1980-2015 de la estación de El Salado y los diagramas de frecuencia para las variables de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, empleada en el análisis climático y modulo climático del modelo de simulación de los ciclos del cultivo.

Gráfica 7: Serie climatológica y distribución de los datos para la serie 1981-2014 de las variables de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación en la estación de Ciénaga de Oro, Córdoba.

X13075020



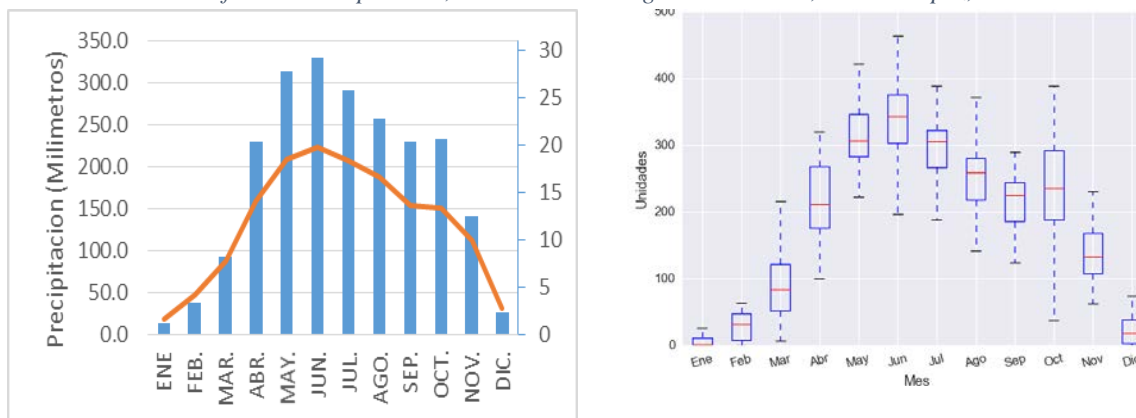
Fuente: La presente investigación.

### 3.1.2 Climatología Puerto López, Meta.

La climatología del municipio de Puerto López, al igual que Ciénaga de Oro, fue calculada a partir de los datos diarios, llevados a mensuales y haciendo el cálculo de las mensuales multianuales comprendidas entre los años 1980-2010, en este sentido se calcularon las normales climatológicas para las variables de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media, humedad relativa y brillo solar, con la información meteorológica de la estación de hacienda Las Margaritas perteneciente a la red de estaciones del IDEAM, ver anexo 6.

**Precipitación:** En promedio, el municipio de Puerto López anualmente tiene una oferta de 2.200 mm de precipitación, donde su distribución es típicamente monomodal, lo que quiere decir que las lluvias a lo largo del año se distribuyen en una sola temporada entre los meses de abril y octubre, siendo el trimestre de Mayo-Junio-Julio el que más volumen de agua precipitada registra, con un total de 936 mm, correspondientes al 43% de total anual, como meses de transición de la temporada seca a húmeda se encuentra marzo, con un promedio de 92.4 mm y la transición de lluvia-seco se encuentra noviembre con un promedio de precipitaciones de 140 mm respectivamente, la temporada seca está claramente identificada entre los meses de diciembre y febrero con promedio de 26 mm mes<sup>-1</sup>, siendo el mes de enero el más seco de todo el año. En promedio la precipitación se distribuye a lo largo del año en 20 días de lluvia mes<sup>-1</sup>, siendo el trimestre más lluvioso el que obviamente registra el mayor número de días con lluvia con un promedio de 19 días, y el trimestre más seco con un promedio de 3 días de precipitaciones respectivamente.

Gráfica 8: Precipitación, normal climatológica 1981-2010, Puerto López, Meta

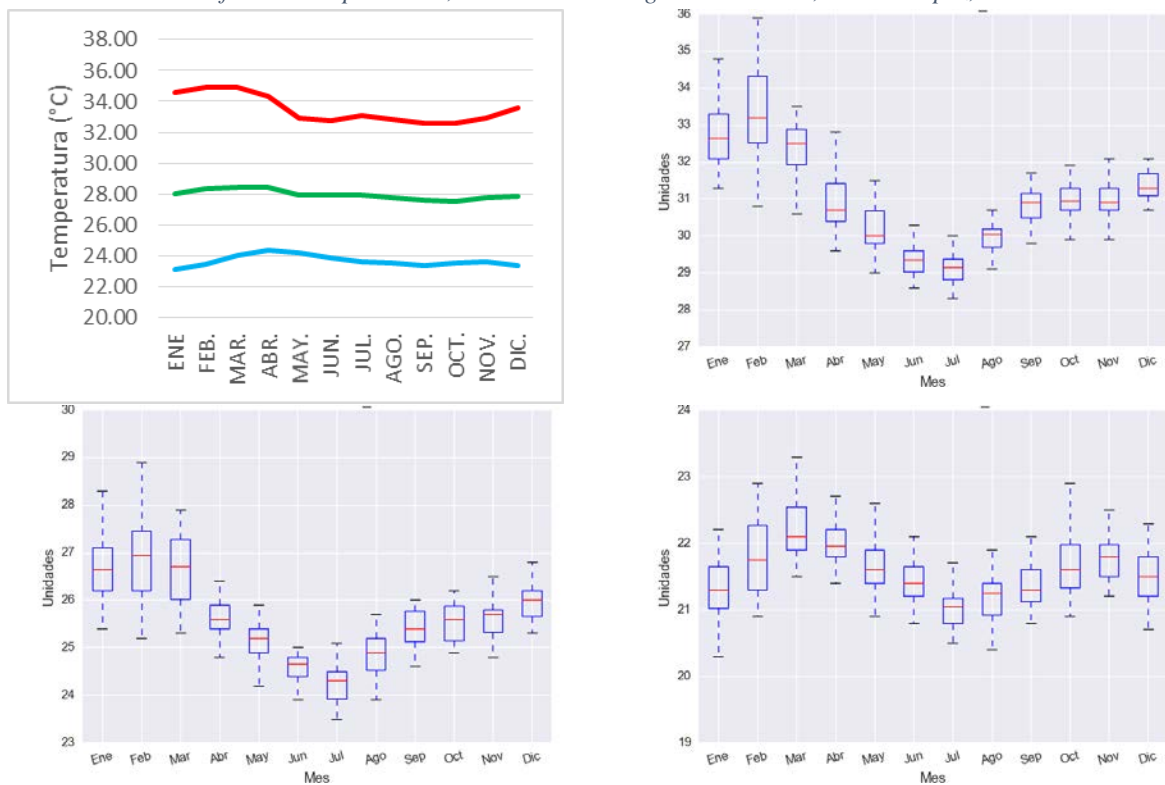


Izquierda: Precipitaciones (Barras azules) y Número de días con lluvia (línea naranja, eje secundario); Derecha: Boxplot precipitación. Fuente: La presente investigación.

**Temperatura:** La media térmica de la zona se encuentra en 26.6 C, oscila en valores entre 25.3 C y 28 C, claramente distribuida a lo largo del año inversamente proporcional a la distribución de la precipitación, esto quiere decir que los valores de temperatura media más bajos se encuentran en el trimestre con las mayores precipitaciones, en promedio 25.5 C, en contraste con el trimestre Enero-Febrero-Marzo con una temperatura media de 27.9 C. La temperatura máxima en promedio es de 32.2 C y oscila entre valores de 30.2 C y 34.8 C, al

igual que la temperatura media, se distribuye inversamente proporcional a las precipitaciones, el trimestre de Junio-Julio-Agosto tiene las temperaturas máximas más bajas con un promedio de 30.4 C y el primer trimestre del año registra las temperaturas máximas más altas con promedios de 34.5 C. Las temperaturas mínimas en promedio se encuentran en 22.1 C y a lo largo del año no registran una oscilación tan marcada como las medias y máximas, cabe resaltar que la temporada seca de la región presenta las temperaturas mínimas más bajas con un promedio de 21.9 C en comparación con el trimestre septiembre-octubre-noviembre con promedios de 22. C.

Gráfica 9: Temperaturas, normal climatológica 1981-2010, Puerto López, Meta

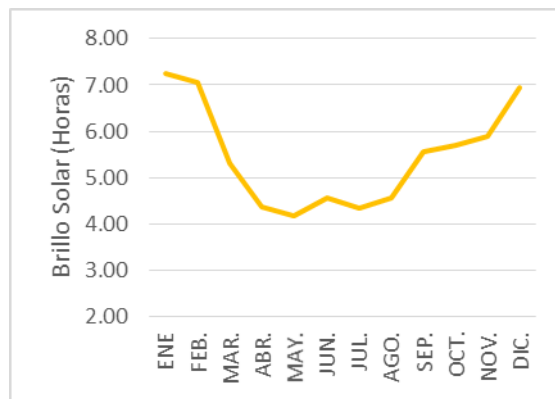


Temperatura Máxima (Línea Roja), Temperatura Media (Línea Verde) y Temperatura Mínima (Línea Azul), Superior derecho: Boxplot de temperatura máxima; Inferior izquierdo: Boxplot de temperatura media e inferior derecho: Boxplot de temperatura mínima. Fuente: La presente investigación.



**Brillo Solar:** En promedio anual, Puerto López registra 5.5 h de brillo solar día<sup>-1</sup>, los valores mensuales multianuales de esta variable oscilan entre 7.2 y 4.2 h día<sup>-1</sup>, en este sentido, se puede observar que la época seca cuenta con los valores de brillo solar más altos, que en promedio se encuentran por el orden de las 7.1 h día<sup>-1</sup> para el trimestre diciembre-enero-febrero, siendo el mes de enero el que mayor radiación registra, en contraste con el trimestre de mayo-junio-julio con un promedio de 4.4 h día<sup>-1</sup>, siendo mayo el mes con menos brillo solar con 4.2 h día<sup>-1</sup>.

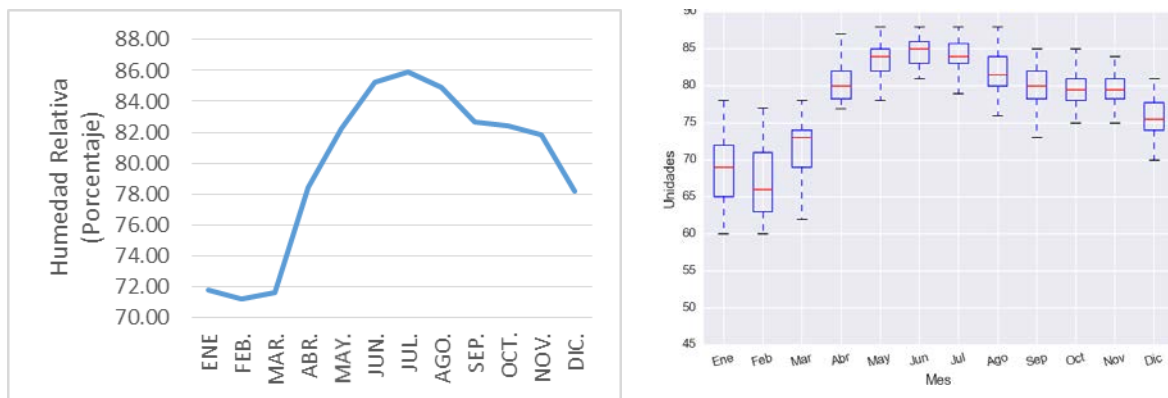
Gráfica 10: Brillo solar, normal climatológica 1981-2010, Puerto López, Meta



Fuente: La presente investigación.

**Humedad Relativa:** Puerto López en promedio tiene una humedad relativa del 79.7% con una amplia distribución a lo largo del año que va de promedios mensuales mutianuales de 71.2% a 86%, siendo en promedio el primer trimestre del año el de más baja humedad relativa con un promedio de 71.5%, a diferencia del trimestre de junio-julio-agosto con un promedio de 85.4% de humedad relativa, esta variable tiene una relación directamente proporcional a la distribución de las precipitaciones.

Gráfica 11: Humedad Relativa, normal climatológica 1981-2010, Puerto López, Meta

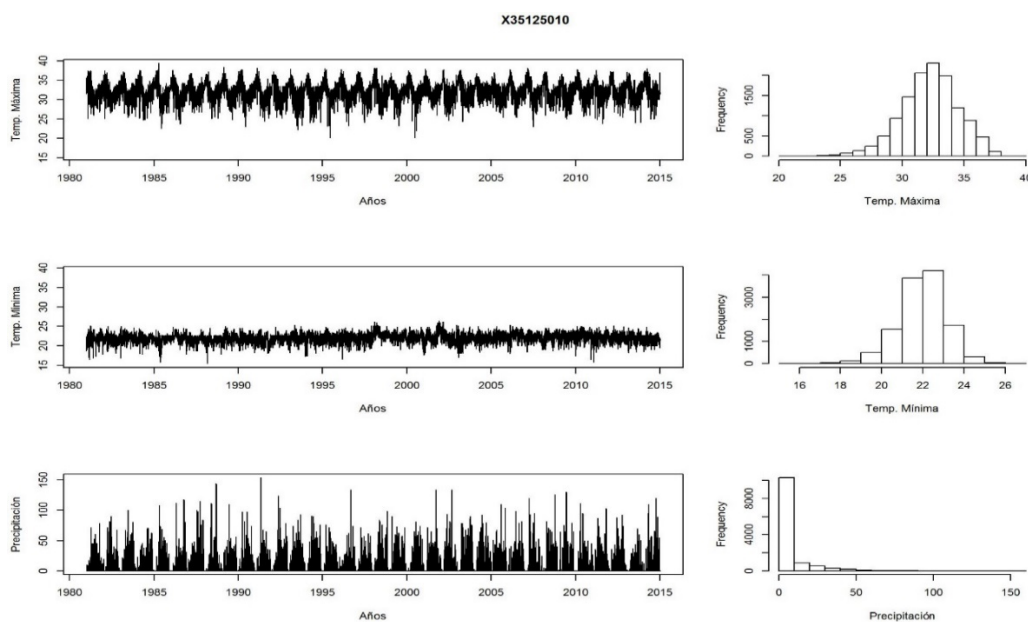


Izquierda: Humedad relativa, normal climatológica; derecha: Boxplot humedad relativa. Fuente: La presente investigación.

El grafico 12 muestra la serie climatológica de la temporalidad 1980-2015 de la estación de Hacienda Las Margaritas y los diagramas de frecuencia para las variables de temperatura

máxima, temperatura mínima y precipitación, empleada en el análisis climático y modulo climático del modelo de simulación de los ciclos del cultivo respectivamente.

Gráfica 12: Serie climatológica y distribución de los datos para la serie 1981-2014 de las variables de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación en la estación de Puerto López, Meta.



Fuente: La presente investigación.

### 3.2 VARIABILIDAD CLIMATICA Y VARIACION INTERANUAL

Para calcular los índices de Variabilidad Climática en los municipios de estudio, se empleó como vimos anteriormente en el capítulo 2.7.2 el análisis de tele-conexiones, en este sentido se aplicó el índice para cada una de las estaciones con mediciones de precipitación que permitió obtener las series climáticas y poder correlacionarlas con cada uno de los índices de Variabilidad Climática. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para las 2 regiones analizadas:

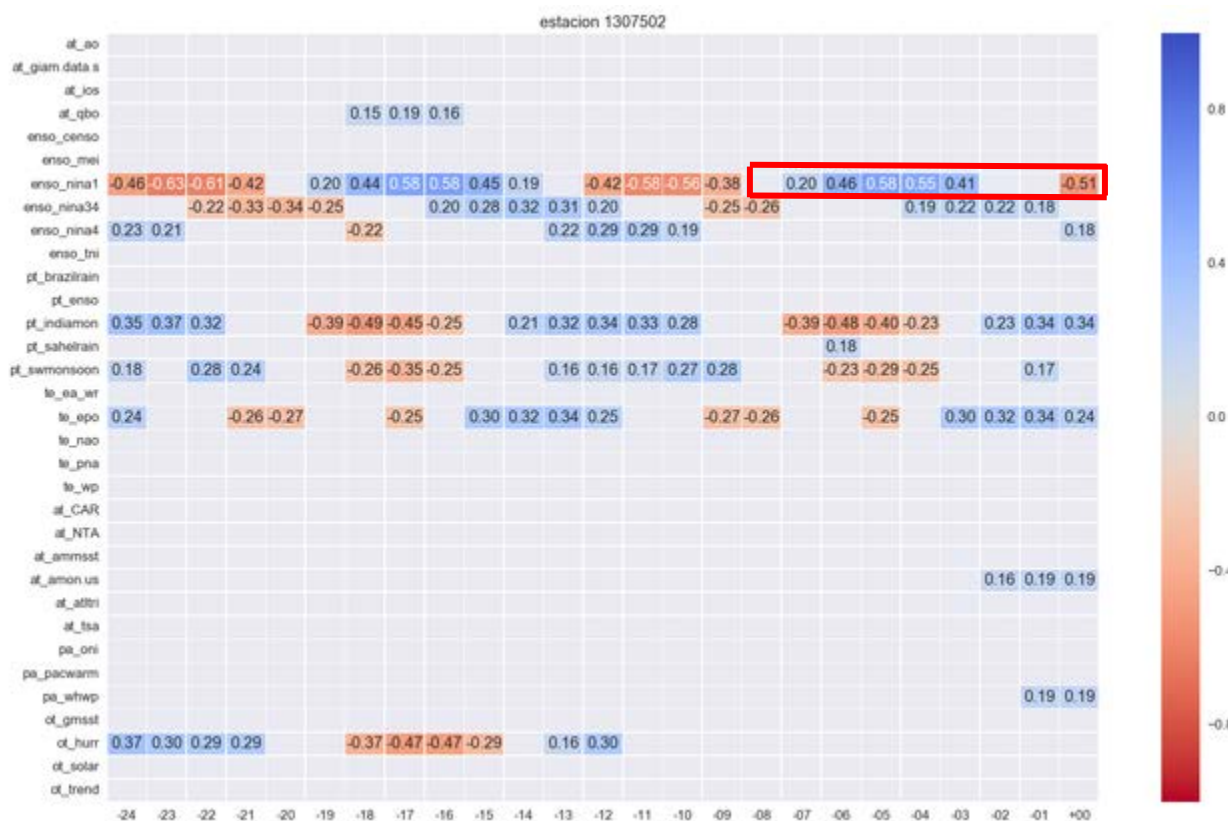
#### 3.2.1 Variabilidad interanual, Ciénaga de Oro, Córdoba.

Los resultados obtenidos con los análisis de correlación de tele-conexiones, demuestran que para la región del municipio de Córdoba, la precipitación tiene un alto grado de dependencia estadística con el índice de Variabilidad Climática El Niño 1+2 con ubicación espacial en la franja ecuatorial del pacifico de 0-10 Sur y 90-80 Oeste, con índices de correlación directamente proporcionales para el rezago del primer mes con un valor de -0.51, lo que indica que para el primer mes, con índices negativos, la variable de la precipitación se ve influenciada por debajo de los valores de la serie o por debajo de lo normal, se aprecia que el rezago estadístico en el mes 5 cambia y este índice de correlación se vuelve inversamente proporcional, lo que indica que si el valor de la anomalía de la temperatura superficial del mar es positivo, las precipitaciones se ven afectadas negativamente (tiempo seco) y si el

índice es negativo, las precipitaciones se ven aumentadas por encima de lo normal (excesos hídricos).

Estos valores se confirman, con el mismo análisis de tele-conexiones de 2 estaciones vecinas correspondientes a Chima (código IDEAM 1307501) y Turipaná (código IDEAM 1307503) disponible en el anexo 7.

*Ilustración 11: Mapa de calor para las matrices de correlaciones de la estación 1307502, Ciénaga de Oro, Córdoba.*



Fuente: La presente investigación.

Con este resultado podemos determinar que el índice El Niño 1+2 afecta de manera significativa las precipitaciones de Ciénaga de Oro, bajo este resultado se estimarán los balances hídricos climáticos en las temporalidades de presencia de un evento ENSO, para cuantificar los excesos y déficit hídricos de la región, con el objetivo de identificar riesgos agroclimáticos, la temporalidad entre 1986 y 2014 para definir los periodos de anomalías positivas, negativas y neutrales, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 14: Valores de la anomalía del Índice ENSO, 1986-2014<sup>5</sup>

Año	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1986	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.2	0.4	<b>0.7</b>	<b>0.9</b>	<b>1</b>	<b>1.1</b>
1987	<b>1.1</b>	<b>1.2</b>	<b>1.1</b>	<b>1</b>	<b>0.9</b>	<b>1.1</b>	<b>1.4</b>	<b>1.6</b>	<b>1.6</b>	<b>1.4</b>	<b>1.2</b>	<b>1.1</b>
1988	<b>0.8</b>	<b>0.5</b>	0.1	-0.3	<b>-0.8</b>	<b>-1.2</b>	<b>-1.2</b>	<b>-1.1</b>	<b>-1.2</b>	<b>-1.4</b>	<b>-1.7</b>	<b>-1.8</b>
1989	<b>-1.6</b>	<b>-1.4</b>	<b>-1.1</b>	<b>-0.9</b>	<b>-0.6</b>	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
1990	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	<b>0.6</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>	<b>1.2</b>	<b>1.4</b>
1992	<b>1.6</b>	<b>1.5</b>	<b>1.4</b>	<b>1.2</b>	<b>1</b>	<b>0.8</b>	<b>0.5</b>	0.2	0	-0.1	-0.1	0
1993	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.6	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	<b>0.6</b>	<b>0.9</b>	<b>1</b>
1995	<b>0.9</b>	<b>0.7</b>	<b>0.5</b>	0.3	0.2	0	-0.2	<b>-0.5</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.9</b>	<b>-1</b>	<b>-0.9</b>
1996	<b>-0.9</b>	<b>-0.7</b>	<b>-0.6</b>	-0.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	<b>0.6</b>	<b>1</b>	<b>1.4</b>	<b>1.7</b>	<b>2</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>	<b>2.3</b>

<sup>5</sup> Disponible en [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)

1998	2.1	1.8	1.4	1	0.5	-0.1	-0.7	-1	-1.2	-1.2	-1.3	-1.4
1999	-1.4	-1.2	-1	-0.9	-0.9	-1	-1	-1	-1.1	-1.2	-1.4	-1.6
2000	-1.6	-1.4	-1.1	-0.9	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.3
2002	-0.2	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.8	0.9	1.1	1.2	1.1
2003	0.9	0.7	0.4	0	-0.2	-0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
2004	0.3	0.3	0.2	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7
2005	0.7	0.6	0.5	0.5	0.3	0.2	0	-0.1	0	-0.2	-0.5	-0.7
2006	-0.7	-0.6	-0.4	-0.2	0	0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.9
2007	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.1	-1.3	-1.3
2008	-1.4	-1.3	-1.1	-0.9	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.7	-0.6	-0.4	-0.1	0.2	0.4	0.5	0.5	0.6	0.9	1.1	1.3
2010	1.3	1.2	0.9	0.5	0	-0.4	-0.9	-1.2	-1.4	-1.5	-1.4	-1.4
2011	-1.3	-1	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.6	-0.8	-0.9	-1	-0.9
2012	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.1	-0.2
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2014	-0.5	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1	0	-0.1	0	0.1	0.4	0.5	0.6

Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA, 2017.

Una vez establecidas las temporalidades de presencia de un evento ENSO, se procederá a correlacionar la oferta climática de los eventos ENSO con las anomalías de rendimiento simulados con AQUACROP y la oferta climática de cada uno de los periodos, los años 1988, 1999, 2006 y 2007 fueron eliminados de nuestro periodo de análisis debido a su gran cantidad de datos faltantes, lo que podría generar ruido a la serie. Según lo reporta FENALCE con datos de fecha de siembra, se contempla que esta corresponde a los primeros días del mes de mayo, que para este estudio se tomará la precipitación acumulada entre el 5 de mayo y el 22 de agosto de cada año de la serie, según estadísticas de FENALCE, el 80% de los productores siembran en los primeros días del mes de mayo, por este motivo se empleará en el desarrollo de esta investigación dicha fecha, las estadísticas de AGRONET, demuestran que en total, los municipios que más área cultivada registran en el departamento de Córdoba, siembran en el primer semestre (84%) y tan solo se registran un 16% que siembra en el segundo, por esta razón se empleará una sola fecha de siembra para esta región. En el anexo 9 se aprecian las fechas de siembra para el periodo 2012–2015.

### 3.2.2 Variabilidad interanual, Puerto López, Meta.

Los resultados de análisis de tele-conexiones para la región de Puerto López del departamento del Meta, demuestra que los valores de correlaciones no son congruentes, debido a que se encuentran diversos índices de variabilidad climática con correlaciones entre 0.19 y 0.34, lo que no nos permite definir un índice con valores de correlación alto. Esto se comparó con análisis de tele-conexiones de estaciones vecinas que demuestran comportamientos similares, lo que indica que para la Orinoquia estos índices no son tan significativos. En el anexo 8 se observan los mapas de calor para la variable de precipitación de las estaciones 3518003 y 3518004.

Al no encontrar correlación con un (1) índice específico de variabilidad climática, se optó por agrupar los volúmenes de precipitación en terciles, de esta manera se obtienen valores por encima de lo normal y por debajo de lo normal, para los semestres A y B. De esta manera se pueden obtener agrupaciones de fechas de los rendimientos modelados para poder ser analizados los riesgos agroclimáticos y poder estimar los Balances Hídricos Climáticos, tal como se muestra en la ilustración 12.

Ilustración 12: Mapa de calor para las matrices de correlaciones de la estación 3512501 Puerto López, Meta



Fuente: La presente investigación.

Cabe resaltar, que para el semestre A del departamento del Meta, los años 1995, 1996, 2001 y 2004 no fueron tenidos en cuenta en el análisis, debido al gran número de datos faltantes, Para este semestre el valor de la precipitación acumulada se tomó desde el 5 de abril hasta el 23 de julio de cada uno de los años modelados, dado los resultados proporcionados por FENALCE que muestran las fechas de siembra de los agricultores del Meta para los años 2012-2015, donde el 52% de los mismos siembran en el mes de abril, como se aprecia en el anexo 10. En la tabla 15 se pueden observar los valores de precipitación acumulada, donde sobresalen años con bajas precipitaciones como el 2013, 1997 y 2003; contrario a los años con las mayores precipitaciones registradas correspondientes a 1992, 1994, y 1991 respectivamente.

Tabla 15: Regímenes hídricos, Semestre A, Puerto López, Meta.

REGIMEN	AÑO	Precipitación acumulada
BAJA	2013	378.3

BAJA	1997	392.2
BAJA	2003	398.7
BAJA	1998	480.1
BAJA	2007	517.7
BAJA	2005	534.2
BAJA	2002	.....
BAJA	1999	547.5
NORMAL	2009	559.2
NORMAL	2012	607
NORMAL	2011	610.3
NORMAL	2014	667.4
NORMAL	2006	727.2
NORMAL	2010	730.2
NORMAL	1987	764.4
NORMAL	1988	780.7
ALTAS	1986	786.4
ALTAS	2000	796.3
ALTAS	2008	854
ALTAS	1989	864.1
ALTAS	1993	1096.3
ALTAS	1990	1118
ALTAS	1992	1165.7
ALTAS	1994	1196.2
ALTAS	1991	1225.5

Fuente: La presente investigación.

Para el semestre B, los años eliminados del análisis por excesos de datos faltantes fueron 1986, 1994, 1995, 1996 y 2001, los valores de precipitación acumulada correspondieron a la sumatoria de la precipitación diaria comprendida entre el 5 de agosto y el 22 de noviembre de cada uno de los años contemplados. En la tabla 16 se aprecian los valores de precipitación y años comprendidos como normales, con excesos y déficits donde sobresalen los años con precipitaciones más bajas para el segundo semestre correspondientes a 2002, 2006 y 2003 y los años de los segundos semestres más altos en volúmenes de precipitación correspondientes a 1993, 1987 y 2009. Bajo estadísticas de FENALCE, el 52% de los agricultores siembran en el mes de agosto en el semestre B, como se muestra en el anexo 10.

Tabla 16: Regímenes hídricos, Semestre B, Puerto López, Meta.

REGIMEN	AÑO	Precipitación acumulada
BAJA	2002	215
BAJA	2006	386.8
BAJA	2003	470.4
BAJA	2004	539.4
BAJA	2010	604.6
BAJA	2014	607.1

BAJA	1997	623.8
BAJA	1991	625
NORMAL	1989	632
NORMAL	2000	636.2
NORMAL	2008	653
NORMAL	1998	692.6
NORMAL	2007	707
NORMAL	1988	710.6
NORMAL	2013	749.9
NORMAL	1992	753.8
ALTA	2011	768.1
ALTA	1990	773.1
ALTA	2012	785.6
ALTA	2005	790.6
ALTA	1999	912.9
ALTA	1993	1011.8
ALTA	1987	1037.1
ALTA	2009	1099.1

Fuente: La presente investigación.

### 3.3 AGRUPACION POR COMPONENTES PRINCIPALES - ACP

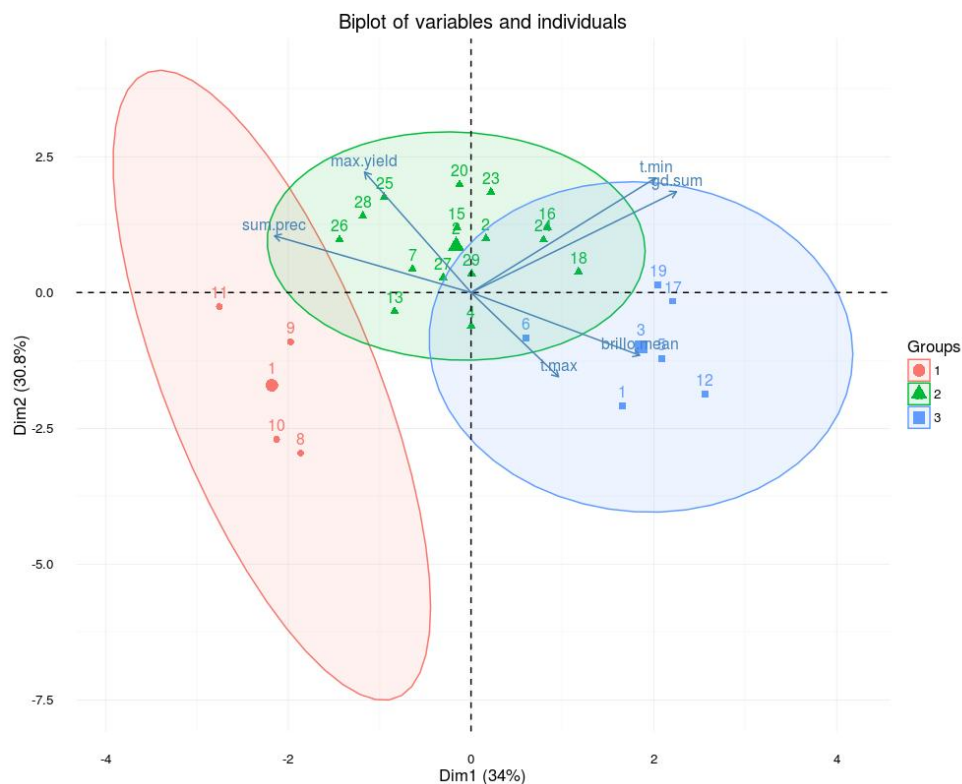
Para los dos (2) municipios objeto de estudio, el ACP fue usado para descubrir las relaciones entre las variables de precipitación acumulada (sum.prec), el rendimiento máximo obtenido (max.yield), temperaturas mínimas (t.min), la sumatoria de los grados día (gd.sum), el promedio del brillo en Córdoba (brillo.mean) y la temperatura máxima (t.max). Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

#### 3.3.1 Córdoba.

Los resultados del ACP de Córdoba indica que los dos primeros componentes principales explican el 64.8% de la variación de los datos. Podemos observar que la max.yiel posee una alta correlación con sum.prec y estas variables poseen valores opuestos a las variables brillo.mean y t.max. Esto implica que la variable que se encuentra más relacionada con el rendimiento es la precipitación y las variables que poseen una correlación negativa para el caso de Córdoba es el brillo y las altas temperaturas. El agrupamiento indicó 3 grupos, dentro de estos grupos se encontró una gran homogeneidad, los valores más altos de producción se encuentran en el clúster 2 y los valores más bajos se encuentran en el clúster 1. Como podemos observar los valores del clúster 2 se encuentran más cercanos a las variables de max.yield, descritas en la ilustración 13



Ilustración 13: ACP para las variables climatológicas de Ciénaga de Oro, Córdoba.

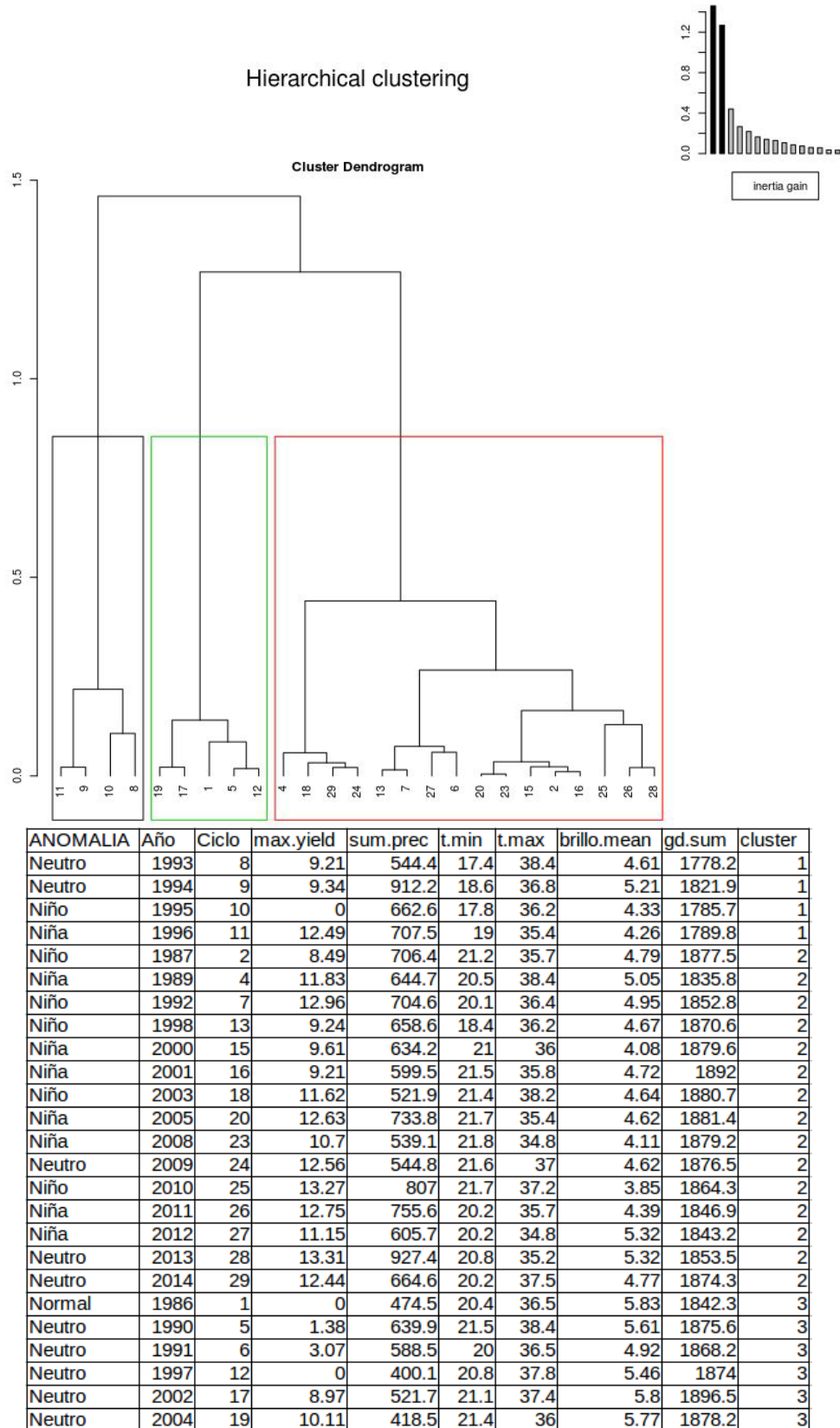


Fuente: La presente investigación.

Para realizar un análisis entre las tendencias de cada ciclo se realizó una comparación de los clúster con las temporadas de El Niño y La Niña. La comparación no se ajustó en su totalidad, pero se pueden ver comportamientos. El clúster 1 de Córdoba presentó un 50% de los datos en temporada neutra; el clúster 2 no presenta una homogeneidad clara y el clúster 3 presentó en su mayoría un agrupamiento de los ciclos con fenómenos neutros.

El ACP de esta zona permitió clasificar de una mejor manera los ciclos de cultivo teniendo en cuenta no solo el rendimiento sino otras variables importantes. Se pudo observar que los clústers presentan una relación con las anomalías. En la ilustración 14 se puede apreciar el dendrograma (gráficos que muestran las agrupaciones de las variables) con las agrupaciones de los grupos identificados en el proceso de construcción de los componentes principales para la serie 198-2014 en el municipio de Ciénaga de Oro, Córdoba, donde en conclusión los rendimientos se encuentran principalmente condicionado por las precipitaciones y limitado por las temperaturas

Ilustración 14: Dendrograma y cuadro de resultados de las agrupaciones obtenidas en el municipio de Ciénaga de Oro, Córdoba con fecha ideal de siembra de comienzos de Mayo.



*Fuente: La presente investigación.*

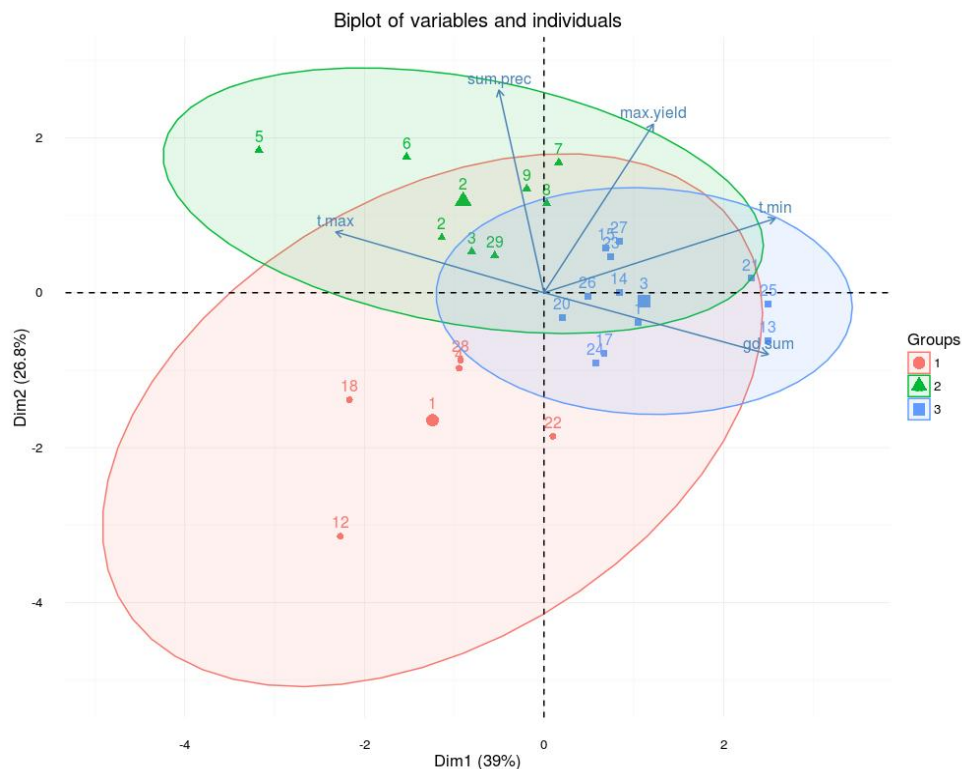
### **3.3.2 Meta.**

Los resultados del ACP para la región de Puerto López, demuestran que para el primer periodo los dos primeros componentes principales explican el 65.8% de la variación de los datos, y para el segundo periodo los dos primeros componentes explican el 70.3% respectivamente. Adicionalmente se aprecia que para el primer periodo la variable max.yield posee relaciones con sum.prec y t.min; en comparación en el segundo semestre se observa que la variable max.yield posee una alta correlación con sum.prec y posee un comportamiento opuesto a t.max.

Esto implica que el maíz sembrado en el segundo periodo en el Meta presentó un comportamiento similar al de Córdoba ya que el rendimiento expresado por la variable max.yield posee una alta correlación con la precipitación (sum.prec) y un comportamiento opuesto a las máximas de temperatura (t.max).

Esto quiere decir que en estas dos zonas: Córdoba y Meta en el segundo periodo el rendimiento se encuentra principalmente condicionado por las precipitaciones y limitado por las temperaturas. Meta en el primer periodo no presentó una variable con un comportamiento opuesto lo que nos puede indicar que el cultivo en esta zona posee un buen desarrollo, crecimiento y rendimiento. En la ilustración 15 se pueden apreciar los clústers encontrados explicando el 64% de la variación de la variable de rendimiento. Cabe resaltar que las anomalías corresponden a los terciles de ordenamiento de la precipitación acumulada para el periodo 1986-2014, ya que no se encontró un índice de variabilidad climática que afectara directamente las precipitaciones de esta región.

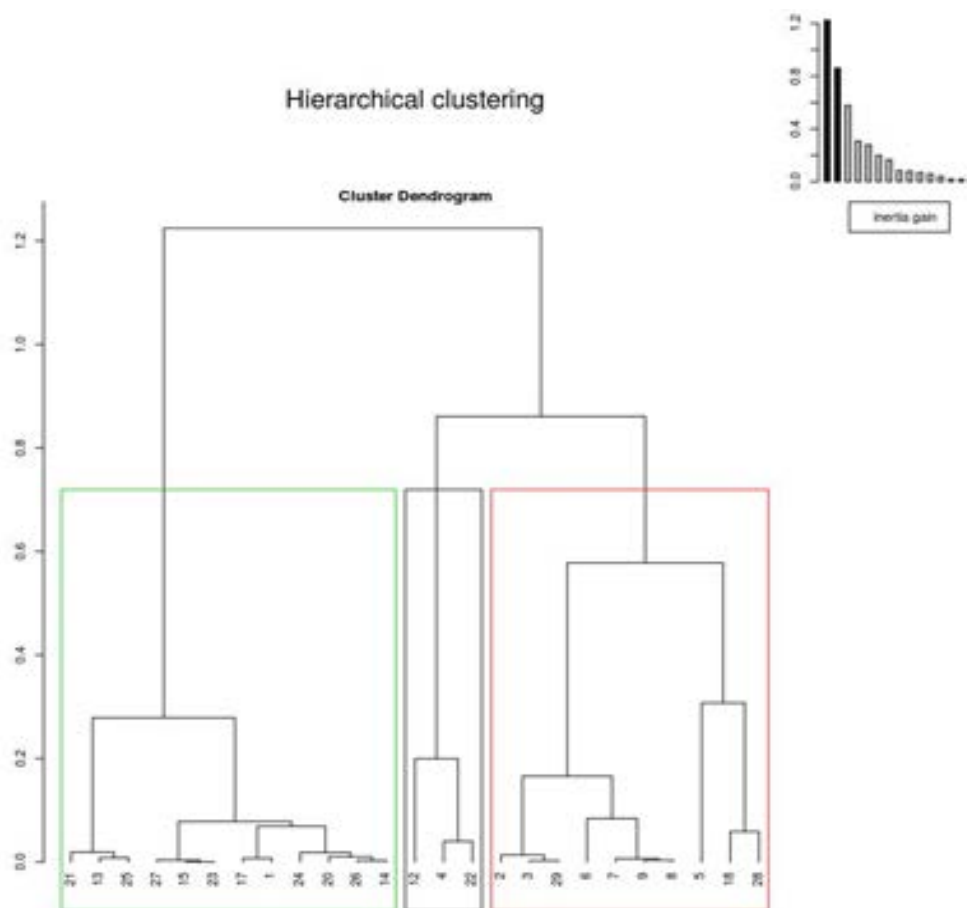
*Ilustración 15: ACP para las variables climatológicas de Puerto López, Meta. Semestre A.*



Fuente: La presente investigación.

A continuación, en la ilustración 16 se presenta el dendrograma y el cuadro de resultados para el semestre A de la región de Puerto López.

Ilustración 16: Dendrograma y cuadro de resultados de las agrupaciones obtenidas en el municipio de Puerto López, Meta con fecha ideal de siembra a comienzos de abril.



ANOMALIA			Ciclo	max.yield	sum.prec	t.min	t.max	gd.sum	cluster
ALTAS	1989	4	4	0	864.1	19.16	35.8	1734.1	1
BAJA	1997	12	12	0	392.2	16.31	35.4	1731.4	1
BAJA	2003	18	18	8.22	398.7	16.98	36.2	1713.8	1
BAJA	2007	22	22	0.04	517.7	20	35.4	1740.2	1
BAJA	2013	28	28	10.14	378.3	18.34	37.2	1757	1
NORMAL	1987	2	2	12.34	764.4	18.6	35.6	1691.8	2
NORMAL	1988	3	3	11.77	780.7	18.6	36	1722.3	2
ALTAS	1990	5	5	10.99	1118	17.84	38.6	1718.5	2
ALTAS	1991	6	6	10.55	1225.5	18.6	35.6	1688.7	2
ALTAS	1992	7	7	11.86	1165.7	19.6	35.6	1735.7	2
ALTAS	1993	8	8	11.33	1096.3	19	35.5	1744.1	2
ALTAS	1994	9	9	10.42	1196.2	19	35.6	1741.5	2
NORMAL	2014	29	29	12.57	667.4	19	36	1717.8	2
ALTAS	1986	1	1	8.4	786.4	19.37	35.1	1773.7	3
BAJA	1998	13	13	13.02	480.1	20	34.2	1775.6	3
BAJA	1999	14	14	12.68	547.5	19.72	35.4	1742.8	3
ALTAS	2000	15	15	12.38	796.3	19.55	35.5	1749.9	3
BAJA	2002	17	17	8.79	546.6	19.4	35	1744.9	3
BAJA	2005	20	20	12.56	534.2	18.7	35.6	1748.1	3
NORMAL	2006	21	21	12.84	727.2	20.2	35.4	1803.1	3
ALTAS	2008	23	23	12.39	854	19.08	35.3	1761.5	3
NORMAL	2009	24	24	8.9	559.2	18.94	35.9	1780.8	3
NORMAL	2010	25	25	12.57	730.2	19.8	34.2	1788.7	3
NORMAL	2011	26	26	12.69	610.3	19.01	35.5	1751	3
NORMAL	2012	27	27	12.35	607	20.8	36	1731.6	3

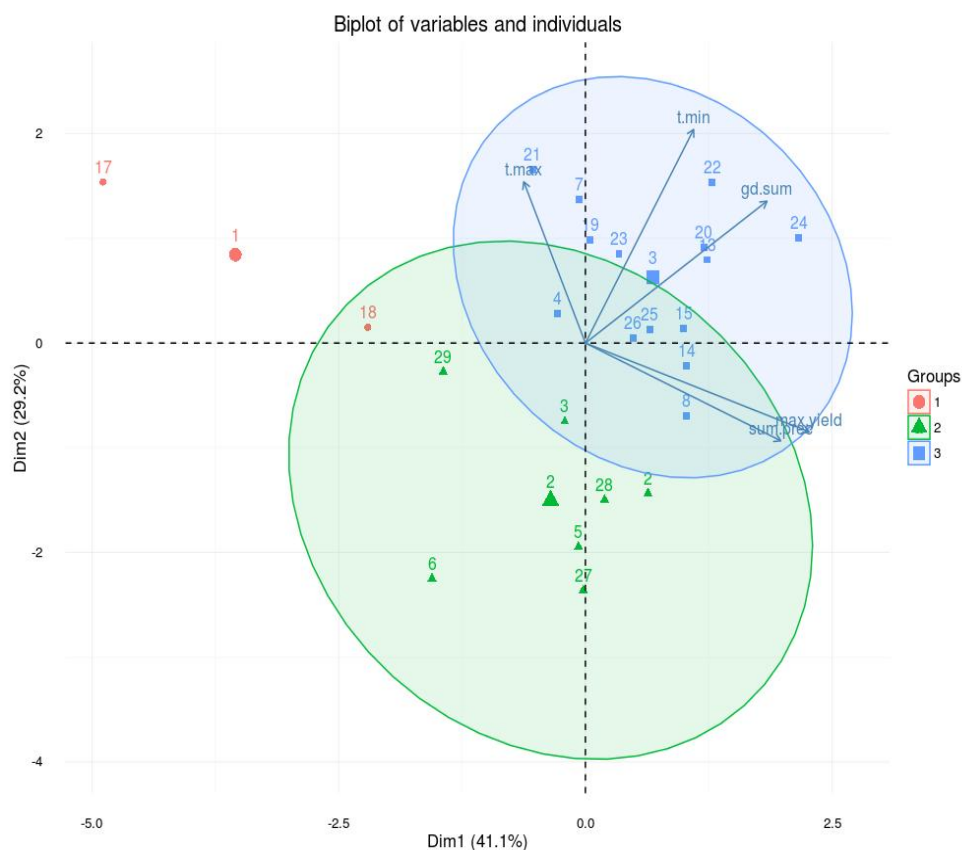
Fuente: La presente investigación.

Para el caso del Meta segundo periodo se presenta una clara diferenciación sólo en el clúster 1 ya que en este solo hay anomalías bajas, pero en los demás clústers no se puede ver un agrupamiento claro como en los casos anteriores.

En general, el comportamiento de los dos periodos de siembra en el Meta difiere ya que el primer periodo presenta mejores condiciones para su desarrollo en comparación con el segundo periodo de cultivo el cual se ve limitado por las altas temperaturas y las precipitaciones.

En la ilustración 17 se puede apreciar las agrupaciones encontradas para el segundo semestre de siembra de la región de Puerto López, estas agrupaciones explican el 70.3% de las variaciones, la fecha de siembra fue establecida a comienzos del mes de agosto.

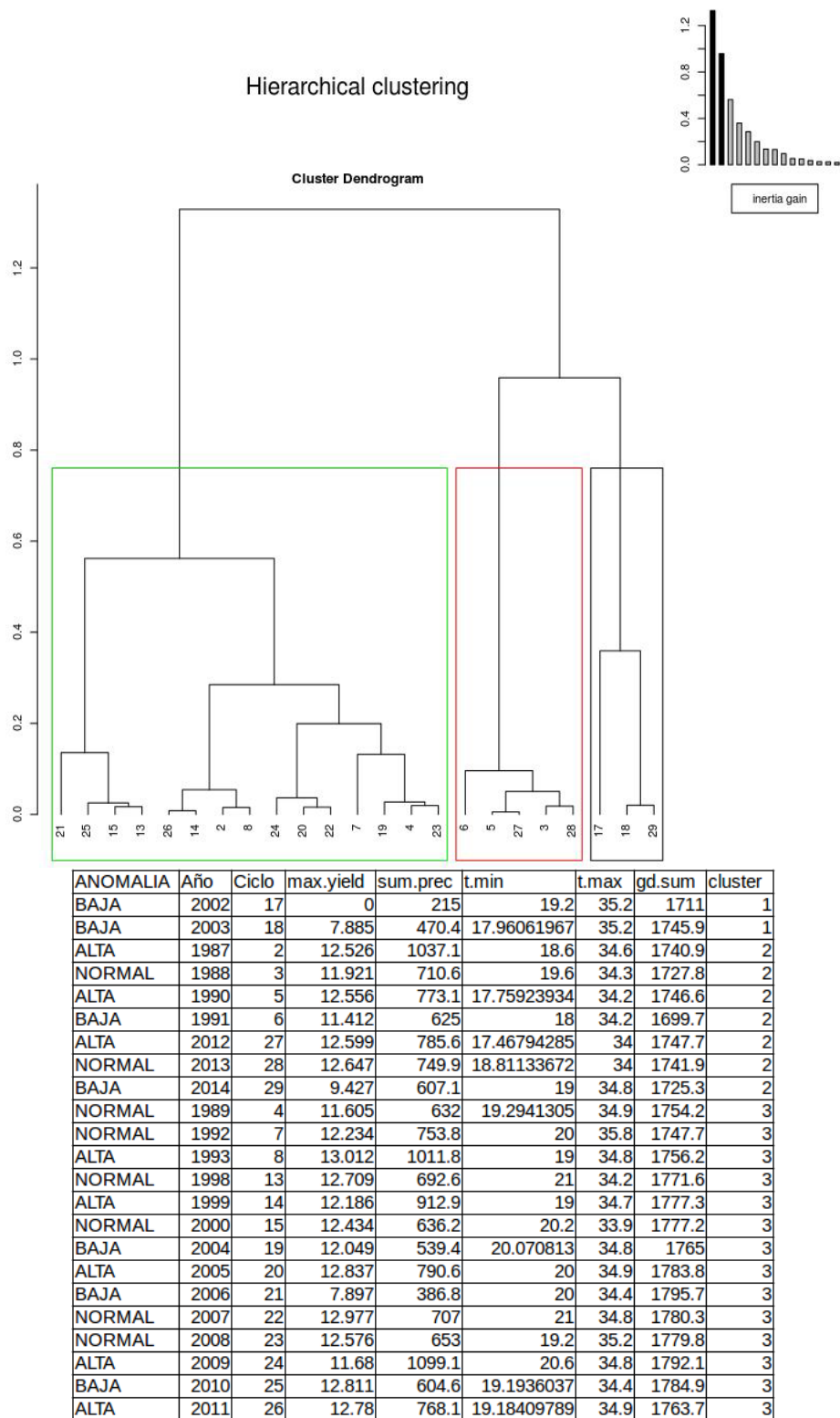
Ilustración 17: ACP para las variables climatológicas de Puerto López, Meta. Semestre B.



Fuente: La presente investigación.

La ilustración 18 muestra el dendrograma con las agrupaciones establecidas y el cuadro de resultados de las corridas del modelo agroclimático para la serie 1986-2014.

Ilustración 18: Dendrograma y cuadro de resultados de las agrupaciones obtenidas en el municipio de Puerto López, Meta con fecha ideal de siembra a comienzos de agosto.



Fuente: La presente investigación.

### **3.4 BALANCE HIDRICO Y CLASIFICACION CLIMATICA**

El cálculo del Balance Hídrico Climático, se realizó basándose en la metodología de Thornthwaite, esta metodología relaciona la Evapotranspiración potencial, la temperatura media, y hace un ajuste latitudinal que considera la duración de los días de acuerdo a su ubicación con respecto al ecuador; a partir de estos datos, se obtiene un panorama claro a lo largo del año donde se presentan los excesos hídricos, déficits hídricos, evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real. El Balance hídrico se desarrolló con el objetivo de observar si la oferta hídrica de cada una de las regiones donde se centra el estudio, suple los requerimientos hídricos del cultivo, y su dinámica con el uso de la reserva de agua en el suelo.

Para la obtención del Balance Hídrico Climático, se emplearon los valores de las normales climatológicas (series mensuales multianuales) de las regiones analizadas, a continuación se presentan los balances realizados con la normal climatológica 1981-2010:

#### **3.4.1 Balance Hídrico Thornthwaite, Ciénaga de Oro, Córdoba.**

El mes de inicio del balance hídrico de la región de Ciénaga de Oro, corresponde a septiembre, con un valor de 192 mm ya que según la climatología propia de la región es el mes que más precipitaciones registra y se asume que el suelo se encuentra en capacidad de campo. En general, la evapotranspiración real alcanza los 1.395 mm anuales, los excesos hídricos anuales fueron cuantificados en 0 mm año<sup>-1</sup>, y los déficits fueron cuantificados en 586 mm año<sup>-1</sup>. La precipitación promedio anual, se cuantificó en 1.370 mm año<sup>-1</sup>, siendo los meses con valores positivos de almacenamiento de agua en suelo mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre.

El déficit hídrico más importante se presenta en el primer trimestre del año, siendo el mes de marzo con 150 mm el que registra el mayor déficit, esto debido principalmente a la alta tasa valorativa de la temporada seca, comprendida entre los meses de diciembre, enero y febrero, donde las precipitaciones fueron calculadas en 81 mm año<sup>-1</sup>, versus 480 mm evaporados. Para el trimestre de agosto-septiembre-octubre no se registra déficit hídrico, ya que las precipitaciones son mayores a las evapotranspiraciones, en general el balance hídrico de la región presenta un volumen de agua neta de -586 mm, se confirma la necesidad de agregar riego a los diferentes cultivos.

La clasificación climática de la región de Ciénaga de Oro corresponde a un clima seco, sin excesos hídricos, con déficit en temporada seca, megatermal, estimada bajo la metodología de Thornthwaite.

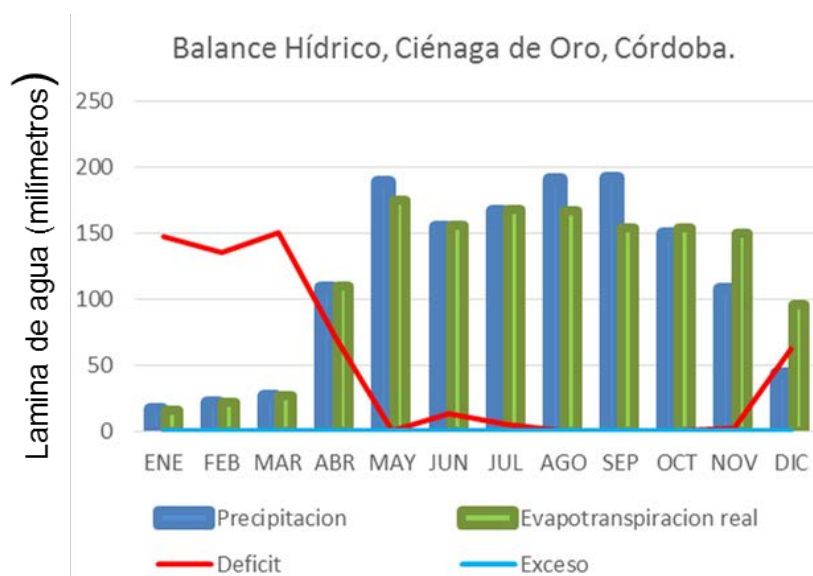


Tabla 17: Balance Hídrico Climático de Thornthwaite, Ciénaga de Oro, Córdoba.

	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	TOTALES
Precipitación	192.6	149.3	107.6	43.7	16.4	21.6	27.0	109.2	188.8	154.7	167.5	191.6	1369.9
ETP	154.0	154.0	152.0	159.0	164.0	157.0	177.0	180.0	175.0	170.0	173.0	167.0	1982.0
Temperatura	27.6	27.5	27.8	27.9	28.0	28.3	28.4	28.4	28.0	27.9	27.9	27.8	28.0
Índice de Calor (i)	13.2	13.2	13.4	13.5	13.6	13.8	13.9	13.9	13.5	13.5	13.5	13.4	162.4
Duración													
Máxima de Insolación (z)	12.1	12.2	11.6	12.0	12.0	11.0	12.2	12.4	13.0	12.6	13.0	12.7	
Déficit de humedad	38.6	-4.7	-44.4	-115.4	-147.6	-135.4	-150.0	-70.8	13.8	-15.3	-5.5	24.6	-612.1
Utilización del almacenamiento	0.0	4.7	42.3	53.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	0.6	0.0	
Almacenamiento													
ET Real	74.2	69.5	53.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.8	11.7	11.0	35.6	
DEF	154.0	154.0	149.9	96.6	16.4	21.6	27.0	109.2	175.0	156.8	168.1	167.0	1395.6
DEF	0.0	0.0	0.0	8.5	75.2	134.3	123.5	136.0	69.6	0.0	0.0	9.5	556.7
EXC	0.0	24.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.7
Índice de humedad	0.1	0.2	-0.1	-0.4	-0.7	-0.9	-0.9	-0.8	-0.4	0.0	0.0	-0.1	-4.0

Fuente: La presente investigación.

Gráfica 13: Balance Hídrico Climático de Thornthwaite normal climatológica 1981-2010, Ciénaga de Oro, Córdoba.



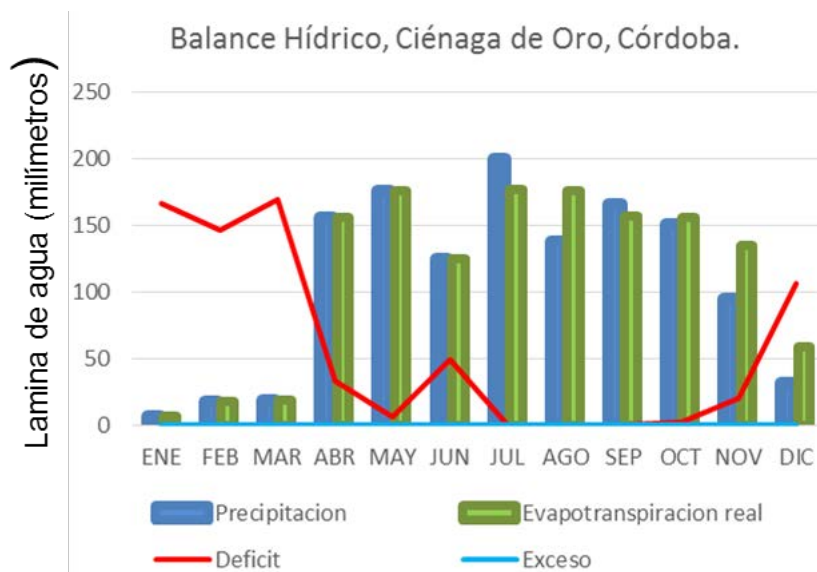
Fuente: La presente investigación.

### 3.4.1.1 Balance Hídrico Thornthwaite, Ciénaga de Oro, Córdoba; Evento ENSO El Niño

En el evento de variabilidad climática de El Niño, la climatología de la región se modifica de manera importante respecto a sus condiciones normales, en general las precipitaciones promedio para la región son de 1.280 mm año<sup>-1</sup>, dado que la temperatura media aumenta, la evapotranspiración potencial aumenta con valores medios de 2.055 mm año<sup>-1</sup>. No existen excesos hídricos y los déficits se calcularon en 699 mm año<sup>-1</sup>, aumentando en un 19% respecto a las condiciones normales; particularmente el trimestre más lluvioso cambia en comparación con la normal climatológica, siendo Julio-Agosto-Septiembre el que mayor

volumen hídrico presenta. En general los índices de humedad se vuelven más negativos, en la gráfica 13 se representa el Balance Hídrico Climático para la región de Córdoba.

Gráfica 14: Balance Hídrico Climático de Thornthwaite, Ciénaga de Oro, Córdoba, bajo escenario El Niño.

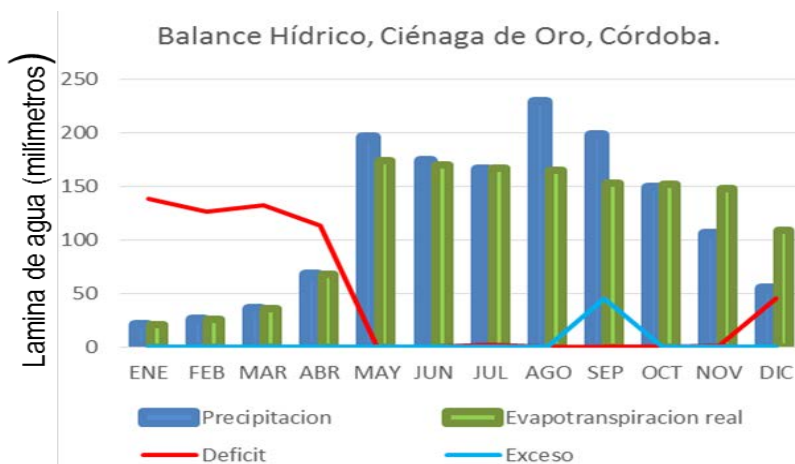


Fuente: La presente investigación.

### 3.4.1.2 Balance Hídrico Thornthwaite, Ciénaga de Oro, Córdoba; Evento ENSO LA Niña

La climatología de la región en promedio entre el periodo 1981-2014 bajo el escenario de variabilidad climática La Niña, muestra un leve aumento de las precipitación anuales con promedios de 1.420 mm, los descensos de la temperatura media hacen que la evapotranspiración potencial disminuya, El trimestre con más precipitaciones registradas corresponde a Julio-agosto-septiembre, donde en promedio mensual precipitan 198 mm, los déficits alcanzan los 559 mm año<sup>-1</sup>, bajo el evento La Niña, por primera vez se presentan excesos hídricos en el mes de septiembre, el agua neta fue calculada en -513 mm.

Gráfica 15: Balance Hídrico Climático de Thornthwaite, Ciénaga de Oro, Córdoba, bajo escenario La Niña.



Fuente: La presente investigación.

### 3.4.2 Balance Hídrico Thornthwaite, Puerto López, Meta.

Para la zona de Puerto López, Meta, el balance hídrico climático comenzó en el mes de mayores precipitación para a normal climatológica 1981-2010, que registró 330 mm en el mes de junio, donde se asume que el suelo se encuentra en capacidad de campo, la evapotranspiración real fue calculada en 1.313 mm año<sup>-1</sup>, los déficits hídricos, alcanzan un volumen de 352 mm año<sup>-1</sup>, donde el trimestre de diciembre-enero-febrero es el que más déficit reporta, siendo enero el mes con el volumen negativo más alto correspondiente a 147 mm, la temporada seca descrita en la climatología de la región es la única que registra déficits, para los otros meses del año el déficit es 0 mm; los excesos hídricos, se cuantificaron en 883 mm, siendo el trimestre de mayo-junio-julio el que más excesos reporta, con un total de 548 mm, este balance de excesos y déficits hídricos generan en la región del Meta un volumen de agua neta de 531 mm.

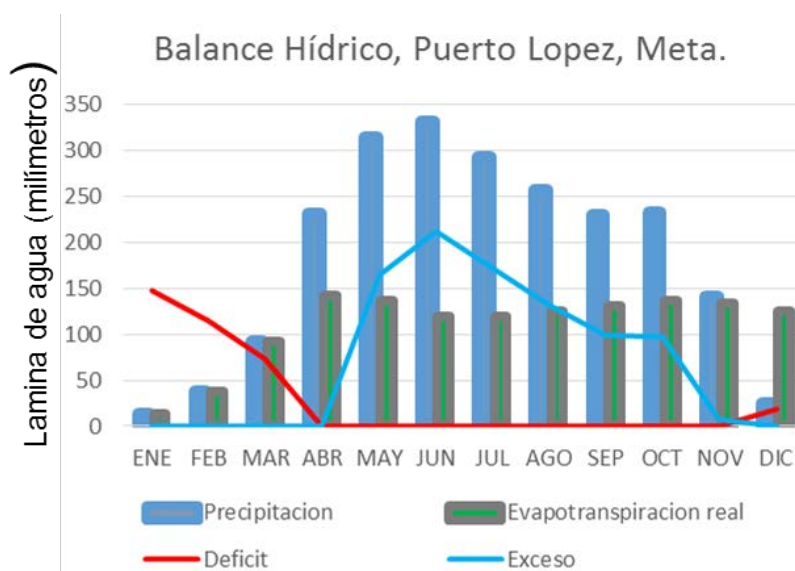
Bajo la metodología de Thornthwaite, la clasificación climática de la región de Puerto López corresponde a Semihumedo, con exceso hídrico moderado, megatermal.

Tabla 18: Balance Hídrico Climático de Thornthwaite, Puerto López, Meta.

	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	TOTALES
Precipitación	330.4	291.9	257.2	230.2	232.7	140.7	25.6	13.8	37.9	92.4	230.8	313.9	2197.7
ETP	119.0	120.0	125.0	131.0	136.0	133.0	144.0	161.0	152.0	165.0	143.0	137.0	1666.0
Temperatura	25.5	25.4	25.7	26.3	26.5	26.6	26.9	27.8	28.0	27.9	26.9	26.3	26.6
Índice de Calor (i)	11.8	11.7	11.9	12.4	12.5	12.6	12.8	13.4	13.6	13.5	12.8	12.4	151.2
Duración Máxima de Insolación (z)	12.4	12.7	12.6	12.1	12.4	11.9	12.2	12.2	11.2	12.4	12.2	12.7	
Déficit de humedad	211.4	171.9	132.2	99.2	96.7	7.7	-118.4	-147.2	-114.1	-72.6	87.8	176.9	531.7
Utilización del almacenamiento	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Almacenamiento	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	87.8	100.0	
ET Real	119.0	120.0	125.0	131.0	136.0	133.0	125.6	13.8	37.9	92.4	143.0	137.0	1313.8
DEF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.4	147.2	114.1	72.6	0.0	0.0	352.2
EXC	211.4	171.9	132.2	99.2	96.7	7.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	164.7	883.9
Índice de humedad	1.8	1.4	1.1	0.8	0.7	0.1	-0.8	-0.9	-0.8	-0.4	0.6	1.3	4.8

Fuente: La presente investigación.

Gráfica 16: Balance Hídrico Climático de Thornthwaite, Puerto López, Meta. Normal Climatologica.

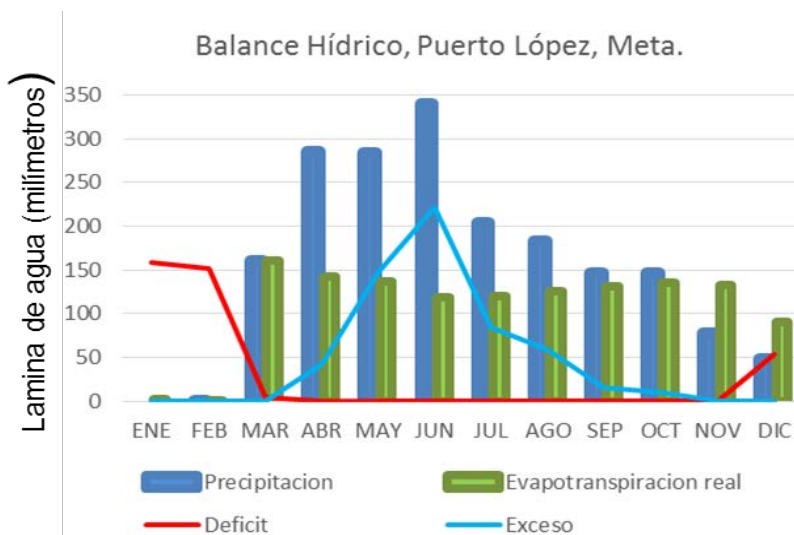


Fuente: La presente investigación.

### 3.4.2.1 Balance Hídrico Thornthwaite, Puerto López, Meta; Años por debajo de lo normal

Para calcular los años con precipitaciones por debajo y por encima de lo normal, con la información de la serie temporal 1986-2014 de precipitación dividida en terciles, de este modo, el tercil uno (1) correspondió a los años más secos, el tercil dos (2) a los años con precipitaciones entre lo normal y el tercil tres (3) para los años con mayores precipitaciones, en este sentido, para los años con precipitaciones por debajo de lo normal, el comportamiento climático muestra que las precipitaciones se pueden llegar a reducir hasta un 17%, en general para el municipio la precipitación promedio año<sup>-1</sup> fue calculada en 1878 mm, el trimestre con los mayores excesos hídricos es abril-mayo-junio con promedios mensuales de precipitación de 303 mm, estos excesos alcanzan un valor de 580 mm, por otro lado los déficits se calculan en 367 mm, lo que genera un valor promedio anual de 211 mm de agua neta.

Gráfica 17: Balance Hídrico Climático de Thornthwaite, Puerto López, Meta. Periodos por debajo de las precipitaciones normales.

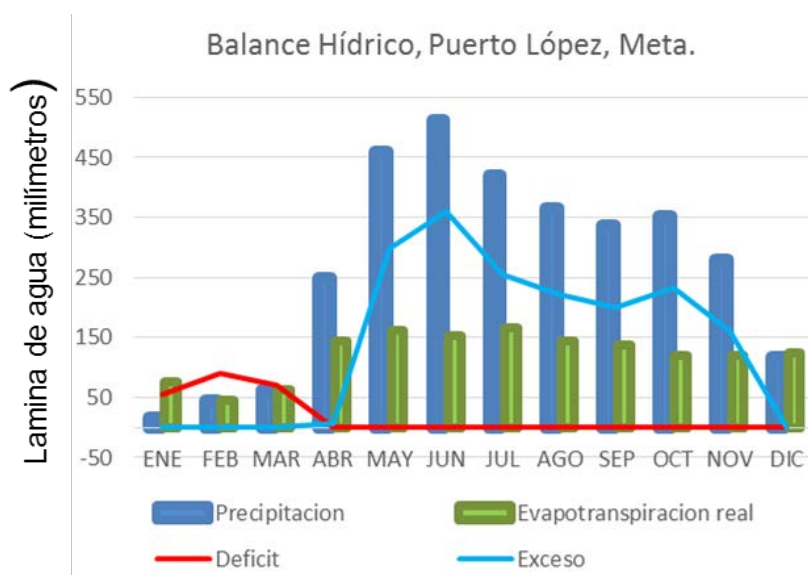


Fuente: La presente investigación.

### 3.4.2.1 Balance Hídrico Thornthwaite, Puerto López, Meta; Años por encima de lo normal

El tercil que agrupa los años con mayores volúmenes de agua precipitada, muestra precipitaciones promedio de 3.220 mm año<sup>-1</sup>, el trimestre mayo-junio-julio es el más lluvioso con volúmenes promedio de 46 mm, el mes de junio el mes más húmedo, en contraste, la evapotranspiración real se calcula en 1.450 mm. Por otro lado, los excesos hídricos fueron calculados en 1.736 mm distribuidos en las temporadas de lluvias, los déficits alcanzan tan solo los 216 mm año<sup>-1</sup>, siendo tan solo el primer trimestre del año el que reporte balances hídricos negativos, lo que genera un volumen de agua neta de 1.520 mm año<sup>-1</sup>.

Gráfica 18: Balance Hídrico Climático de Thornthwaite, Puerto López, Meta. Por encima de las precipitaciones normales.



Fuente: La presente investigación.

## 4. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

De acuerdo a lo sugerido por las fechas de siembra de FENALCE, fueron simulados 29 años de corridas para la región de Córdoba, las cuales, según estadísticas nacionales solamente se presenta la fecha de siembra en el primer semestre del año, bajo ese punto, las corridas se generaron con la fecha de inicio a los primeros días del mes de mayo, como se detalló en capítulos anteriores, la variable de precipitación no se completó las series por inconsistencias en el modelo que generaba datos subestimados, razón por la cual fueron eliminados algunos años que no reportaban series confiables por ausencia de datos, y podrían generar ruido estadísticos y datos modelados con una gran incertidumbre.

De este modo, las modelaciones con la fecha “ideal” de siembra se compararon entre sí para la serie 1986-2014 con un índice de anomalía descrito en la ecuación 12, tomado del estudio económico del DNP.

Ecuación 12: Índice de anomalía

$$I A = \frac{\left( \text{Valor del rendimiento del año } i - \bar{x} \text{ del rendimiento de la serie} \right)}{\bar{x} \text{ del rendimiento de la serie}} \quad \text{Ecuación [12]}$$

Una vez aplicado el índice de anomalía para la serie de las modelaciones con las fechas de siembra más probables de acuerdo a lo registrado por FENALCE correspondiente en este caso para la región de Córdoba a inicios de mayo, se obtiene la categorización de los años con mejores rendimientos en comparación con la serie. Como ya fue identificado el riesgo agroclimático para el municipio de Ciénaga de Oro, que en general correspondió al riesgo condicionado por precipitaciones y limitado por temperaturas máximas, las corridas con el modelo AQUACROP nos confirmaron este agrupamiento, teniendo en cuenta que los índices de anomalías negativos, correspondientes a años con precipitaciones más bajas generaron en algunos casos modelados, muerte del cultivo.

De acuerdo a la climatología de la región, se establecieron para la zona del municipio de Ciénaga de Oro dos (2) fechas claramente definidas, correspondientes a la temporada seca comprendida entre diciembre a febrero y a la temporada de lluvias correspondiente a los meses de mayo a octubre, adicionalmente los meses de abril y noviembre se catalogan como meses de transición entre las 2 temporadas, una vez establecida esta variación intra-anual de la distribución de las precipitaciones, se analizó la variación interanual de la serie por medio de un análisis de tele-conexión, lo que demostró una correlación directa en la variación de las precipitaciones y el índice de variabilidad climática ENSO Región 1+2.

Los análisis por componentes principales ACP, permitieron identificar las amenazas de origen meteorológico que incidían directamente en los rendimientos del maíz para la zona, lo que demostró de manera directa que la relación entre las variables de precipitación y temperaturas máximas explicaban el 64% de las variaciones entre los rendimientos; de esta manera se pudo establecer que en los eventos ENSO la dinámica del balance hídrico climático se veía afectada, fue así como, comparando con los valores de la normal climatológica, que reporta precipitaciones promedio año<sup>-1</sup> de 1.370 mm, en eventos El Niño las precipitaciones disminuyen a 1.280 mm año<sup>-1</sup>, que si bien no representa un gran volumen de agua menos a lo normal, si aumenta su evapotranspiración potencial por efecto del aumento de las temperaturas, generando un balance de agua negativo de 700 mm al año versus 586 en el periodo normal, cabe resaltar que en la serie modelada se identificaron los años en los que El Niño prevaleció, se puede observar que si bien la oferta hídrica es menor comparado con la normal climatológica, los rendimientos fueron muy parecidos al promedio de la serie 1986-2014, inclusive se puede apreciar que están 2.4% por encima de la misma, esto se debe muy probablemente a que en los eventos ENSO positivos la radiación es mayor.

Por otro lado los eventos ENSO con anomalías negativas conocidos como La Niña, favorecen los rendimientos para el municipio de Ciénaga de Oro hasta en un 24% según datos

modelados, analizando los balances hídricos de la región, se observa un aumento promedio de las precipitaciones con un valor de 1.420 mm, por primera vez en la región se presentan excesos hídricos, ya que la climatología normal no los reporta, si bien el balance de agua neta sigue siendo negativo, el déficit se calculó bajo estos eventos en 513 mm año<sup>-1</sup>, se observa como esta oferta hídrica en la región de Ciénaga de Oro incide favorablemente en el cultivo del maíz.

Los eventos Neutrales de la fase ENSO, muestran en general anomalías negativas de rendimientos modelados respecto a la serie 1986-2014; en general esta disminución se cuantifico con fechas de siembra ideales en un 19.5%; es importante resaltar que los rendimientos más bajos de esta fase se presentaron en los años iniciales de la serie, destacándose los años 1986 y 1997 con rendimientos modelados de 0, lo que indica que bajo esas condiciones climáticas el cultivo no tuvo un desarrollo, esto se contrarresta con los altos rendimientos de los últimos años de la serie generada (2009, 2013 y 2014) cuyos rendimientos más altos (inclusive por encima del 45% del rendimiento normal), esto nos podría indicar que los productores están ejerciendo prácticas agrícolas que mitigan la oferta climática negativa en los cultivos.

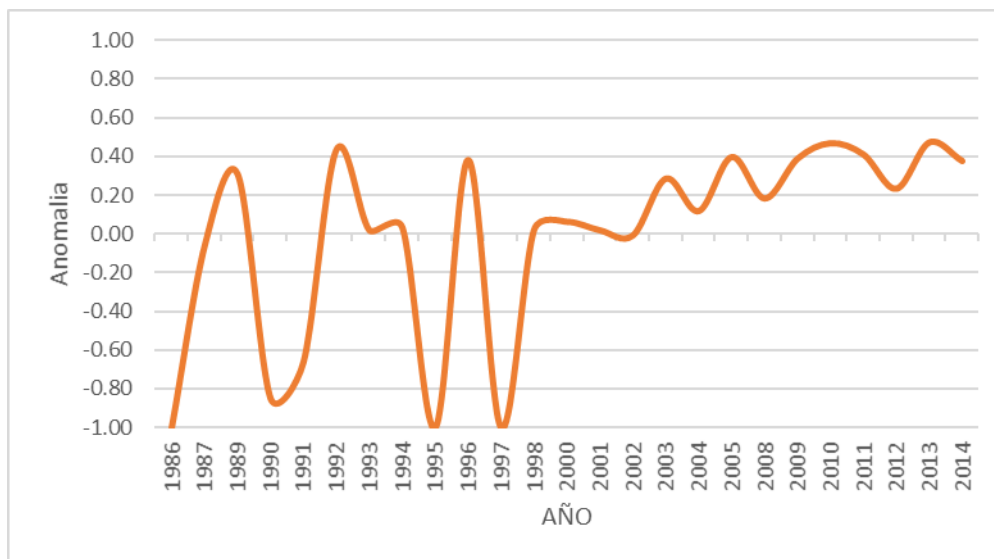
En la tabla 19 y la ilustración 20 se muestran los índices de anomalías para toda la serie 1986-2014, resaltando en la tabla los eventos positivos, negativos y neutrales del índice de variabilidad climática ENSO.

Tabla 19. Valores del Índice de anomalías en rendimientos de maíz variedad HIBRIDO COMERCIAL generados para el municipio de Ciénaga de Oro, Córdoba. Serie 1986-2014

AÑO	IA	AÑO	IA	AÑO	IA
1986	-1.00	1996	0.38	2005	0.39
1987	-0.06	1997	-1.00	2008	0.18
1989	0.31	1998	0.02	2009	0.39
1990	-0.85	2000	0.06	2010	0.47
1991	-0.66	2001	0.02	2011	0.41
1992	0.43	2002	-0.01	2012	0.23
1993	0.02	2003	0.28	2013	0.47
1994	0.03	2004	0.12	2014	0.37
1995	-1.00				

Celdas naranjas, fase El Niño; Celdas azules, fase La Niña; Celdas blancas, fase neutra del Índice ENSO Fuente: Elaboración propia

Ilustración 19. Índice de Anomalías en rendimientos de maíz variedad HIBRIDO COMERCIAL generados para el municipio de Ciénaga de Oro, Córdoba. Serie 1986-2014



Fuente: La presente investigación.

De acuerdo con el análisis del riesgo agrometeorológico, se determinaron estrategias de mitigación que van directamente relacionadas con la fecha más probable de siembra, como lo reportado por Román, (2016); en este sentido se tomó la fecha de siembra “ideal” y se simularon fechas adelantadas y atrasadas respecto a la ideal como se aprecia en la ilustración 21.

Ilustración 20. Estrategias de siembra empleadas en las simulaciones para la región de Ciénaga de Oro, Córdoba.



Flecha verde, fecha óptima de siembra. (FENALCE) Fuente: Elaboración propia.

Para Córdoba en general, se observa que las simulaciones del cultivo, tal como lo reportó Cortes, 2012, se ajustan muy bien a la realidad, debido a que los mejores rendimientos evidentemente se presentan a inicios del mes de mayo, en comparación con las otras fechas, en general todas las fechas propuestas previas y posteriores a la fecha ideal, fueron negativas. Para los índices de anomalías con temporalidades de diferentes eventos de ENSO se aprecia que para la fase El Niño si se adelanta la fecha de siembra a finales de abril, los rendimientos podrían aumentar hasta en un 22% según datos modelados, a diferencia de sembrar a inicios de abril, los rendimientos podrían reducirse hasta en un 60% por la baja oferta hídrica. En la fase La Niña como se nombró en puntos anteriores tuvo en general rendimientos óptimos (por encima del 24%), si se juega con las fechas de siembra en esta fase ENSO los rendimientos se ven afectados negativamente (hasta un 54%), bajo este punto como resultado obtenido no se aconseja modificar la fecha de siembra ideal, el mismo resultado se obtuvo para la fase



Neutral del índice ENSO. En la tabla 20 se muestran los valores de los índices de anomalías para la serie 1986-2014 con las diferentes fechas de siembras que se modelaron.

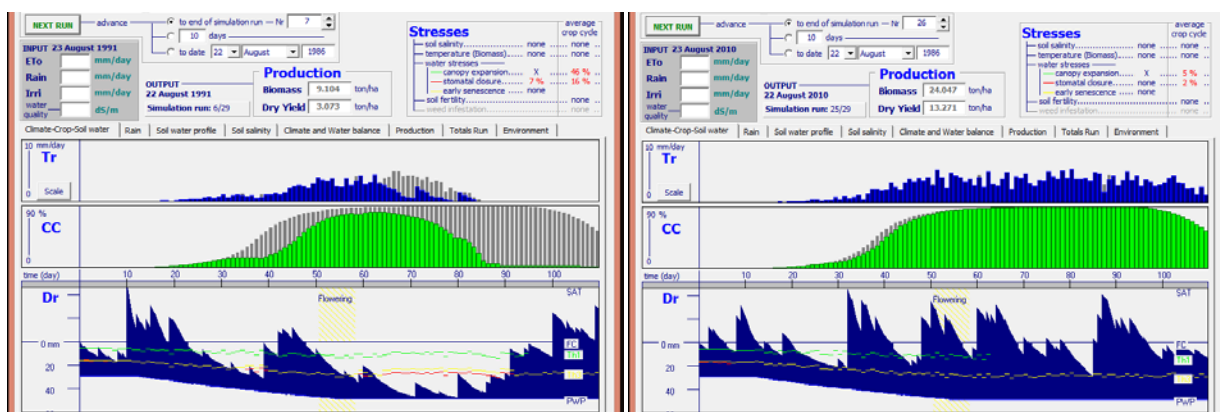
Tabla 20. Valores del Índice de anomalías en rendimientos de maíz variedad HIBRIDO COMERCIAL generados para el municipio de Ciénaga de Oro en diferentes fechas de siembra. Córdoba. Serie 1986-2014

AÑO	Inicio de abril	Finales de abril	Inicio de mayo	Finales de Mayo
1986	0.14	-1.00	-1.00	-0.46
1987	-1.00	-0.04	-0.06	-1.00
1989	-1.00	-1.00	0.31	0.31
1990	-0.34	-0.63	-0.85	-1.00
1991	-1.00	-1.00	-0.66	-1.00
1992	-1.00	0.38	0.43	0.34
1993	-1.00	0.26	0.02	-1.00
1994	-1.00	0.14	0.03	0.07
1995	-1.00	0.09	-1.00	0.38
1996	-1.00	0.32	0.38	0.40
1997	-1.00	-1.00	-1.00	0.06
1998	0.05	0.12	0.02	0.10
2000	-1.00	0.28	0.06	-0.15
2001	-0.27	-0.12	0.02	-0.99
2002	-1.00	-1.00	-0.01	-0.26
2003	0.36	0.41	0.28	-1.00
2004	-1.00	-1.00	0.12	0.17
2005	-1.00	0.35	0.39	0.45
2008	-1.00	0.19	0.18	-1.00
2009	0.17	0.42	0.39	-1.00
2010	-1.00	0.41	0.47	0.39
2011	0.08	-1.00	0.41	0.46
2012	0.43	0.30	0.23	0.22
2013	0.47	0.47	0.47	-1.00
2014	-1.00	0.40	0.37	0.33
Promedios	-0.60	-0.13		-0.25

Celdas naranjas, fase El Niño; Celdas azules, fase La Niña; Celdas blancas, fase neutra del Índice ENSO, columna verde correspondiente a la fecha ideal de siembra. Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 22, se aprecian 2 salidas generadas para un año con índices bajos de precipitación (izquierda) y otra simulación para un periodo con índices altos de precipitación (derecha), se aprecia en la imagen de la izquierda un estrés hídrico en la fase de florecencia del cultivo, lo cual generó una expansión del dosel de tan solo el 46% lo que ocasionó rendimientos bajos la salida corresponde al año 1991, en la imagen de la derecha se aprecia la salida del año 2010 con condiciones hídricas óptimas.

Ilustración 21. Salidas de Aquacrop con 2 años contrastantes de oferta hídrica. Ciénaga de Oro, Córdoba.



Izquierda, estrés hídrico, Derecha, oferta hídrica óptima. Fuente: elaboración propia, tomado de salidas del modelo AQUACROP.

De acuerdo a la climatología propia de la zona, para el primer semestre en la región de Puerto López, el trimestre enero-febrero-marzo cuenta con balances hídricos negativos, lo que genera la gran parte de los déficits hídricos en todo el año, evidentemente este trimestre no es apto para siembras de maíz por la ausencia de precipitaciones con déficits hídricos calculados en 338 mm, en el trimestre de abril-mayo-junio se esperan grandes volúmenes de agua precipitada generando excesos (375 mm), en general se puede concluir que para el primer semestre bajo la normal climatológica el balance neto de agua es 0, lo que indica que no hay ni excesos ni déficits. Para los años con promedios de precipitación por debajo de lo normal, se evidencia una disminución importante de precipitación en los meses del primer trimestre, generando déficits de 367 mm, para este semestre es importante resaltar que el agua neta puede alcanzar valores negativos, ya que los excesos no cubren los déficits hídricos. En condiciones por encima de lo normal, los meses de mayo y junio precipita grandes volúmenes de agua que en promedio se calculan en  $460 \text{ mm mes}^{-1}$ , si bien existe un déficit para el primer trimestre del año los excesos son mucho mayores, generando en el suelo una saturación de agua en los meses de mayo y junio, el balance de agua neta se calcula para el primer semestre en 450 mm de excesos.

Para el primer semestre del departamento del Meta, la fecha “ideal” de siembra se reportó en el inicio de abril, las estrategias de siembra para simular ciclos de cultivo fue modificar previo o posterior a inicios de abril como se muestra en la ilustración 23.

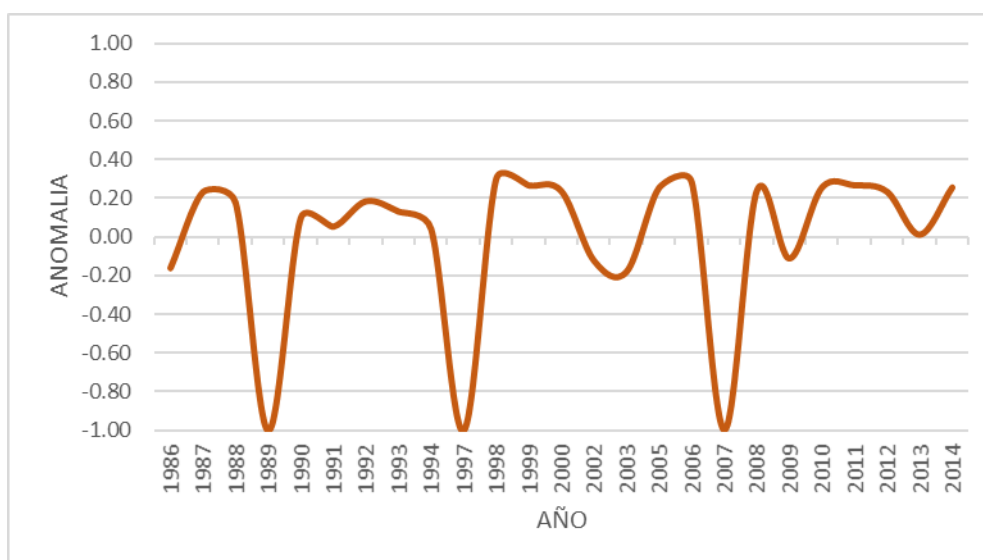
Ilustración 22. Estrategias de siembra empleadas en las simulaciones para la región de Puerto López, Meta. Semestre A



Flecha verde, fecha óptima de siembra. (FENALCE) Fuente: Elaboración propia.

Los rendimientos ideales, se generaron para la fecha más probable de siembra, donde se obtuvieron las anomalías de los rendimientos. De acuerdo a los análisis de tele-conexiones no se identificó ningún índice de variabilidad climática que incidiera en las variaciones de las precipitaciones a escala inter-anual, por este motivo como se clasificaron los semestres A de la serie 1986-2014 en terciles de precipitación bajos, normales y altos; mediante esta clasificación se agruparon los años de acuerdo a la oferta climática, en la ilustración 24, se aprecian los índices de anomalías de rendimientos para la serie.

Ilustración 23. Índice de Anomalías en rendimientos de maíz variedad HIBRIDO COMERCIAL generados para el municipio de Puerto López, Meta, semestre A. Serie 1986-2014



Fuente: La presente investigación.

Como se puede observar en la tabla 21, los rendimientos en diferentes épocas se compararon con los rendimientos ideales, que correspondieron a la temporalidad de inicio de abril, se podría concluir que los primeros semestres de la primera parte de la serie generada correspondieron a periodos por encima de lo normal (1986-1994), para los años entre 1997 y 2007 predominaron los periodos secos y para el último tercio las precipitaciones se registraron normales con respecto a la serie.

En general para los periodos de altas precipitaciones se puede concluir que, si bien en la fecha ideal de siembra (Comienzo de abril) los rendimientos no tienen una anomalía que destacar (-0.02%), si es importante que una siembra tardía (Finales de abril) podría generar aumentos en los rendimientos hasta en un 17%, esto es muy importante para los productores ya que con correctas predicciones climáticas pueden planificar sus siembras para mejorar los ingresos económicos del cultivo. Las corridas del modelo mostraron en el caso contrario, que en temporalidades con precipitaciones por encima de lo normal para el semestre A, no se recomienda adelantar las fechas de siembra, esto relacionado específicamente a que los excesos hídricos influyen negativamente en el desarrollo de la planta, generando rendimientos de hasta 57% menos que el normal de la serie.

Para los periodos con precipitaciones por debajo de lo normal, las fechas ideales de siembra muestran que los rendimientos se encuentran por debajo de la normal de la serie en un 18%, este índice de anomalía se puede mejorar con una siembra tardía en periodos con anomalías negativas en las precipitaciones, si los productores emplean la estrategia de sembrar a finales de abril o incluso inicios de mayo, podrían generar aumentos en los rendimientos de hasta un 10%. Para los periodos con temporalidades normales de precipitación, se puede observar que los rendimientos son más altos que en las otras 2 condiciones hídricas (por debajo y por encima de lo normal), esto indica que las condiciones neutras, ofrecen al cultivo condiciones de confort respecto a la oferta climática, cabe resaltar que en la fecha ideal de siembra estos rendimientos se encuentran 20% por encima de la serie, y a diferencia de las condiciones con excesos o déficits hídricos, no se debe modificar el calendario de siembra, ya que los rendimientos en las fechas más probables de siembra son los óptimos.

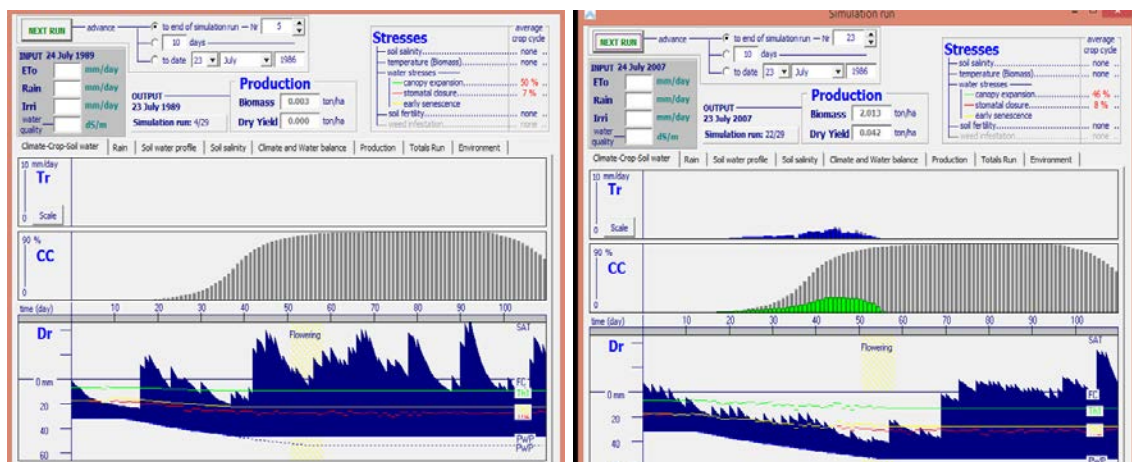
Tabla 21. Valores del Índice de anomalías en rendimientos de maíz variedad HIBRIDO COMERCIAL generados para el municipio de Puerto López en diferentes fechas de siembra. Serie 1986-2014 semestre A

AÑO	Inicio de marzo	Finales de marzo	Inicio de abril	Finales de abril
1986	-1.00	-1.00	-0.16	-0.50
1987	0.07	-1.00	0.24	0.21
1988	-1.00	0.17	0.18	0.26
1989	-1.00	-1.00	-1.00	0.20
1990	0.12	-1.00	0.10	0.16
1991	-1.00	-1.00	0.06	-0.02
1992	-1.00	-1.00	0.19	0.16
1993	0.03	-1.00	0.13	0.17
1994	0.07	0.03	0.04	0.18
1997	-1.00	-1.00	-1.00	0.14
1998	0.27	0.30	0.30	0.29
1999	0.22	0.31	0.27	0.24
2000	0.00	0.17	0.24	0.28
2002	0.08	-0.10	-0.12	-0.07
2003	-1.00	-0.47	-0.18	-0.10
2005	-1.00	0.34	0.26	0.24
2006	0.26	0.26	0.29	0.26
2007	-1.00	-0.98	-1.00	0.02
2008	0.25	0.24	0.24	0.27
2009	0.21	0.01	-0.11	-0.05
2010	0.17	0.33	0.26	0.26
2011	0.17	0.27	0.27	0.25
2012	0.04	0.06	0.24	0.22
2013	-1.00	-1.00	0.01	0.09
2014	0.26	0.26	0.26	0.26
Promedios	-0.31	-0.31		0.14

Celdas naranjas, Periodos con precipitaciones por debajo de lo normal; Celdas azules, Periodos con precipitaciones por encima de lo normal; Celdas blancas, Periodos con precipitaciones normales, columna verde correspondiente a la fecha ideal de siembra. Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 25 se pueden observar 2 salidas de modelación para 2 años contrastantes, la imagen de la izquierda corresponde a la simulación en la fecha ideal de siembra del año 1986, con excesos hídricos durante todo el periodo de ciclo del cultivo, la imagen de la derecha corresponde a la salida de un periodo con déficit hídrico correspondiente al año 2007, cabe resaltar la baja oferta hídrica durante los primeros estados fenológicos del cultivo.

Ilustración 24. Salidas de Aquacrop con 2 años contrastantes de oferta hídrica. Puerto López, Meta. Semestre A.



Izquierda, exceso hídrico, Derecha, déficit hídrico. Fuente: elaboración propia, tomado de salidas del modelo AQUACROP.

Para la región del municipio de Puerto López, se generaron para el segundo periodo las climatologías de la zona y los balances hídricos climáticos que nos permiten identificar riesgos de origen meteorológico, bajo este punto tenemos que el segundo semestre de año, normalmente se caracteriza por tener grandes volúmenes de precipitación, que generan un balance positivo de agua neta calculado en 490 mm, las temporadas de bajas precipitaciones se calculó que las precipitaciones se pueden reducir hasta en un 17% si llegar a balances negativos hídricos durante el semestre, por otro lado es importante recalcar que en las temporadas con anomalías por encima de lo normal el volumen precipitado genera excesos hídricos de hasta 1.000 mm para el segundo periodo.

La fecha de siembra ideal, se estableció bajo estadísticas de FENALCE para el semestre B a inicios de agosto, en este sentido se generaron corridas para finales de julio, finales de agosto y comienzos de septiembre, para la serie 1986-2014, donde fueron eliminados algunos años como se explica en puntos anteriores. En la ilustración 26 se muestra la estrategia de cuadrar temporalmente las corridas en el modelo agroclimático.

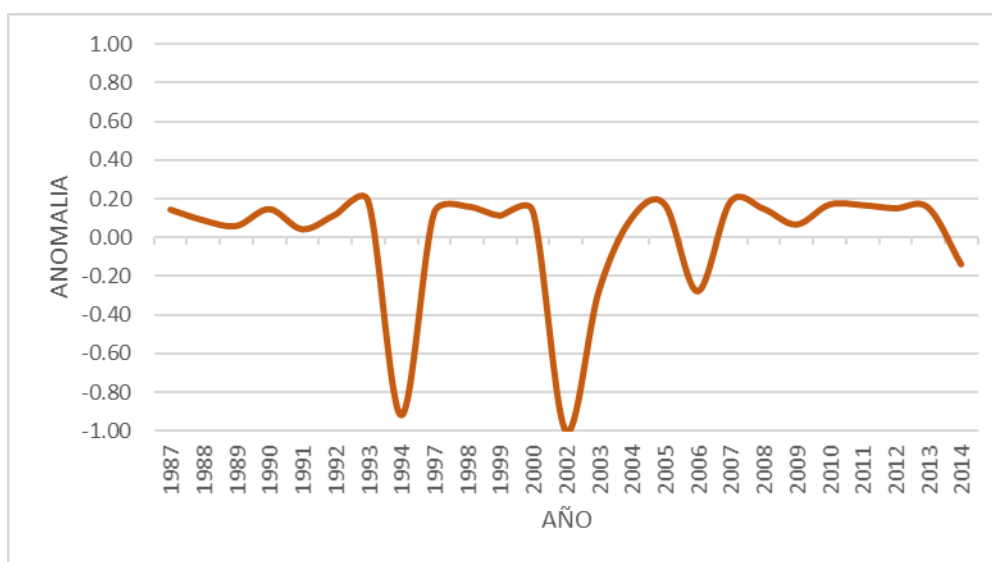
Ilustración 25. Estrategias de siembra empleadas en las simulaciones para la región de Puerto López, Meta. Semestre B



Flecha verde, fecha óptima de siembra. (FENALCE) Fuente: Elaboración propia.

Una vez generadas las corridas bajo las fechas indicadas en la ilustración anterior, fueron generadas para las fechas ideales de siembra las anomalías para cada uno de los años simulados, bajo este punto podemos observar variaciones en las precipitaciones que podemos clasificar en años con excesos, déficits y normales de acuerdo a su oferta hídrica. En la ilustración 27 se aprecian las variaciones dentro de la serie para la fecha más probable de siembra y la tabla 22 se muestran las anomalías para las diferentes estrategias de siembras (tempranas y tardías) en los años simulados.

Ilustración 26. Índice de Anomalías en rendimientos de maíz variedad HIBRIDO COMERCIAL generados para el municipio de Puerto López, Meta, semestre B. Serie 1986-2014



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Valores del Índice de anomalías en rendimientos de maíz variedad HIBRIDO COMERCIAL generados para el municipio de Puerto López en diferentes fechas de siembra. Córdoba. Serie 1986-2014 semestre B.

AÑO	Finales de julio	Inicio de Agosto	Finales de agosto	Inicios de Septiembre
1987	0.11	0.14	0.08	0.12
1988	0.09	0.09	-0.08	-0.49
1989	0.13	0.06	0.03	-0.19
1990	0.21	0.15	0.17	-0.01
1991	0.14	0.04	-0.02	-0.21
1992	0.12	0.12	0.11	-0.04
1993	0.15	0.19	-0.02	-0.30
1997	0.04	0.12	0.03	0.02
1998	0.15	0.16	0.09	0.04
1999	0.11	0.11	0.10	0.08
2000	0.13	0.13	0.13	0.08
2002	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
2003	0.07	-0.28	-0.70	-0.90
2004	0.14	0.10	0.09	0.19

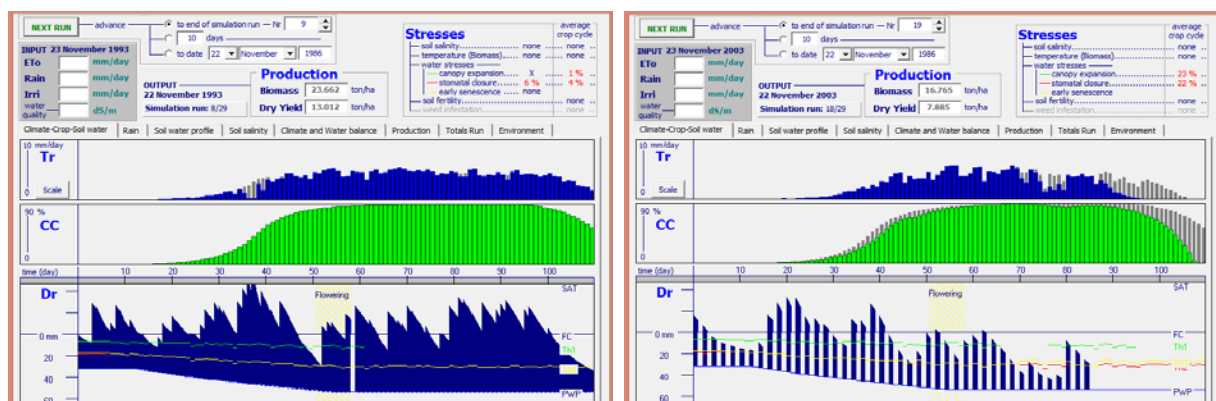
2005	0.16	0.17	0.20	0.14
2006	0.01	-0.28	-0.75	-0.97
2007	0.21	0.18	0.14	0.10
2008	0.21	0.15	0.15	0.13
2009	0.18	0.07	0.06	0.07
2010	0.15	0.17	0.17	0.17
2011	0.16	0.17	0.16	0.14
2012	0.16	0.15	0.09	-0.01
2013	0.16	0.15	0.18	0.21
2014	-0.55	-0.14	-0.62	-0.88
Promedios	0.03		-0.09	-0.18

*Celdas naranjas, Periodos con precipitaciones por debajo de lo normal; Celdas azules, Periodos con precipitaciones por encima de lo normal; Celdas blancas, Periodos con precipitaciones normales, columna verde correspondiente a la fecha ideal de siembra. Fuente: Elaboración propia*

En general cabe resaltar que, si los productores sembrarán a finales de julio, bajo condiciones simuladas, podrían mejorar sus rendimientos en un 3%, a diferencia de retardar un poco las siembras para finales de agosto o comienzos de septiembre donde las reducciones en promedio alcanzan un 17%. En condiciones de años en los que el segundo semestre muestra condiciones bajas de precipitaciones, los rendimientos se ven afectados en un 4.6% con respecto al promedio de la serie, esto también se podría mitigar con una siembra temprana (finales de julio), para los años con condiciones normales de precipitación se observa que la fecha de siembra más probable es la que mejores rendimientos presenta, esto quiere decir que no se debe modificar la época de siembra. Finalmente para los años con condiciones de precipitaciones por encima de lo normal se observan los rendimientos más altos, con valores en la fecha más probable del 15% por encima de lo normal, si se empleara la estrategia de adelantar la siembra bajo estas condiciones climáticas, se podrían ver beneficiados los índices de rendimiento hasta en un 16% bajo condiciones simuladas, los escenarios para siembras tardías (comienzos de septiembre) son negativos para el cultivo, razón por la cual según simulaciones no es apropiado sembrar.

En la ilustración 27 se observan 2 salidas contrastantes del modelo Aquacrop para el semestre B, bajo condiciones de déficits y excesos hídricos en la región, para la imagen de la izquierda se aprecia la corrida del año 1993 con anomalías de precipitación por encima de lo normal, en la imagen de la derecha se aprecia una corrida con déficit hídrico correspondiente al año 2003.

Ilustración 27. Salidas de Aquacrop con 2 años contrastantes de oferta hídrica. Puerto López, Meta. Semestre A.



Izquierda, exceso hídrico, Derecha, déficit hídrico. Fuente: elaboración propia, tomado de salidas del modelo AQUACROP.

De acuerdo al análisis de riesgo, se categorizo el departamento de Córdoba, con información del municipio de Ciénaga de Oro, con un nivel de riesgo MEDIO, donde fueron identificados que los eventos de reducción de precipitaciones, si bien inciden negativamente en el rendimiento, tienen una buena oferta de brillo solar razón por la cual esta amenaza climática se cuantifico con el valor más bajo en la ecuación, por otro lado los excesos hídricos generaron la mayor amenaza para la región, seguido de estrés por calor ocasionado por temperaturas altas, que fueron valorados con 3 y 2 en cuantiles respectivamente; el municipio cuenta con el 24% del área asegurada respecto al total del área sembrada.

Tabla 23. Valores base y cuantiles para el cálculo del riesgo en el municipio de Ciénaga de Oro. Córdoba. Serie 1986-2014 semestre A.

MUNICIPIO	AMENAZA			SENSIBILIDAD			CAPACIDAD ADAPTATIVA		
	Indicador	Valor base	Valor Cuantiles	Indicador	Valor base	Valor Cuantiles	Indicador	Valor base	Valor Cuantiles
Ciénaga De oro Semestre A	ENSO Negativo	0.24	1	Índice de Presión Hídrica al Ecosistema	1.1	3	Asistencia técnica prestada por UPA (2015)	0.7	1
	ENSO Positivo	-0.34	3	Porcentaje de área asegurada respecto al total de área sembrada	24.7	3	% de UPA con maquinaria agrícola (2015)	5.4	1
	Aumento Temperaturas	-0.24	2	Índice de aridez	57.9	2	Índice de eficiencia en el uso del agua	0.4	3

De acuerdo al análisis de riesgo, se categorizo el departamento del Meta, con información del municipio de Puerto López con valores riesgos agroclimáticos bajo para el semestre A y medio para el semestre B, en este sentido el semestre A fueron identificados los déficits hídricos como la mayor amenaza de origen meteorológico con disminución hasta en un 19% de los rendimientos promedio de la serie 1986-2014, el semestre B registró como mayor amenaza de origen meteorológico los excesos hídricos, con disminución de los rendimientos hasta en un 50% con respecto a los rendimientos normales, seguido de las altas temperaturas con disminución de hasta un 30% y déficits hídricos con un 22%, razón por la cual se cuantifico en nivel medio de riesgo., en las tablas 24 y 25 se aprecian los valores intrínsecos y



extrínsecos de la matriz de riesgo desarrollada en el presente estudio para la región de Puerto López en el departamento del Meta.

Tabla 24. Valores base y cuantiles para el cálculo del riesgo en el municipio de Puerto López. Meta. Serie 1986-2014 semestre A.

MUNICIPIO	AMENAZA			SENSIBILIDAD			CAPACIDAD ADAPTATIVA		
	Indicador	Valor base	Valor Cuantiles	Indicador	Valor base	Valor Cuantiles	Indicador	Valor base	Valor Cuantiles
Puerto López Semestre A	Exceso Hídrico	-0.05	1	Índice de Presión Hídrica al Ecosistema	0.4	2	Asistencia técnica prestada por UPA (2015)	0.6	1
	Déficit Hídrico	-0.19	2	Porcentaje de área asegurada respecto al total de área sembrada	0.0	1	% de UPA con maquinaria agrícola (2015)	24.6	2
	Aumento Temperaturas	-0.03	1	Índice de aridez	99.5	2	Índice de eficiencia en el uso del agua	0.4	3

Tabla 25. Valores base y cuantiles para el cálculo del riesgo en el municipio de Puerto López. Meta. Serie 1986-2014 semestre B.

MUNICIPIO	AMENAZA			SENSIBILIDAD			CAPACIDAD ADAPTATIVA		
	Indicador	Valor base	Valor Cuantiles	Indicador	Valor base	Valor Cuantiles	Indicador	Valor base	Valor Cuantiles
Puerto López Semestre B	Exceso Hídrico	-0.5	3	Índice de Presión Hídrica al Ecosistema	0.4	2	Asistencia técnica prestada por UPA (2015)	0.6	1
	Déficit Hídrico	-0.22	2	Porcentaje de área asegurada respecto al total de área sembrada	0.0	1	% de UPA con maquinaria agrícola (2015)	24.6	2
	Aumento Temperaturas	-0.3	3	Índice de aridez	99.5	2	Índice de eficiencia en el uso del agua	0.4	3

## **5. CONCLUSIONES**

- Se evaluó el riesgo agro meteorológico, mediante la simulación del cultivo del maíz (especie híbrido comercial) validada para condiciones locales, donde se identificaron que cambios en los volúmenes de precipitación y altas temperaturas inciden directamente en los rendimientos del cultivo.
- Se identificó las amenazas de origen meteorológico y climático en el cultivo del maíz, donde con temperaturas máximas por encima de 37.5 C para Córdoba y 38.2 C para el Meta se afectan negativamente los rendimientos, adicionalmente el riesgo agroclimático de origen hídrico, reportó déficit por debajo de 446 mm de precipitación en el ciclo del cultivo para la región de Córdoba y 520 mm para el Meta, por otro lado con valores por encima de 200 mm en 7 días consecutivos, se afectan los rendimientos.
- Del presente estudio se concluye que el maíz es un cultivo resistente a los estreses por déficits y por excesos hídricos, solo se ve afectado por eventos extremos de sequias o por inundaciones severas, lo que lo categoriza en un riesgo de medio a bajo.
- El desarrollo del presente estudio, permitió generar una práctica de mitigación asociada a las fechas de siembra, donde se simularon siembras tardías o tempranas respecto a la fecha de siembra tradicional, esto permitió establecer que para periodos con déficits o excesos hídricos los rendimientos pueden mejorar si se modifica la fecha de siembra.

## 6. RECOMENDACIONES

En el presente trabajo, los cambios en la escala interanual en las precipitaciones, inciden de manera directa en la climatología de una región específica, para este caso particular La región 1+2 de El Niño para Córdoba, y la clasificación por terciles de precipitación para el Meta, generaron variaciones importantes en los rendimientos, es importante conocer para cada una de las regiones, el estado actual de sus condiciones climáticas y monitorear los boletines de predicción climático disponibles y especialmente las mesas agroclimáticas liderada por entidades públicas y privadas donde convergen estudios específicos de predicción climáticas y diferentes gremios y asociaciones, esto quiere decir que para los productores de maíz (en general productores agrícolas y pecuarios) en este caso, deben consultar las condiciones actuales de su región, para poder planificar sus siembras y tomar decisiones oportunas que permitan mitigar efectos adversos de la oferta climática tales como la modificación de las fechas de siembra o en casos particulares la no siembra en ese periodo.

De acuerdo a lo plasmado en el anterior párrafo, este trabajo permitió identificar y generar las siguientes recomendaciones, para la región de Ciénaga de Oro, Córdoba: en la fase El Niño, las simulaciones demuestran que una fecha temprana de siembra (finales de abril) podría generar mejores rendimientos hasta en un 24%, en fase de La Niña, las estadísticas de FENALCE muestran que la fecha de siembra es correcta y no se debe modificar.

Para el primer semestre del año en la región de Puerto López, Meta se recomienda: en periodos por debajo de lo normal, una siembra tardía (finales de abril) pasaría de rendimientos negativos a tener 10% más de rendimiento tan solo corriendo las fechas de siembra, lo mismo ocurre en fases por encima de lo normal donde se pueden incrementar los rendimientos hasta en un 17%. En general para el primer semestre se recomienda, bajo datos simulados sembrar a finales del mes de abril e inclusive contemplar la primera quincena de mayo.

Para el segundo semestre de la región del Meta se recomienda: para periodos con precipitaciones por debajo de lo normal adelantar las fechas de siembra (finales de julio), si bien los rendimientos para estas condiciones son negativos respecto a la serie, al adelantar la fecha puede subir el rendimiento un 3%; bajo condiciones normales, no se aconseja modificar la fecha. Finalmente, en condiciones por encima de lo normal se recomienda al igual que para condiciones de bajas precipitaciones, adelantar la fecha de siembra a finales de julio, lo que ocasionaría rendimientos de hasta un 15% por encima de la serie.

Se evidencia la necesidad de nuevos estudios de investigación, para poder correlacionar diferentes índices de variabilidad climática que incidan directamente en la climatología de regiones específicas, inclusive se hace relevantes estudios específicos para la fase neutra de los eventos ENSO, los cuales, como se evidencio en la región del departamento de Córdoba, fue la fase donde más reducción del índice de anomalías presentó.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abedinpour, M. S. (2012). *Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment*. Agricultural Water Management.
- AGRONET. (2016). *AGRONET*. Obtenido de [www.agronet.gov.co](http://www.agronet.gov.co)
- Altieri, M. A. (2015). *Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. Agronomy for Sustainable Development*,.
- Basualdo, A. M. (2015). *Inventario y características principales de los mapas de riesgos para la agricultura disponibles en los países de América Latina y el Caribe (No. IICA P40)*. IICA, San José (Costa Rica).
- Bello, C. A. (2013). *Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de maíz en los departamentos de Córdoba, Meta, Tolima y Valle del Cauca*. Fereres E. & Boshell J. F. del Cambio Climático, I. E.
- Blundo, G. G.-T. (s.f.). *Mapeo de Actores y Necesidades de Información Agroclimática en los Cultivos de Maíz y Frijol en sitios piloto-Colombia*. Obtenido de Climate change, Agriculture and Fodd Security: [www.ccafs.cgiar.org](http://www.ccafs.cgiar.org)
- Bolanos J, E. G. (1996). *The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize Field Crop Res.*, 48 (1996), pp. 65–80.
- Boshell, J. Á. (1998). *Los riesgos hidrolimáticos del agro colombiano*. . Bogotá.
- Bruinsma, J. (2003). *World agriculture: towards 2015/2030: an FAO perspective*. Earthscan.
- Cabrera, V. S. (s.f.). *Managing climate risks to agriculture: Evidence from El Niño*. . Obtenido de [http://www.seclimate.org/wp-content/uploads/2014/07/secc\\_09\\_001.pdf](http://www.seclimate.org/wp-content/uploads/2014/07/secc_09_001.pdf)
- Campbell, S. D. (2011). *Weather forecasting for weather derivatives*. *Journal of the American Statistical Association*.
- CCAFS. (2016). *Climate Change Agriculture and Food Security*. Obtenido de <https://ccafs.cgiar.org/es/mesas-t%C3%A9cnicas-regionales-sobre-pron%C3%B3sticos-agroclim%C3%A1ticos-en-c%C3%B3rdoba-colombia#.V9Pxhe1OWPQ>
- Charrad. (2015). Obtenido de <https://cran.r-project.org/web/packages/NbClust/NbClust.pdf>
- Chen, F. Y. (2010). *Improving supply chain performance and managing risk under weather-related demand uncertainty*. *Management Science*, .
- CIMMYT. (2004). *Enfermedades del maíz: una guía para su identificación en el campo*. Cuarta edición. Mexico: Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).
- Cordano, E. (2012). *Aclimate Colombia*. Obtenido de [http://presentations.copernicus.org/EGU2012-14026\\_presentation.pdf](http://presentations.copernicus.org/EGU2012-14026_presentation.pdf)
- CORMACARENA. (2006 - 2018). *Agenda Ambiental, Proyecciones y Hechos*. Corporación para el Desarrollo Sostenible del.

- Cortés, B. B. (2013). *Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de Arroz en los departamentos de Tolima y Meta*. FAO. Colombia.
- DANE. (2005). *Maíz tecnificado en Colombia*. Bogotá D.C.
- DANE. (2010). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. Departamento nacional de estadísticas, Bogotá .
- DANE. (2011). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. Departamento nacional de estadísticas, Bogotá .
- DANE. (2012). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. Departamento nacional de estadísticas, Bogotá .
- DANE. (2013). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. Departamento nacional de estadísticas, Bogotá .
- DANE. (2014). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. Departamento nacional de estadísticas, Bogotá.
- De la Casa, A. R. (1999). *Factibilidad del cultivo de papa de secano en la región central de la provincia de Córdoba (Argentina) basada en la evaluación agroclimática del riesgo de sequía*. *Agriscientia*, vol. 16, p. 55 – 62.
- Donnari, S. &. (1995). *El índice de anomalía de humedad Z y su relación con el rendimiento de trigo en Bordenave*. *AgriScientia Vol XII*. Buenos Aires.
- Doorenbos, J. y. (1977). *Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO sobre Riego y Drenaje*. Boletín 24. . Roma.
- Escobar, O. F. (2012). *Alteraciones de la precipitación y la temperatura ante la variabilidad y el cambio climático para la ciudad de Bogotá*. Bogotá.
- FAO - MADR. (2013). *Uso del modelo AquaCrop para estimar rendimientos para el cultivo de maíz en los departamentos de Córdoba, Meta, Tolima y Valle del Cauca*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Bogotá, Colombia.
- FAO. (1983). *World Food Security: a Reappraisal of the Concepts and Approaches. Director Generals Report*. Roma.
- FAO. (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2016). *FAOSTAT - DIRECCIÓN DE ESTADÍSTICA*. Recuperado el 24 de marzo de 2016, de <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/S>
- FENALCE. (2010). *El cultivo del Maíz, historia e importancia. Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas*.
- Fernandez, M. (2013). *Efectos del cambio climático en el rendimiento de tres cultivos mediante el uso del modelo Aquacrop*.
- Fisher, A. C. (2012). *The economic impacts of climate change: evidence from agricultural output and random fluctuations in weather: comment*. *The American Economic Review*, 102(7), 3749-3760.
- Flores, L. (2013). *Simulación del rendimiento de maíz (Zea mays L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop*. *Agrociencia*, 47(4), 347-359.
- G, G. (2001). *Impacto de la variabilidad climática en la producción de banano en el Urabá antioqueño*.

- García, A. D.-C. (2002). *Temperatura base y tasa de extensión foliar del maíz*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 25(4), 381-386.
- Gaudin, A. C. (2015). *Increasing crop diversity mitigates weather variations and improves yield stability*. *PloS one*, 10(2), e0113261.
- Gobernación de Córdoba. (22 de marzo de 2016). *Gobernación de Córdoba*. Obtenido de [http://www.cordoba.gov.co/desarrollo/\\_contenido/pdf/usos\\_suelo/cienaga\\_de\\_oro.pdf](http://www.cordoba.gov.co/desarrollo/_contenido/pdf/usos_suelo/cienaga_de_oro.pdf)
- Gobernación de Córdoba. (marzo 19 de 2016). *Gobernación de Córdoba* . Obtenido de <http://www.cordoba.gov.co/cordoba/geografia.html>
- Gobernación del Meta - Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2004). *El Meta, un territorio de oportunidades*.
- Gobernación Meta - IGAC. (2004). *El Meta un territorio de oportunidades* . Bogotá.
- Gobin, A. T. (2013). *Weather-related hazards and risks in agriculture*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 13, p. 2599 – 2603.
- Guarin G. (2001). *Impacto de la variabilidad climática en la producción de banano en el Urabá antioqueño*.
- HATCH, M. D. (1987). *Photosynthesis: a unique blend of modified biochemistry, anatomy and ultrastructure*.
- Heng, L. K. (2009). *Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize*. *Agronomy Journal*, 101(3), 488-498.
- Hsiao, T. C.-L. (2009). *AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize*. *Agronomy Journal*, 101(3), 448-459.
- Huang, H. a. (2010). "An econometric analysis of US crop yield and cropland acreage: implications for the impact of climate change." *AAEA annual meeting, Denver, Colorado*.
- Huntingford, C. J. (2013). *No increase in global temperature variability despite changing regional patterns*. *Nature*, 500(7462), 327-330.
- Hurtado, G. y. (2002). *Aplicación de índices de sequía en Colombia*. *Meteorología Colombiana*, no. 5, p. 131 – 137.
- Husson. (2016). Obtenido de <https://cran.r-project.org/web/packages/FactoMineR/index.html>
- Husson, F. J. (2010). *Principal component methods-hierarchical clustering-partitional clustering: why would we need to choose for visualizing data*. " *Applied Mathematics Department*. .
- ICA - FENALCE. (2004). *Enfermedades del maíz y su manejo*. En I. C.-I. FENALCE. Palmira.
- IGAC . (2009). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Córdoba*, Bogotá .
- IGAC. (2004). *ESTUDIO GENERAL DE SUELOS Y ZONIFICACIÓN DE TIERRAS DEL DEPARTAMENTO DE META*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- IPCC . (2013). *Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. . Nueva York. .

- IPCC . (2014). *Climate Change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. IPCC Special Report, WGII.*
- IPCC. (2007). *New Assessment Methods and the Characterisation of Future Conditions: In Climate.*
- IPCC. (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.*
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014–Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects. Cambridge University Press.*
- Jame, Y. W. (1996). "Crop growth models for decision support systems." *Canadian Journal of Plant Science* 76.1 : 9-19.
- Jayanthi, H. y. (2015). *A probabilistic approach to assess agricultural drought risk.* . Obtenido de <http://chg.geog.ucsb.edu/publications/biobib/37.pdf>
- Lara, M. V., Drincovich, M. F., & Andreo, C. S. (s.f.). Transiciones metabólicas en la fijación fotosintética del carbono en plantas del género *Portulaca*. *Universidad del Rosario* .
- Lau, C., Jarvis, A., & Ramírez, J. (2011). *Agricultura colombiana: Adaptación al cambio climático. CIAT Políticas en Síntesis no. 1. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. 4 p.*
- Lecanda X. (2016). *Producto desarrollado dentro del proyecto col 83662: Reducción del Riesgo y de la Vulnerabilidad frente al Cambio Climático en la región de la depresión Momposina en Colombia. PNUD, ADAPTATION FUND, MADS.*
- Leonenko, G. L. (2013). *Statistical distances and their applications to biophysical parameter estimation: Information measures, M-estimates, and minimum contrast methods. Remote Sensing, 5(3), 1355-1388.*
- Lesk, C. R. (2016). *Influence of extreme weather disasters on global crop production. Nature, 529(7584), 84-87.*
- Link E. J. (2005). *Investigation and modeling of the optimization potential of adapted nitrogen fertilization strategies in corn cropping system with regard to minimize nitrogen losses. Disertación de Tesis Doctoral. Institut fur Pflanzbau und Grunland. Universitat Hohenh.*
- Llanos. (2014). Obtenido de [http://www.aclimatecolombia.org/download/Investigacion%20Uno/RCLimTool\\_Manual\\_V01\\_FINAL.pdf](http://www.aclimatecolombia.org/download/Investigacion%20Uno/RCLimTool_Manual_V01_FINAL.pdf)
- Lobell, D. B. (2013). *The critical role of extreme heat for maize production in the United States. Nature Climate Change, 3(5), 497-501.*
- Lobell, D. B.-R. (2011). *Climate trends and global crop production since 1980. Science, 333(6042), 616-620.*
- Loomis, R. S. (1979). *Explanatory models in crop physiology. Annual Review of Plant Physiology, 30(1), 339-367.*
- M Fonseca-Hernandez. (2015). *Análisis de sensibilidad del campo de viento producido por el modelo de diagnóstico CALMET.*

- MADR. (28 de marzo de 2016). AGRONET . Obtenido de <http://www.agronet.gov.co/Paginas/inicio.aspx>
- Martínez, R. y. (2009). *Climate risk management in western South America: implementing a successful information system. World Climate Conference-3*. Ginebra.
- Mati, B. M. (2000). *he influence of climate change on maize production in the semi-humid–semi-arid areas of Kenya. Journal of Arid Environments*, 46(4), 333-344.
- Mayorga, R. y. (2006). *La sequía en Colombia. Nota Técnica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)*.
- Mendoza, N. y. (2003). *Caracterización de la sequía meteorológica en Venezuela. VII Escuela Latinoamericana de Física de Suelos*. . La Serena.
- Miguez, P. &. (2007). *Herramientas para la gestión eficiente del riesgo agrícola*. Obtenido de [www.ora.gov.ar](http://www.ora.gov.ar)
- Minamiguchi, N. (2005). *The application of geospatial and disaster information for food insecurity and agricultural drought monitoring and assessment by the FAO GIEWS and Asia* .
- Montealegre, J. E. (2009). . *Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM.
- Montoya, G. d. (2008). *Lecciones de meteorología dinámica y modelamiento atmosférico*.
- Morla, F. D. (2012). *Calibración y validación del modelo Aquacrop de FAO en cultivos representativos del centro sur de Córdoba. In XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata (RA)*.
- Nazarifar, M. M. (2014). *griculture drought risk management using standardized precipitation index and AEZ* .
- Neenu, S. B. (2013). *Impact of climatic factors on crop production-A review. Agricultural Reviews*, 34(2), 97-106.
- Ruiz, R. A.-R.-P.-L. (2012). *BALANCE HÍDRICO Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DEL ESTADO DE TABASCO, MEXICO* . *Universidad y Ciencia* .
- Ocampo, O. (2011). *Climate Change and its Impact on the Agriculture. Revista de Ingeniería*, (33), 115-123.
- Ospina, J. G. (2006). *Validación del modelo DSSAT en diferentes condiciones agroecológicas de Colombia, una herramienta para optimizar las prácticas del cultivo de maíz (Zea mays L.) Tesis Magister en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia*. . Medellín.
- Steduto. (2006). *Biomasa Water – Productivity. Comparing the growth – engines of crop models. p. 1 – 16. En WUEMED Training course. “ Integrated approaches to improve drought tolerance in crops”. Department of Agroenvironmental Sciences and Technology, University of Bolog*.
- Pabon C, J. D. (2006). *Efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en la sabana de Bogotá, Meteorología Colombiana*, 86-99.
- Pabon C, J. D. (2013). *Efectos de los fenómenos de El Niño y La Niña en la precipitación, y su impacto en la producción agrícola en el departamento del Atlántico. Revista colombiana de geografía*, 35-54.



- Pachauri, R. K. (2014). *Climate change 2014: synthesis Report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (p. 151). IPCC.
- Parry, M. L. (2007). *Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC (Vol. 4)*. Cambridge University Press.
- Pistrika, A. y. (2007). *lood risk assessment: a methodological framework*. Water Resources Management: New Approaches and Technologies, European Water Resources Association. Creta, Grecia. 14 – 16 Jun.
- Poveda, G. (2004). *La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala interdecadal*.
- PROMICAP. (20 de marzo de 2016). *observatorioredsicta*. Obtenido de [http://www.observatorioredsicta.info/observatorio/sites/default/files/estudios\\_regionales/red\\_sicta/masfalto/posterManchaAsfalto.pdf](http://www.observatorioredsicta.info/observatorio/sites/default/files/estudios_regionales/red_sicta/masfalto/posterManchaAsfalto.pdf)
- Raes, D. S. (2009). *quaCrop--The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description*. *Agronomy Journal*. 101: 438-447.
- Rawson, H. M. (2001). *Trigo regado: Manejo del cultivo*. Food & Agriculture Org.
- Rojas B. (2011). *Evaluacion del desarrollo del cultivo bajo escenarios de variabilidad climatica interanual y cambio climático, en el sur oeste de la sabana de Bogota*. Bogotá .
- Rojas, .. C. (2005). *Estudio de diversos índices de sequía para la región caribe colombiana. Tesis para optar al título de Magíster en ciencias – Meteorología*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá .
- Román A. (2016). *Análisis de los impactos de los eventos ENOS sobre las fechas de siembra de maíz tecnificado en los municipios de Cereté y El Espinal*.
- Rosenzweig, C. J. (s.f.). *Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison PNAS 111.9 (2013): 1-6* .
- Ruíz, A. y. (2013). *Efecto de los fenómenos de El Niño y La Niña en la precipitación y su impacto en la producción agrícola del departamento del Atlántico (Colombia)*. *Revista Colombiana de Geografía*, vol. 22, no. 2 p. 35 – 45.
- Rummukainen, M. (2010). *State-of-the-art with Regional Climate Models*. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(1), 82-96.
- Salvatierra, D. M. (s.f.). *Manual técnico para el manejo del complejo mancha de asfalto del maíz*. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Schlenker, W. &. (2006). *Nonlinear effects of weather on corn yields*. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 28(3), 391-398.
- Schlenker, W. W. (2006). *The impact of global warming on US agriculture: an econometric analysis of optimal growing conditions*. *Review of Economics and statistics* 88.1 (2006): 113-125.
- Shahid S., y. B. (2008). *Drought risk assessment in the western part of Bangladesh*. *Natural Hazards*, vol. 46, p. 391 – 413.
- Sivakumar MVK, M. R. (2007). *Managing weather and climate risks in agricultura*, 503 pp. Berlin .

- SNHP. (2011). *Servicio nacional de hidrología y meteorología del Perú, Las diferentes facetas de El Niño y sus efecto en la costa del Peru.*
- Steduto, P. H. (2009). *quaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles.* *Agronomy Journal*, 101(3), 426-437.
- Steduto, P. H. (2012). *Crop yield response to water.* Roma: FAO.
- Stöckle, C. O. (2003). *CROPSYST, a cropping systems.*
- Superintendencia de Industria y Comercio . (2010). *Cadena Productiva del Maíz.*
- Team, Q. G. (2016). *Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.* Obtenido de <http://qgis.osgeo.org>.
- Team, R. C. (2012). *R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.* Obtenido de <http://www.R-project.org/>.
- TecnicoAgricola. (18 de marzo de 2016). *TecnicoAgricola.* Obtenido de <http://www.tecnicoagricola.es/estados-fenologicos-del-maiz/>
- Téllez, P. y. (2001). *Escenarios actuales y posibles efectos del cambio climático sobre los balances hídricos agrícolas y el rendimiento de algunos cultivos en Colombia.* *Meteorología Colombiana*, vol. 4, 103 – 115.
- Tilman, D. R. (2006). *Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment.* *Nature*, 441(7093), 629-632.
- Tonini, F. J. (2012). *Mapping return levels of absolute NDVI variations for the assessment of drought risk in Ethiopia.* *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 18, p. 564 – 572.
- Tonini, F. J. (2012). *Mapping return levels of absolute NDVI variations for the assessment of drought risk in Ethiopia.* *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 18, p. 564 – 572.
- Tonini, F. J. (2012). *Mapping return levels of absolute NDVI variations for the assessment of drought risk in Ethiopia.* *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 18, p. 564 – 572.
- Tonini, F. J. (2012). *Mapping return levels of absolute NDVI variations for the assessment of drought risk in Ethiopia.* *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 18, p. 564 – 572.
- Ulukan, H. (2008). *Agronomic adaptation of some field crops: A general approach.* *Journal of Agronomy and Crop Science*, 194(3), 169-179.
- Universidad de Murcia . (1988). *Aproximación, por el metodo de Thornthwaite, al cálculo de infiltración de lluvia útil.*
- UPME. (2013). *Estudio para determinar la Vulnerabilidad y las opciones de adaptación del sector energético colombiano frente al cambio climático.* . Bogotá .
- Velasco, A. N. (2016). *Integración del concepto de variabilidad hidroclimática en pronósticos de largo plazo de resolución mensual en Colombia.* Pontificia Universidad Javeriana.

- Vilanova, M. R. (2015). *Variability in chemical composition of Vitis vinifera cv Mencía from different geographic areas and vintages in Ribeira Sacra (NW Spain)*. *Food chemistry*, 169, 187-196.
- WMO. (2009). *oja informativa N° 4: La información sobre el clima, un instrumento para la seguridad alimentaria*. *World Climate Conference 3*. Genova.
- Yang, S. V. (2010). *Narrowing down the targets: towards successful genetic engineering of drought-tolerant crops*. *Molecular plant*, 3(3), 469-490.
- Yhang, Y. B. (2008). *Improved physical processes in a regional climate model and their impact on the simulated summer monsoon circulations over East Asia*. *Journal of Climate*, 21(5), 963-979.
- Yin, X. J. (2016). *Effects of climatic factors, drought risk and irrigation requirement on maize yield in the Northeast Farming Region of China*. *J. Agric. Sci. First View*, 1-19.
- Zhang, W. W. (2014). *Effects of elevated O3 exposure on seed yield, N concentration and photosynthesis of nine soybean cultivars (Glycine max (L.) Merr.) in Northeast China*. *Plant Science*, 226, 172-181.
- Ziska LH, D. J. (2014). *Invasive species and global climate change*, *CABI invasives series*. *CABI Publishing, Wallingford*.

## **ANEXOS**

*Anexo 1: Red activa de estaciones meteorológicas del departamento de Córdoba, IDEAM 2016.*

Estaciones activas de la red de IDAM para el departamento de Córdoba, contienen información de Municipio, Georreferenciación, tipo de estación, altitud y fecha de instalación.

**“EVALUACIÓN DEL RIESGO AGROCLIMÁTICO EN EL CULTIVO DE MAÍZ (ZEA MAYS) EN LOS DEPARTAMENTOS DE CÓRDOBA Y META”**

CODIGO	NOMBRE	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	TIPO	CAT	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	FECHA INSTALACION
CODIGO	NOMBRE	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	TIPO	CAT	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	CHA_INSTALACION
25025150	Ayapel	Ayapel	Cordoba	CON	CO	8.29519	-75.16450	22	1967-08-15
25020780	Cecilia	Ayapel	Cordoba	CON	PM	8.46139	-75.03417	20	1973-12-15
25020480	Pajaros Los	Ayapel	Cordoba	CON	PG	8.34056	-74.86778	25	1968-10-15
25021010	Buenavista	Buenavista	Cordoba	CON	PM	8.21944	-75.48083	110	1973-11-15
12040020	Canalete	Canalete	Cordoba	CON	PM	8.78697	-76.23642	40	1959-01-15
13070050	Cerete	Cerete	Cordoba	CON	PM	8.89033	-75.78625	20	1963-01-15
13070040	Rabolargo	Cerete	Cordoba	CON	PM	8.95061	-75.74247	19	1963-01-15
13075030	Turipana	Cerete	Cordoba	CON	AM	8.83953	-75.80189	20	1960-05-15
13075010	Chima	Chima	Cordoba	CON	CO	9.15075	-75.62208	20	1973-10-15
25020730	Chinu	Chinu	Cordoba	CON	PM	9.11778	-75.38444	125	1973-11-15
13075020	Salado El	Cienaga de Oro	Cordoba	CON	CO	8.91389	-75.58222	40	1964-10-15
25020700	Apartada La	La Apartada	Cordoba	CON	PM	8.04975	-75.33533	50	1973-11-15
13085010	Doctrina La	Lorica	Cordoba	CON	CP	9.29033	-75.89236	3.89	1968-01-15
13070020	Momil	Momil	Cordoba	CON	PM	9.24244	-75.68842	20	1973-10-15
25025160	Cuba Hda	Montelibano	Cordoba	CON	CO	8.00111	-75.39958	50	1973-04-15
25010080	Pica Pica	Montelibano	Cordoba	CON	PM	8.02844	-75.67983	100	1973-11-15
25010100	San Francisco Rayo	Montelibano	Cordoba	CON	PM	8.12642	-75.75653	160	1973-12-15
13085040	Apto Los Garzones	Monteria	Cordoba	CON	SS	8.82583	-75.82514	20	1974-06-15
13070070	Boca De La Ceiba	Monteria	Cordoba	CON	PM	8.82992	-75.85611	20	1970-01-15
13060020	Buenos Aires	Monteria	Cordoba	CON	PM	8.47275	-75.76669	55	1965-08-15
13055030	Galan	Monteria	Cordoba	CON	CO	8.65917	-75.97250	30	1979-06-15
13050030	Loma Verde	Monteria	Cordoba	CON	PM	8.50194	-76.17528	100	1965-12-15
13065020	Maracayo	Monteria	Cordoba	CON	CO	8.40800	-75.89139	25	1979-05-15
13070280	Sabanal	Monteria	Cordoba	CON	PM	8.78253	-75.80217	10	1978-06-15
13060010	San Anterito	Monteria	Cordoba	CON	PM	8.55528	-75.85611	75	1973-09-15
13050020	Sta Cruz Hda	Monteria	Cordoba	CON	PM	8.66750	-76.12389	220	1973-10-15
13050010	Sta Lucia	Monteria	Cordoba	CON	PM	8.85167	-76.04083	120	1965-08-15
13070290	Tampa	Monteria	Cordoba	CON	PM	8.62397	-75.76725	20	1978-05-15
13075050	Univ de Cordoba	Monteria	Cordoba	CON	AM	8.79389	-75.86153	15	1979-06-15
25015010	Centro Alegre	Planeta Rica	Cordoba	CON	CO	8.18078	-75.63228	170	1973-12-15
25025190	Planeta Rica	Planeta Rica	Cordoba	CON	CO	8.39933	-75.58372	90	1973-11-15
25020710	Cintura	Pueblo Nuevo	Cordoba	CON	PM	8.43389	-75.27050	25	1973-11-15
25021450	Sajonia Hda	Pueblo Nuevo	Cordoba	CON	PM	8.48678	-75.59833	100	1980-01-15
12045020	Cristo Rey	Puerto Escondido	Cordoba	CON	CO	9.07217	-76.22550	15	1973-10-15
12040010	Jaramagal	Puerto Escondido	Cordoba	CON	PM	8.89667	-76.20256	90	1973-10-15
25010110	Acacias Las Hda	Puerto Libertador	Cordoba	CON	PM	8.00611	-75.64722	80	1980-02-15
25010010	Pto Libertador	Puerto Libertador	Cordoba	CON	PM	7.88722	-75.70975	55	1989-05-15
25025170	Colomboy	Sahagun	Cordoba	CON	CO	8.74086	-75.49883	125	1973-10-15
25020720	Jobo El Tablon	Sahagun	Cordoba	CON	PM	8.63722	-75.38361	130	1973-11-15
25020140	Sahagun	Sahagun	Cordoba	CON	PM	8.93778	-75.44306	60	1958-09-15
25021210	Trementino	Sahagun	Cordoba	CON	PM	8.81833	-75.47361	150	1973-11-15
13070450	Aguas Mhosas	San Andres de Sotavento	Cordoba	CON	PM	9.25572	-75.51086	75	1986-08-15
13070430	Venecia	San Andres de Sotavento	Cordoba	CON	PM	9.19528	-75.54111	50	1988-08-15
13070440	Villa Marcela	San Antero	Cordoba	CON	PM	9.35222	-75.71889	40	1987-07-15
13070010	Limon El	San Bernardo del Viento	Cordoba	CON	PM	9.34300	-75.93606	3	1964-10-15
13085030	San Bernardo Del V	San Bernardo del Viento	Cordoba	CON	CO	9.37078	-75.94931	22	1964-11-15
13070170	Buenos Aires 1	San Carlos	Cordoba	CON	PM	8.77278	-75.75003	9	1978-08-15
13070120	Callemar	San Carlos	Cordoba	CON	PM	8.69750	-75.67694	95	1963-06-15
13070110	Carrizal	San Carlos	Cordoba	CON	PM	8.68194	-75.75353	40	1965-08-15
13070190	Coroza 2	San Carlos	Cordoba	CON	PM	8.80472	-75.76583	9	1974-08-15
13070090	San Carlos	San Carlos	Cordoba	CON	PM	8.79722	-75.69611	60	1964-01-15
13070100	Sta Rosa	San Carlos	Cordoba	CON	PM	8.74111	-75.60142	140	1963-01-15
25010060	Ure	San Jose de Ure	Cordoba	CON	PM	7.78806	-75.53833	200	1973-11-15
13070180	Carrillo	San Pelayo	Cordoba	CON	PM	8.98444	-75.83178	20	1979-03-15
13080010	San Antonio	San Pelayo	Cordoba	CON	PM	8.93586	-75.95333	50	1965-09-15
13060030	Caramelo	Tierralta	Cordoba	CON	PM	8.26611	-75.90389	60	1965-12-15
13030010	Tierralta	Tierralta	Cordoba	CON	PM	8.18394	-76.04953	100	1959-02-15
13040030	Pezval	Valencia	Cordoba	CON	PM	8.25906	-76.16572	80	1990-09-15
13070060	Cienaga de Oro	Cienaga de Oro	Cordoba	CON	PM	8.87250	-75.62583	25	1958-09-15

*Anexo 2: Red activa de estaciones meteorológicas del departamento del Meta, IDEAM 2016.*

Estaciones activas de la red de IDAM para el departamento del Meta, contienen información de Municipio, Georreferenciación, tipo de estación, altitud y fecha de instalación.

**“EVALUACIÓN DEL RIESGO AGROCLIMÁTICO EN EL CULTIVO DE MAÍZ (ZEA MAYS) EN LOS DEPARTAMENTOS DE CÓRDOBA Y META”**

CODIGO	NOMBRE	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	TIPO	CAT	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	FECHA INSTALACION
35010020	Acacias	Acacias	Meta	CON	PM	3.99464	-73.76558	525	1961-04-15
35020030	Manzanares	Acacias	Meta	CON	PM	4.11667	-73.80000	1200	1968-08-15
35105050	Guaicaramo	Barranca de Upia	Meta	CON	CO	4.46867	-72.95358	190	1993-10-15
35100020	Cabuyaro	Cabuyaro	Meta	CON	PM	4.28372	-72.79283	180	1968-06-15
35010060	Toro El	Castilla La Nueva	Meta	CON	PM	3.78667	-73.40056	230	1978-05-15
32060030	San Luis Cubarral	Cubarral	Meta	CON	PM	3.79072	-73.84278	600	1969-01-15
35045020	Caba±a La Hda	Cumalar	Meta	CON	CO	4.30044	-73.35750	305	1979-05-15
35030010	Calvario El	El Calvario	Meta	CON	PG	4.35206	-73.71158	1800	1968-10-15
35030020	Monfort	El Calvario	Meta	CON	PM	4.31008	-73.64803	1100	1968-08-15
32060020	Mesa de Yamanes	El Castillo	Meta	CON	PM	3.53094	-73.90108	600	1969-01-15
32060060	Calime	El Dorado	Meta	CON	PM	3.74233	-73.83469	800	1978-07-15
32070020	Ca±o Blanco	Fuente de Oro	Meta	CON	PM	3.25000	-73.51667	240	1979-09-15
32070060	Fuente de Oro	Fuente de Oro	Meta	CON	PM	3.46667	-73.63333	300	1979-07-15
32070110	Aguas Claras	Granada	Meta	CON	PM	3.47203	-73.85783	520	1989-04-15
32075040	Holanda La	Granada	Meta	CON	CO	3.51633	-73.71603	360	1978-11-15
35010040	Ca±o Hondo	Guamal	Meta	CON	PM	3.92422	-73.81458	800	1968-11-15
35010070	Guamal	Guamal	Meta	CON	PM	3.87833	-73.75861	525	1978-04-15
32035020	Balsora La	La Macarena	Meta	CON	CO	2.43839	-73.93228	372	1983-12-15
32035010	Macarena La	La Macarena	Meta	CON	CP	2.17611	-73.79333	350	1978-10-15
32030020	Raudal Uno	La Macarena	Meta	CON	PM	2.32250	-73.94389	351	1983-06-15
32010010	Mariposa La	La Uribe	Meta	CON	PM	2.56283	-74.10308	383	1983-06-15
32020020	Uribe La	La Uribe	Meta	CON	PM	3.24322	-74.35372	950	1993-03-15
32065010	Lejanias	Lejanias	Meta	CON	CO	3.52953	-74.02736	680	1989-03-15
32060090	Lejanias Castillo	Lejanias	Meta	CON	PM	3.57622	-74.05964	840	1983-12-15
32090010	Mapiripan	Mapiripan	Meta	CON	PM	2.88972	-72.13011	158	1983-06-15
32120010	San Ignacio	Mapiripan	Meta	CON	PM	3.73408	-72.36978	168	1983-12-15
32075050	Mesetas	Mesetas	Meta	CON	CO	3.38006	-74.04297	620	1983-12-15
32080040	Pororio El	Puerto Concordia	Meta	CON	PM	2.83333	-72.80933	235	1983-12-15
33035010	Carimagua	Puerto Gaitan	Meta	CON	CO	4.57442	-71.34075	200	1972-05-15
35120010	Pto Gaitan	Puerto Gaitan	Meta	CON	PM	4.31139	-72.07664	150	1963-01-15
32075080	Pto Lleras	Puerto Lleras	Meta	CON	CO	3.26769	-73.37319	245	1990-10-15
32070080	Tierra Grata	Puerto Lleras	Meta	CON	PM	3.08750	-73.22639	191	1983-06-15
35010230	Bajo Nare	Puerto Lopez	Meta	CON	PM	3.98464	-72.97122	183	1983-06-15
35180030	Fundo Nuevo Humapo	Puerto Lopez	Meta	CON	PM	4.32772	-72.39144	155	1983-06-15
35125010	Margaritas Las Hda	Puerto Lopez	Meta	CON	CO	4.34056	-72.15636	150	1976-05-15
35010080	Nare	Puerto Lopez	Meta	CON	PM	3.79389	-73.14972	200	1978-05-15
35130010	Plata La	Puerto Lopez	Meta	CON	PM	3.95608	-72.76572	225	1975-04-15
35010010	Pto Lopez	Puerto Lopez	Meta	CON	PM	4.10503	-72.93650	182	1960-09-15
32080030	Candilejas	Puerto Rico	Meta	CON	PM	2.83333	-73.08333	184	1983-06-15
32080010	Pto Rico	Puerto Rico	Meta	CON	PM	2.94333	-73.20972	230	1979-08-15
35030090	Buenavista	Restrepo	Meta	CON	PG	4.27478	-73.61783	1280	1993-03-15
35010150	Yaguarito	San Carlos de Guaroa	Meta	CON	PM	3.88333	-73.34000	275	1994-01-15
32070120	Mesa de Fernandez	San Juan de Arama	Meta	CON	PM	3.45656	-74.02994	650	1993-10-15
32070030	Micos Los	San Juan de Arama	Meta	CON	PM	3.31647	-73.89217	500	1979-09-15
32070090	Pe±as Blancas	San Juan de Arama	Meta	CON	PM	3.31667	-73.91667	440	1983-12-15
32070100	San Juan de Arama	San Juan de Arama	Meta	CON	PM	3.37508	-73.89194	410	1983-12-15
35015050	Barbascal	San Martin	Meta	CON	CO	3.63078	-73.34928	250	1992-05-15
35010090	San Martin	San Martin	Meta	CON	PM	3.75028	-73.70083	420	1978-08-15
35030040	Acdto La Esmeralda	Villavicencio	Meta	CON	PG	4.16364	-73.64772	550	1986-02-15
35030100	Alcaldia	Villavicencio	Meta	CON	PG	4.15000	-73.63333	470	1993-08-15
35035020	Apto Vanguardia	Villavicencio	Meta	CON	SP	4.16344	-73.62050	423	1924-10-15
35035010	Base Aerea Apiay	Villavicencio	Meta	CON	SS	4.07711	-73.55992	400	1972-10-15
35025020	Libertad La	Villavicencio	Meta	CON	CP	4.05736	-73.46792	336	1968-04-15
35030050	Ojo De Agua	Villavicencio	Meta	CON	PM	4.09114	-73.44878	300	1978-07-15
35020060	Pompeya	Villavicencio	Meta	CON	PM	4.03975	-73.36800	260	1978-11-15
35030030	Sena	Villavicencio	Meta	CON	PG	4.12736	-73.63956	425	1984-08-15
35035070	Unillanos	Villavicencio	Meta	CON	CP	4.07672	-73.58200	340	1983-10-15
32070010	Campo Alegre	Vista Hermosa	Meta	CON	PM	3.20000	-73.75000	260	1979-09-15
32070040	Pinalito	Vista Hermosa	Meta	CON	PM	2.98333	-73.63333	245	1978-09-15
32075030	Vista Hermosa	Vista Hermosa	Meta	CON	CO	3.12039	-73.75403	325	1969-04-15
35020040	Maringa	Acacias	Meta	CON	PM	4.00000	-73.76667	540	1968-07-15
35010030	Montelibano	Acacias	Meta	CON	PM	4.03333	-73.75000	610	1980-03-15
35010140	Primavera La	Guamal	Meta	CON	PM	3.95000	-74.16667	3460	1966-01-15
35010100	Villa Priscila	Guamal	Meta	CON	PM	3.93333	-73.73333	850	1962-05-15
35010110	Sta Helena	San Carlos de Guaroa	Meta	CON	PM	3.83333	-73.33333	280	1991-01-15
35035120	San Juanito	San Juanito	Meta	CON	CP	4.45000	-73.66667	3300	1987-06-15

*Anexo 3: Función de mérito para los 28 municipios del departamento de Córdoba, Componente Clima, Cultivo y Suelo.*

Índice de mérito para los municipios del departamento de Córdoba, se seleccionó el municipio de Ciénaga de Oro con el índice de mérito más alto.

Municipio	CLIMA	CULTIVO	SUELO	TOTAL
AYAPEL	5	3	1	3.5
BUENAVISTA	1	3	1	1.7
CANALETE	1	3	1	1.7
CERETE	10	8	1	7.5
CHIMA	5	8	1	5.25
CHINU	1	3	1	1.7
CIENAGA DE ORO	10	10	2	7.9
COTORRA	0	8	1	3
LA APARTADA	1	3	1	1.7
LORICA	5	8	1	5.25
LOS CÓRDOBAS	0	3	1	1.25
MOMIL	1	3	1	1.7
MONTELIBANO	5	8	1	5.25
MONTERIA	10	0	1	4.7
MOÑITOS	0	0	1	0.2
PLANETA RICA	5	0	1	2.45
PUEBLO NUEVO	1	3	1	1.7
PUERTO ESCONDIDO	5	3	1	3.5
PUERTO LIBERTADOR	1	0	1	0.65
PURISIMA	0	3	1	1.25
SAHAGUN	5	3	1	3.5
SAN ANDRES DE SOTAVENTO	1	3	1	1.7
SAN ANTERO	1	0	1	0.65
SAN BERNARDO DEL VIENTO	5	3	1	3.5
SAN CARLOS	1	5	1	2.4
SAN PELAYO	1	8	1	3.45
TIERRALTA	5	3	1	3.5
VALENCIA	1	5	1	2.4

Anexo 4: Función de mérito para los 29 municipios del departamento del Meta, Componente Clima, Cultivo y Suelo.

Índice de mérito para los municipios del departamento del Meta, se seleccionó el municipio de Puerto López con el índice de mérito más alto.

Municipio	CLIMA	CULTIVO	SUELO	TOTAL
ACACIAS	1	3	1	1.7
BARRANCA DE UPIA	5	3	1	3.5
CABUYARO	1	3	1	1.7
CASTILLA LA NUEVA	1	0	1	0.65
CUBARRAL	1	0	1	0.65
CUMARAL	5	5	1	4.2
EL CALVARIO	1	0	1	0.65
EL CASTILLO	1	3	1	1.7
EL DORADO	1	3	1	1.7
FUENTE DE ORO	1	8	1	3.45
GRANADA	5	8	1	5.25
GUAMAL	1	0	1	0.65
LA MACARENA	10	3	1	5.75
LEJANIAS	5	5	1	4.2
MAPIRIPAN	1	3	1	1.7
MESETAS	5	3	1	3.5
PUERTO CONCORDIA	1	3	1	1.7
PUERTO GAITAN	5	8	1	5.25
PUERTO LLERAS	5	5	1	4.2
PUERTO LÓPEZ	10	8	2	7.7
PUERTO RICO	1	3	1	1.7
RESTREPO	5	3	1	3.5
SAN CARLOS DE GUAROA	1	3	1	1.7
SAN JUAN DE ARAMA	1	3	1	1.7
SAN JUANITO	5	0	1	2.45
SAN MARTIN	5	0	1	2.45
URIBE	1	3	1	1.7
VILLAVICENCIO	10	5	1	6.45
VISTA HERMOSA	5	8	1	5.25



*Anexo 5: Valores Normal Climatológica 1980-2010, Ciénaga de Oro, Córdoba.*

Valores Mensuales multianuales de la normal climatológica de la serie 1981-2010 para las variables de precipitación, número de días con lluvia, temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima, brillo solar y humedad relativa del municipio de Ciénaga de Oro.

	ENE	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
Precipitación (milímetros)	16.4	21.6	27.0	109.2	188.8	154.7	167.5	191.6	192.6	149.3	107.6	43.7
Número de días con lluvia (días)	3.5	3.5	4.8	11.0	15.8	14.5	15.0	16.1	15.5	15.0	10.5	4.6
Temperatura Media (C)	28.04	28.31	28.43	28.45	27.96	27.94	27.90	27.80	27.55	27.52	27.76	27.86
Temperatura Máxima (C)	34.54	34.93	34.89	34.37	32.88	32.79	33.11	32.87	32.56	32.59	32.90	33.56
Temperatura Mínima (C)	23.06	23.42	24.03	24.35	24.18	23.82	23.58	23.53	23.35	23.54	23.62	23.36
Brillo Solar (horas)	7.36	6.50	5.14	4.20	4.10	4.74	5.42	5.16	4.46	4.72	5.32	6.10
Humedad Relativa (porcentaje)	83.74	82.05	81.25	81.45	84.80	85.60	84.75	85.47	85.89	86.47	86.00	84.65

*Anexo 6: Valores Normal Climatológica 1980-2010, Puerto López, Meta.*

Valores Mensuales multianuales de la normal climatológica de la serie 1981-2010 para las variables de precipitación, número de días con lluvia, temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima, brillo solar y humedad relativa del municipio de Puerto López.

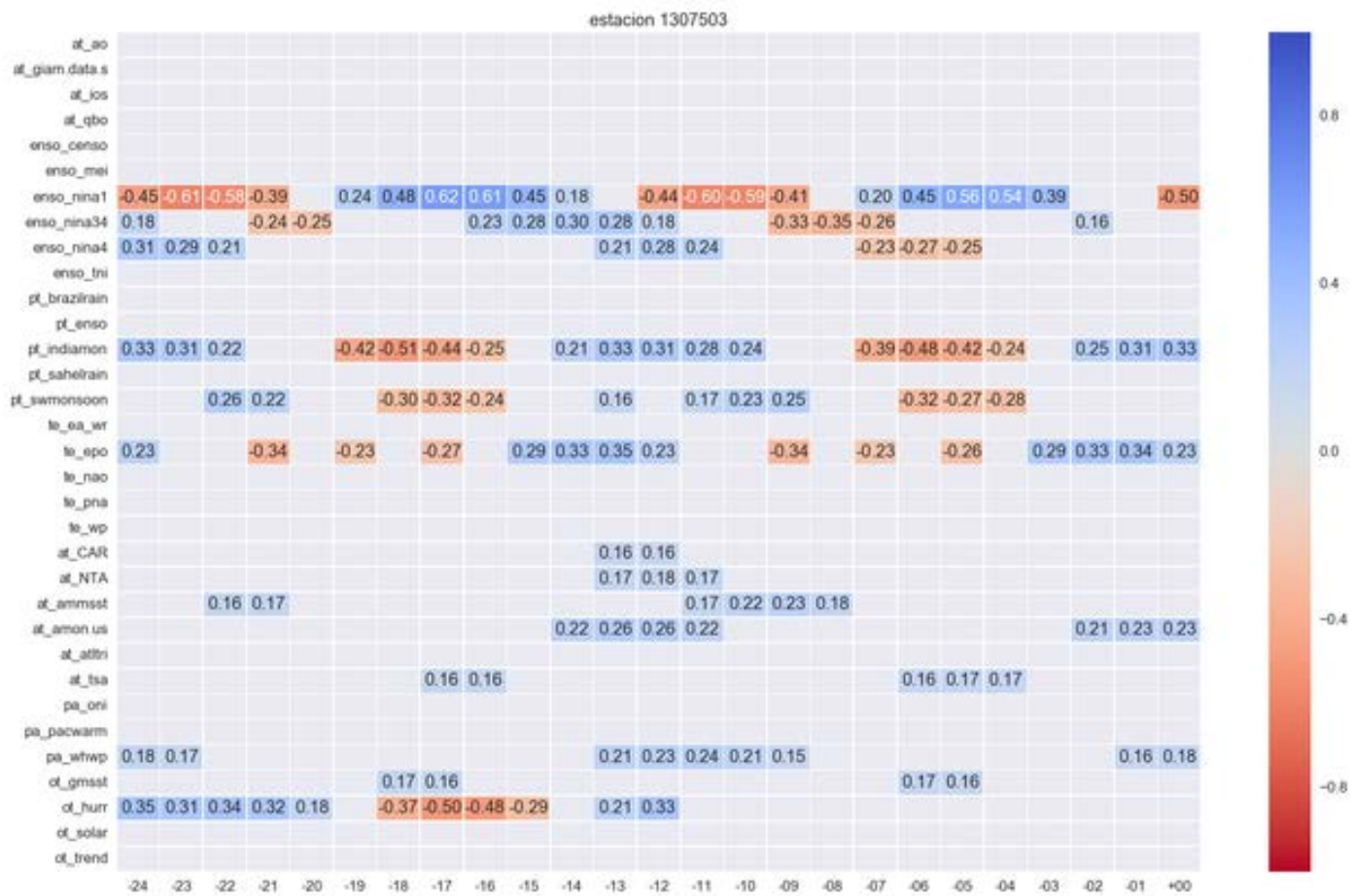
	ENE	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
Precipitación (milímetros)	13.8	37.9	92.4	230.8	313.9	330.4	291.9	257.2	230.2	232.7	140.7	25.6
Número de días con lluvia (días)	1.6	4.1	7.8	14.1	18.5	19.8	18.4	16.7	13.6	13.3	10.0	2.8
Temperatura Media (C)	27.76	27.98	27.85	26.90	26.31	25.53	25.39	25.72	26.35	26.47	26.60	26.93
Temperatura Máxima (C)	34.32	34.76	34.39	32.54	31.21	30.14	30.21	30.79	31.81	31.97	32.06	32.77
Temperatura Mínima (C)	21.70	22.06	22.16	22.57	22.21	22.03	21.80	21.96	22.22	22.36	22.48	21.89
Brillo Solar (horas)	7.25	7.07	5.29	4.36	4.17	4.57	4.34	4.55	5.55	5.70	5.88	6.94
Humedad Relativa (porcentaje)	71.76	71.22	71.56	78.41	82.28	85.25	85.94	84.88	82.69	82.39	81.88	78.20

Anexo 7. Mapa de Colores para las matrices de correlaciones para las estaciones 1307501 (Chima) y 1307503 (Turipana), Córdoba.

Valores de correlación de diferentes índices de variabilidad climática con valores de precipitación para una estación de la región de Córdoba.



“EVALUACIÓN DEL RIESGO AGROCLIMÁTICO EN EL CULTIVO DE MAÍZ (ZEA MAYS) EN LOS DEPARTAMENTOS DE CÓRDOBA Y META”



Anexo 8. Mapa de Colores para las matrices de correlaciones para las estaciones 3518003 y 3518004, Meta.

Valores de correlación de diferentes índices de variabilidad climática con valores de precipitación para una estación de la región del Meta.

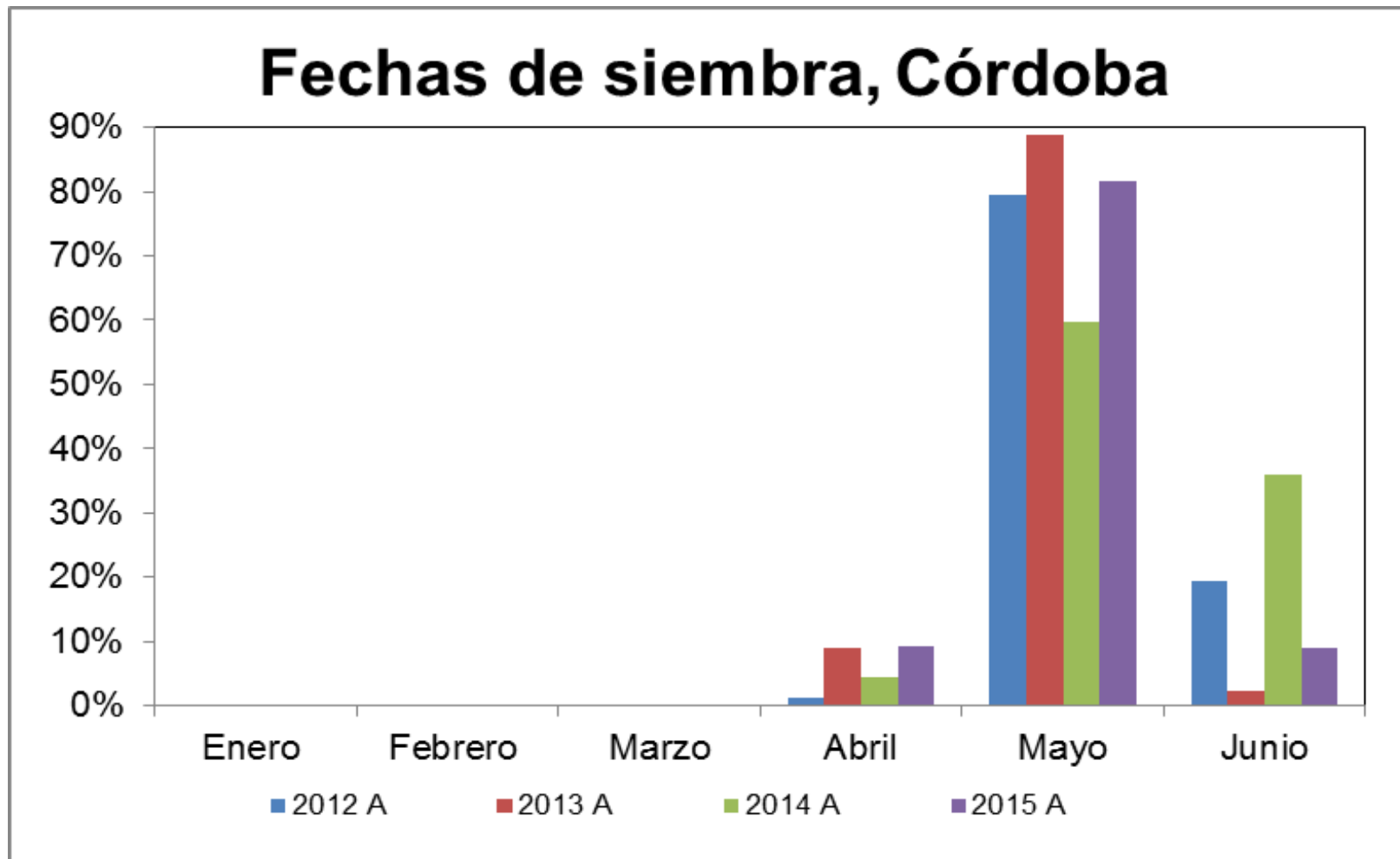


“EVALUACIÓN DEL RIESGO AGROCLIMÁTICO EN EL CULTIVO DE MAÍZ (ZEA MAYS) EN LOS DEPARTAMENTOS DE CÓRDOBA Y META”



Anexo 9: Fecha de siembra para el departamento de Córdoba, Semestre A.

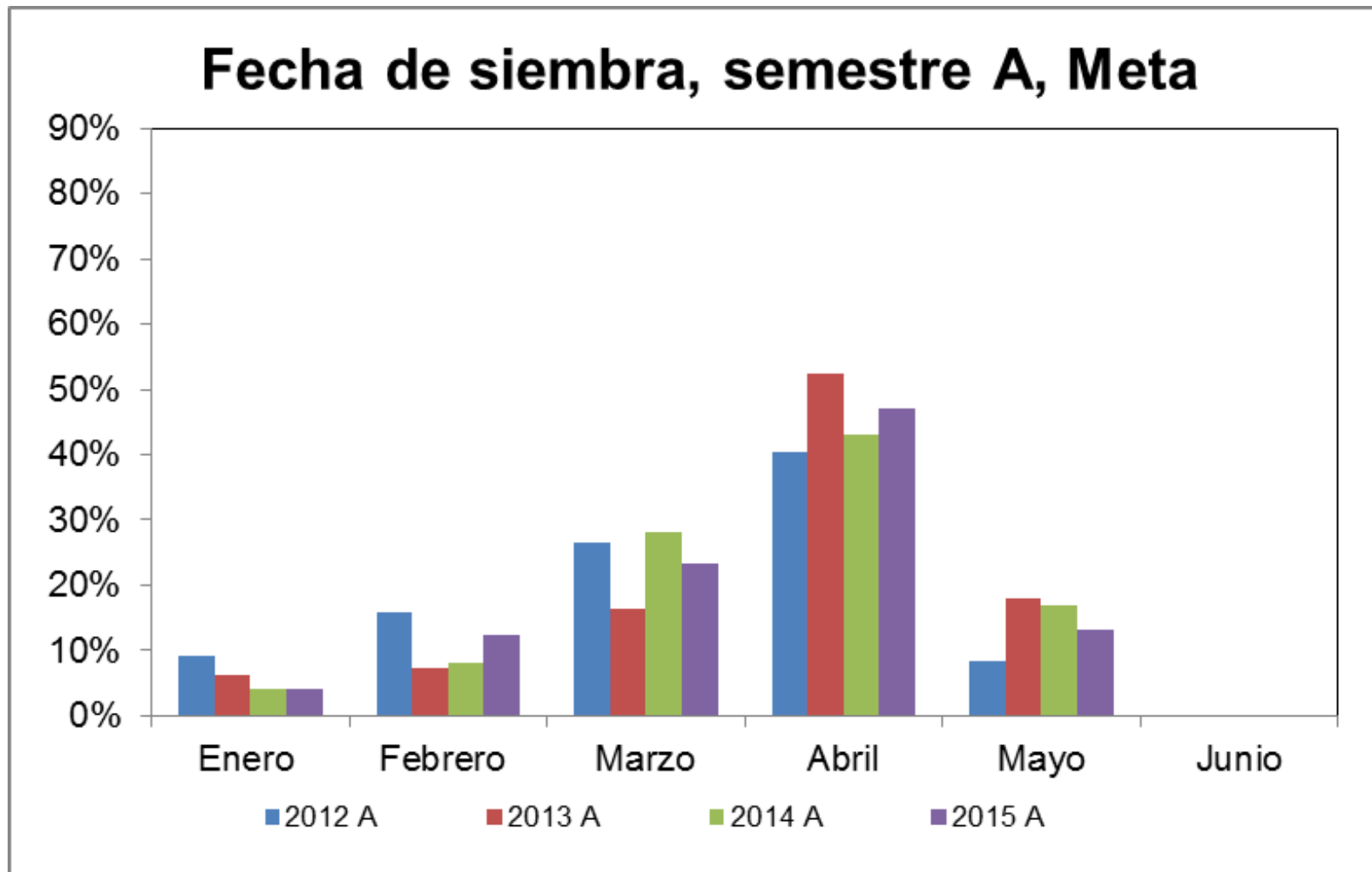
Porcentajes de fechas de siembra más probable del maíz para la región de Córdoba en el semestre A.



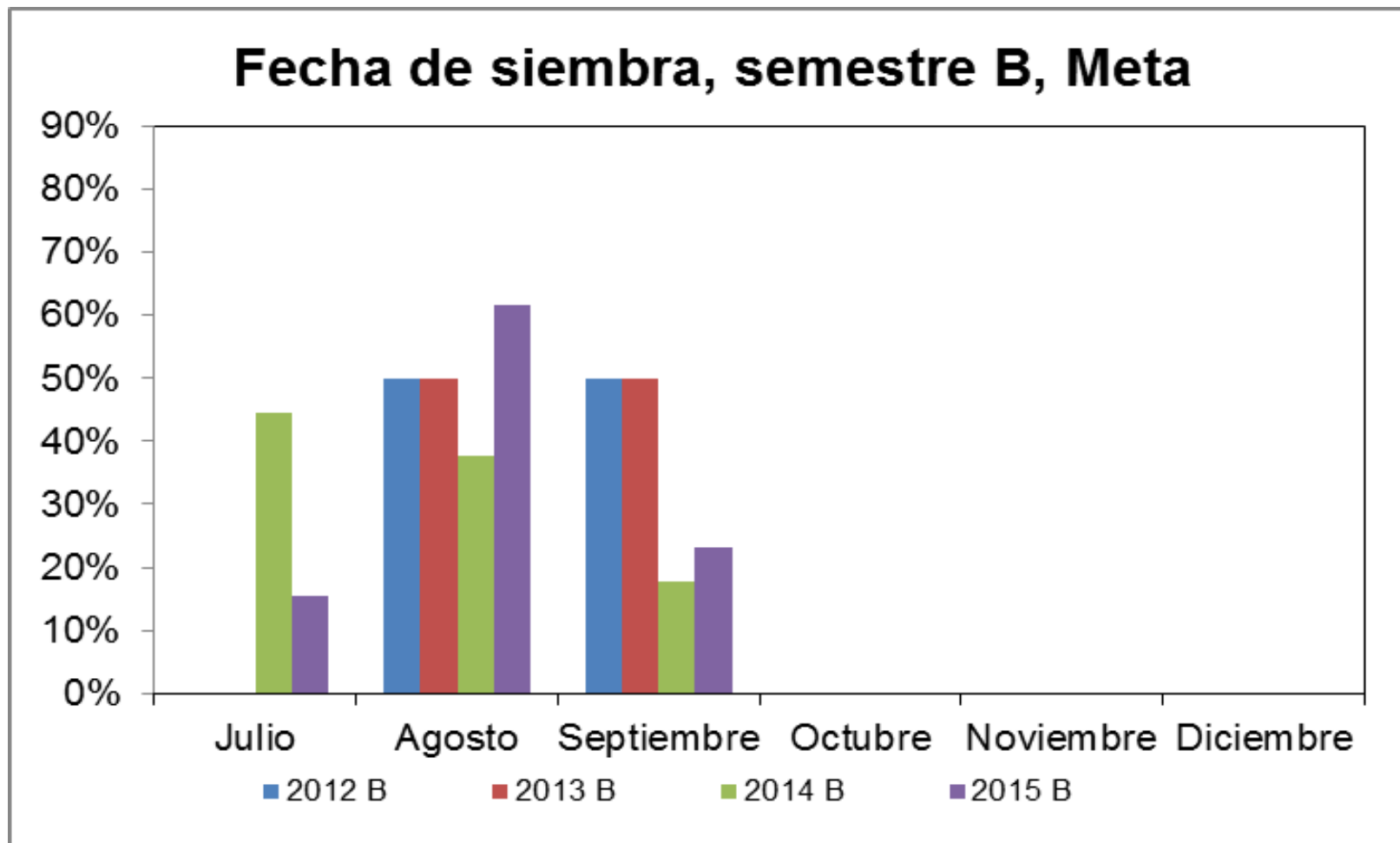
Fuente: FENALCE, 2016.

Anexo 10. Fecha de siembra para el departamento de Meta Semestre A.

Porcentajes de fechas de siembra más probable del maíz para la región del Meta en el semestre A y B.







Fuente: FENALCE, 2016.