



UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

BALANCE HÍDRICO PARA LA PLANEACIÓN AGRÍCOLA DEL ARROZ EN EL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA

TESIS DE GRADO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:

JESICA NATALIA VALENCIA GONZALEZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DR. RAMÓN ARTEAGA RAMIREZ



APROBADA



Chapingo, Estado de México, Noviembre 2020

BALANCE HÍDRICO PARA LA PLANEACIÓN AGRÍCOLA DEL ARROZ EN EL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA

Tesis realizada por JESICA NATALIA VALENCIA GONZALEZ bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

DIRECTOR:



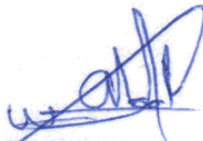
DR. RAMÓN ARTEAGA RAMIREZ

ASESOR:



DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

ASESOR:



DR. ABEL QUEVEDO NOLASCO

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo General	3
1.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Literatura Citada	4
2 REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1 El sector arrocero en Colombia.....	6
2.2 El arroz en el Valle del Cauca, Colombia	9
2.3 Literatura Citada	12
3 DATOS DIARIOS FALTANTES EN REGISTROS DE SERIES CLIMATOLÓGICAS TEMPORALES.....	17
3.1 Resumen.....	17
3.2 Introducción	18
3.3 Materiales Y Métodos	20
3.3.1 Localización del área de estudio	20
3.3.2 Estaciones meteorológicas utilizadas.....	21
3.3.3 Caracterización de la información de las estaciones meteorológicas.	
21	
3.3.4 Estimación de datos faltantes diarios	22
3.3.5 Estimación Del Error.....	25
3.4 Resultados Y Discusión	26
3.4.1 Precipitación:.....	26
3.4.2 Brillo Solar:	28
3.4.3 Temperatura Mínima:	30

3.4.4	Temperatura Máxima:	32
3.4.5	Humedad Relativa:	34
3.4.6	Evaporación:.....	36
3.5	Conclusiones	39
3.6	Literatura Citada	40
4	MODELOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA DIARIA DEL ARROZ EN EL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA.....	44
4.1	Resumen.....	44
4.2	Introducción	45
4.3	Materiales y métodos	47
4.3.1	Ubicación y características del área de estudio.....	47
4.3.2	Información climatológica	47
4.3.3	Modelos para estimar la Evapotranspiración de referencia diaria (ET _o)	49
4.3.4	Modelo de Regresión Lineal	51
4.3.5	Índices estadísticos	52
4.4	Resultados y discusión.....	52
4.5	Conclusiones	62
4.6	Literatura citada.....	63
5	INICIO DE LA ESTACIÓN DE CRECIMIENTO DEL ARROZ EN EL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA	70
5.1	Resumen.....	70
5.2	Introducción	71
5.3	Materiales y métodos	72

5.3.1	Localización de la zona de estudio.....	73
5.3.2	Información climatológica	73
5.3.3	Evapotranspiración de referencia (ET _o)	73
5.3.4	Criterios del inicio de la estación de crecimiento (IEC).....	74
5.3.5	Procedimiento probabilístico del inicio de la estación de crecimiento (IEC)	75
5.3.6	Balance hídrico gráfico para estimar el inicio de la temporada lluviosa (ILL) y la duración de la estación de crecimiento (DEC)	75
5.4	Resultados y discusión.....	77
5.4.1	Establecimiento del Inicio de la estación de crecimiento (IEC).....	77
5.4.2	Identificación del Inicio de la temporada lluviosa (ILL)	80
5.4.3	Duración de la estación de crecimiento (DEC)	83
5.5	Conclusiones	89
5.6	Literatura citada.....	90
6	REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ARROZ PARA DOS CALENDARIOS DE SIEMBRA EN EL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA	95
6.1	Resumen.....	95
6.2	Introducción	96
6.3	Materiales y métodos	98
6.3.1	Localización del área de estudio	98
6.3.2	Información climática.....	98
6.3.3	Modelo Cropwat	99
	Módulo de clima:	99
	Módulo de Precipitación:	99
	Módulo de cultivo:	99
	Módulo de suelo:	100

6.3.4	Estimación de la Reducción de rendimiento (RR)	100
6.4	Resultados y discusión.....	101
6.4.1	Evapotranspiración de referencia (ET _o)	101
6.4.2	Evapotranspiración del cultivo (ET _c)	103
6.4.3	Precipitación Efectiva (P _{ef}).....	106
6.4.4	Reducción del rendimiento (RR).....	109
6.5	Conclusiones	119
6.6	Literatura citada.....	119
7	ANEXOS	124

LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1. Descripción de las estaciones climáticas	21
Cuadro 3.2. Datos ausentes para cada variable de acuerdo con su periodo de estudio.	22
Cuadro 3.3. Datos perdidos para cada variable de acuerdo con su periodo de estudio.	25
Cuadro 4.1. Descripción de las estaciones climáticas	47
Cuadro 4.2. Coeficiente de Determinación (R^2) de la ETo-PM respecto a HS, PT, GL y LN para cada estación	53
Cuadro 4.3. Coeficiente de Pearson (r) de la ETo-PM respecto a HS, PT, GL y LN para cada estación	55
Cuadro 4.4. Raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) de la ETo-PM respecto a HS, PT, GL y LN para cada estación	57
Cuadro 5.1. Coordenadas geográficas de las estaciones usadas.	74
Cuadro 5.2. Días julianos (Dj) del inicio de la estación de crecimiento para las diferentes probabilidades de no excedencia de la primera sección del año	78
Cuadro 5.3. Días julianos (Dj) del inicio de la estación de crecimiento para las diferentes probabilidades de no excedencia de la segunda sección del año....	79
Cuadro 5.4. Días julianos del Inicio de la temporada Lluviosa (ILL) de la primera sección del año, para los diferentes niveles de probabilidad	81
Cuadro 5.5. Días julianos del Inicio de la temporada Lluviosa (ILL) de la segunda sección del año, para los diferentes niveles de probabilidad.	82
Cuadro 5.6. Coeficiente de determinación (R^2) entre la cantidad de días lluviosos y la precipitación en ambas épocas del año por el periodo de 1989 – 2016....	82
Cuadro 5.7. Duración de la estación de crecimiento (DEC) en días de la primera sección del año, para los diferentes niveles de probabilidad de excedencia. ...	86

Cuadro 5.8. Duración de la estación de crecimiento (DEC) en días del mes de la segunda sección del año, para los diferentes niveles de probabilidad de excedencia.....	86
Cuadro 5.9. Períodos de crecimiento de diferentes regiones para el cultivo de arroz.....	87
Cuadro 5.10. Diferentes niveles de probabilidad de excedencia para la duración del déficit de lluvia (DDLL) entre las estaciones de crecimiento de Junio y Agosto.	88
Cuadro 5.11. Diferentes niveles de probabilidad de excedencia para la duración del déficit de lluvia (DDLL) entre las estaciones de crecimiento de Diciembre y febrero	89
Cuadro 6.1. Datos de entrada del arroz.....	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Ubicación de la zona de estudio	20
Figura 3.2. Relación de la precipitación observada y estimada de la estación Ing. miranda a través del método RN	28
Figura 3.3. Relación de la precipitación observada y estimada de la estación Ing. Cauca a través del método IDW.	28
Figura 3.4. Relación del brillo solar observado y estimado de la estación Ing. Cauca a través del método RN	29
Figura 3.5. Relación del brillo solar observado y estimado de la estación Ing. Miranda a través del método IDW.....	30
Figura 3.6. . Relación de la temperatura mínima observada y estimada de la estación Ciat Quilichao	31
Figura 3.7. Relación de la temperatura mínima observada y estimada de la estación La Independencia mediante el método IDW	32
Figura 3.8. Relación de la temperatura máxima observada y estimada de la estación Ing. Bengala	33
Figura 3.9. Relación de la temperatura máxima observada y estimada de la estación Ing. Cauca mediante el método SF	34
Figura 3.10. Relación de la humedad relativa observada y estimada de la estación Ing. Miranda mediante el método RN	35
Figura 3.11. Relación de la humedad relativa observada y estimada de la estación Ciat Quilichao mediante el método SF	35
Figura 3.12. Relación de la humedad relativa observada y estimada de la estación Ing. Cauca mediante el método IDW	36
Figura 3.13. Relación de la evaporación observada y estimada de la estación Ciat Quilichao.....	37

Figura 3.14. Relación de la evaporación observada y estimada de la estación Topacio mediante el método SF	38
Figura 3.15. Resumen estadístico del índice RMSE de las variables en curso	39
Figura 4.1. Ubicación de la Zona de estudio.....	48
Figura 4.2. Estimaciones de la ETo para la estación Ciat Quilichao.....	58
Figura 4.3. Estimaciones de la ETo para la estación Independencia.....	59
Figura 4.4. Estimaciones de la ETo para la estación Ing. Miranda.	60
Figura 4.5. Estimaciones de la ETo para la estación Bengala.	61
Figura 4.6. Estimaciones de la ETo para la estación Ing. Cauca.....	62
Figura 5.1. Ubicación de la zona de estudio	73
Figura 5.2. Balance hídrico gráfico, adaptada de Arteaga et al., (2006)	76
Figura 5.3. Variación de la DEC para la primera época del año	84
Figura 5.4. Variación de la DEC para la Segunda época del año.	84
Figura 5.5. Balance hídrico gráfico de la estación Ing. Bengala, año 2016.	85
Figura 6.1. Ubicación de la Zona de estudio.....	98
Figura 6.2. Evapotranspiración de referencia media mensual de las estaciones	103
Figura 6.3. Promedio de la Evapotranspiración del cultivo por etapas de cada estación	105
Figura 6.4. Precipitación efectiva de las estaciones en la primera sección ...	107
Figura 6.5. Precipitación efectiva de las estaciones en la segunda sección..	107
Figura 6.6. . Frecuencia relativa y frecuencia relativa acumulada de las disminuciones porcentuales del rendimiento de arroz, para la estación Ciat Quilichao (1989 - 2016).	110
Figura 6.7. Frecuencia relativa y frecuencia relativa acumulada de las disminuciones porcentuales del rendimiento de arroz, para la estación Independencia (1989 - 2016).....	110

Figura 6.8. Frecuencia relativa y frecuencia relativa acumulada de las disminuciones porcentuales del rendimiento de arroz, para la estación Ing. Cauca (1989 - 2016).	112
Figura 6.9. Frecuencia relativa y frecuencia relativa acumulada de las disminuciones porcentuales del rendimiento de arroz, para la estación Ing. Miranda (1989 - 2016).	112
Figura 6.10. Promedio de la reducción de rendimiento por año para ambas secciones.....	113
Figura 6.11. Reducción de rendimiento por etapas en ambas secciones para la estación Ciat Quilichao	115
Figura 6.12. Reducción de rendimiento por etapas en ambas secciones para la estación Independencia	115
Figura 6.13. Reducción de rendimiento por etapas en ambas secciones para la estación Ing.Cauca	118
Figura 6.14.Reducción de rendimiento por etapas en ambas secciones para la estación Ing.Miranda.....	118
Figura 7.1. Distribución espacial del IEC del primer criterio de la primera época del año	124
Figura 7.2.Distribución espacial del IEC del segundo criterio de la primera época del año	125
Figura 7.3. Distribución espacial del IEC del tercer criterio de la primera época del año	126
Figura 7.4. Distribución espacial del IEC del primer criterio de la segunda época del año	127
Figura 7.5. Distribución espacial del IEC del segundo criterio de la segunda época del año	128
Figura 7.6. Distribución espacial del IEC del tercer criterio de la segunda época del año	129

ABREVIATURAS

FAO:	La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
IDEAM:	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
CVC:	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC
DANE:	Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia
FEDEARROZ:	Federación Nacional de arroceros
FEDEARROZ 50:	Variedad de arroz
CIAT:	Centro Internacional de Agricultura Tropical
DJ:	Día juliano
Ton	Toneladas
ha:	Hectáreas
mm:	Milímetros
M:	Metros
Km:	Kilómetros
m.s.n.m:	Metros sobre el nivel del mar
d:	Día
Kg:	Kilogramo
Ing:	Ingenios
RN:	Razón normal
IDW:	Distancia Inversa al cuadrado
SF:	Análisis armónico de la serie de fourier
R²:	Coeficiente de determinación
r:	Coeficiente de correlación

RMSE:	Raíz del error cuadrático medio
ET:	Evapotranspiración
ETo:	Evapotranspiración de referencia
PM:	Ecuación de la FAO Penman-Monteith
PT:	Modelo Priestley-Taylor
LN:	Modelo Linacre
GL:	Modelo García y López
HS:	Modelo Hargreaves y Samani
ILL:	Inicio del periodo de lluvias
IEC:	Inicio de la estación de crecimiento
DEC:	Duración de la estación de crecimiento
DDLL:	Duración del déficit de lluvia
ETc:	Evapotranspiración del cultivo
Pef:	Precipitación efectiva
RR:	Reducción del rendimiento

DEDICATORIA

A mis padres Hernando Valencia y Gladys González

A mi hermano y consejero, Milton A. Valencia González

A mi amado y apoyo Olaf Valencia Islas

A mi director y ejemplo a seguir, el Dr. Ramón Arteaga Ramírez

A mis amigas: Alba, Nathalia, Mayra, Alejandra y Cynthia

Por todo su apoyo y cariño,

Infinitas gracias.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico para desarrollar mis estudios de posgrado. A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA), por otorgarme la oportunidad de educarme y realizar mis estudios de posgrado.

A mis asesores, por su valioso apoyo y guía constante en la revisión y aprobación del proyecto, en especial al Dr. Ramón Arteaga Ramírez; por todo su tiempo dedicado en apoyo a la elaboración de este proyecto; aportando conocimiento, consejos y experiencias.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Jesica Natalia Valencia Gonzalez
Fecha de nacimiento: 12 Noviembre de 1993
Lugar de Nacimiento: Guadalajara de Buga, Valle del Cauca - Colombia

Desarrollo Académico

Bachillerato: Institución Educativa Técnica Occidente 2010
Licenciatura Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira 2017

RESUMEN GENERAL

El manejo de los datos climáticos permite conocer y abordar cuantitativamente la disponibilidad climática de un área determinada; para la adaptación o producción de cultivos, divulgando resultados a partir de información básica. El objetivo general fue Evaluar y analizar el Balance hídrico del arroz en el Valle del Cauca - Colombia para la planeación agrícola de éste en dos épocas de siembra. Se utilizaron nueve estaciones con información climatológica diaria las cuales permitieron, el relleno de datos faltantes de las variables precipitación, brillo solar, humedad, evaporación temperatura máxima y mínima; a través de los métodos: Razón normal (RN), Análisis armónico de la serie de Fourier (SF) y la distancia inversa al cuadrado (IDW). Posteriormente, se evaluó la evapotranspiración de referencia diaria (ET_o) con las ecuaciones de Hargreaves Samani, Priestley y Taylor, García y López y Linacre; respecto a la ecuación de FAO Penman-Monteith, la obtención de las fechas de inicio del periodo de lluvias, el inicio de la estación de crecimiento y la duración de la misma a diferentes niveles de probabilidad y finalmente; la reducción del rendimiento de arroz a través de un balance hídrico diario para dos épocas de siembra en el programa Cropwat. Se identificó que la estación Independencia es la ubicación más representativa del área de estudio; por su disponibilidad hídrica y tipo de suelo, seguida por la estación Ciat Quilichao. En cambio, las estaciones más lejanas al área de producción de arroz exhibieron los valores más extremos en la reducción de rendimiento; exhibiéndolas como las estaciones de menos referencia.

Palabras claves: Arroz, Datos faltantes, Evapotranspiración de referencia (ET_o), Estación de crecimiento, Rendimiento, Cropwat

ABSTRACT

The management of the climatic data allows to know and approach quantitatively the climatic availability of a certain area; for the adaptation or production of crops, disclosing results from basic information. The general objective was to evaluate and analyze the water balance of rice in the Cauca Valley - Colombia in two sowing seasons for its agricultural planning. The methods: Normal Ratio (NR), Fourier Series Harmonic Analysis (FS) and the inverse distance squared (IDW) were used in nine stations with daily climatological information, which allowed the filling of missing data of the variables precipitation, solar brightness, humidity, evaporation, maximum and minimum temperature. Subsequently, the daily reference evapotranspiration (ET_o) with the equations of Hargreaves Samani, Priestley and Taylor, Garcia and Lopez and Linacre; regarding the equation of FAO Penman-Monteith was evaluated, obtaining the dates of the beginning of the rainy period, the beginning of the growing season and the duration of the same at different levels of probability, and finally the reduction of rice yield through a daily water balance for two sowing seasons in the Cropwat program. The Independencia station was identified as the most representative location of the study area because of its water availability and soil type, followed by the Ciat Quilichao station. On the other hand, the stations farthest from the rice production area exhibited the most extreme values in yield reduction; displaying them as the least reference stations.

Keywords: Rice, Missing Data, Reference Evapotranspiration (ET_o), sowing Times, Yield, Cropwat.

1. INTRODUCCIÓN

El arroz (*Oryza sativa L.*) es un cereal semiacuático que se encuentra entre los cultivos alimenticios más antiguos e importantes del mundo (Naseer, Ashfaq, Razzaq and Ali, 2020). En Colombia, el arroz se posiciona en el puesto número uno en circunstancias de valor económico entre las siembras de corto plazo y ocupa el tercer puesto como país productor de Latino América y del Caribe posteriormente de Brasil y Perú (FAO, 2010). Sin embargo, existe una idea equivocada en creer, que es posible tener el cultivo de arroz de forma continua y competitiva en los países tropicales; tal cual es el caso de Colombia, dadas sus condiciones ambientales, propicia la producción de este cultivo durante casi todo el año.

El rendimiento del arroz depende de los factores ambientales disponibles en todo el año, en el sur del Valle del Cauca-Colombia. Entre el año 2001 y 2007 un grupo de investigadores identificaron que, estableciendo de mejor forma, la fecha estratégica de siembra se contribuiría al incremento del rendimiento de este cereal; ya que la mayoría de las siembras de arroz en el trópico se ejecutan según las prácticas o los períodos de lluvia y pocas veces se planean a partir de reportes técnicos (Degiovanni, Martínez, y Motta, 2010). Ahora bien, es necesario hallar la época de siembra donde se obtenga alto rendimiento, y que elementos climáticos influyen de forma significativa; una siembra oportuna permite a las plantas desarrollarse a un nivel óptimo en los meses de mayor oferta ambiental; y ello será posible al realizar un balance hídrico diario que permita identificar, cuáles son las mejores condiciones ambientales asociadas al rendimiento del arroz en el sur del Valle del Cauca, Colombia.

Antecedentes

En Colombia, variabilidad del rendimiento en los cultivos se deben en un 40% a los efectos de las variaciones climáticas (López y Hernández, 2016) y el 60% a

la preparación del terreno, asistencia técnica agropecuaria y las prácticas agrícolas; como: la fertilización, el manejo integrado de plagas y enfermedades (MIPE) entre otras, (Husserl y Suso, 2019). Estar al tanto de los aspectos agroclimáticos del arroz permiten prever a tiempo el impacto de estos ante la fenología del cereal; siendo estos la principal causa ambiental de algún tipo de limitación en el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo (Barrios, 2016). Para tal efecto, Lasso (1991), identificó que el departamento del Valle del Cauca posee condiciones ideales para el establecimiento del arroz para dos secciones al año, con un periodo medio de crecimiento de 150 días cada uno; dentro del cual cabe perfectamente el ciclo vegetativo del arroz. Al mismo tiempo, reconoció que entre los meses de febrero y junio el rendimiento es menor pero el consumo de agua alto, a diferencia del segundo periodo agosto-diciembre. El estudio de Degiovanni, Gómez, y Sierra (2004), determinaron las fases de crecimiento, etapas de desarrollo y componentes del rendimiento de la variedad Fedearroz 50, bajo el sistema de arroz riego trasplantado en Montería - Córdoba Colombia; y dicha variedad rindió en promedio 8,435.9 Kg de arroz paddy en un ciclo de 120 días, prevaleciendo a las variedades Colombia XXI y Fedearroz 2000 en 1,425.9 Kg ha⁻¹ y 2,015.9 Kg ha⁻¹ correspondientemente.

Aunado a la situación, Quevedo, Beltran and Barragan (2019), evaluaron 10 fechas de siembra para identificar qué época del año presentaba las mejores condiciones ambientales que permiten maximizar el rendimiento del cultivo en el departamento del Tolima, Colombia; y establecen que el mes de mayo y diciembre son los meses que presentan rendimientos más altos, también identificaron que el típico componente abiótico que está altamente afín con el rendimiento es la radiación solar entre los estadios fenológicos 51 a 77 (Comienzo de la emergencia de la panícula hasta la formación del fruto; estadio Lechoso tardío), y una vez alcanzan los valores óptimos de cada una de estos estados se obtiene un rendimiento superior a los 9,500 kg ha⁻¹. Las afirmaciones anteriores sugieren que la cantidad de investigaciones denota más trabajos relacionados con el balance hídrico, las tasas de producción y fechas de siembra

del arroz, específicamente en Valle del Cauca Colombia, donde es un cultivo de relevancia social y económica.

Justificación

El propósito de los estudios agroclimáticos se apoya en registros de series climatológicas temporales que permitan reconocer los elementos climáticos, su variabilidad, frecuencia y probabilidad de valores; que permiten relacionarlos con los tiempos y exigencias ambientales de los ciclos de los cultivos. La disponibilidad de la información climática y las características de las plantas ayudan a comprender la variabilidad del rendimiento y sus factores determinantes (Huang, Shan, Cao and Zou, 2016); con el uso de los elementos climatológicos y físicos, que permiten estimar la evapotranspiración de referencia diaria (Eto) de este cereal mediante varios modelos que en algunas ocasiones concuerdan con los eventuales usos de ellos en otros ambientes.

Por consiguiente, para esta zona de producción es necesario estimar los periodos, zonas y cantidades de déficit o excesos de humedad, las sequías que se presentan incluso dentro de la temporada húmeda, los componentes de la estación de crecimiento; y hasta la variabilidad de los rendimientos. Siendo así, para el área de estudio ha sido importante reconocer los elementos climáticos ideales, que permitan aumentar el rendimiento y mantener una buena productividad en fechas de siembra idóneas; con contextos ambientales óptimos (Quevedo et al., 2019).

1.1 Objetivo General

Evaluar y analizar el Balance hídrico del arroz en el Valle del Cauca-Colombia.

1.2 Objetivos Específicos

- Analizar y validar la estimación de los datos diarios faltantes de las variables precipitación, brillo solar, evaporación, temperatura máxima, temperatura mínima y humedad relativa, mediante los métodos: Razón

Normal (RN), Serie de Fourier (SF) y Distancia Inversa al Cuadrado (IDW), en las estaciones climatológicas circundantes a la zona de producción de arroz en el departamento del Valle del Cauca, Colombia.

- Analizar y evaluar la evapotranspiración de referencia diaria (ET_o) de las ecuaciones de Hargreaves Samani, Priestley y Taylor, García y López y Linacre; respecto a la ecuación de FAO Penman-Monteith.
- Definir y analizar el inicio de lluvias, el inicio de la estación de crecimiento y la duración de la estación de crecimiento del arroz en el Valle del Cauca, Colombia.
- Determinar la reducción de rendimiento del arroz seco mediante el programa Cropwat.

La presente tesis se divide en seis capítulos: El primero corresponde a una introducción general; el segundo capítulo el estado del arte de la investigación; el tercer es sobre la estimación de datos faltantes en series climatológicas; el cuarto se evaluó una metodología para obtener las necesidades hídricas del cultivo de arroz en el Valle del Cauca, el quinto es el análisis del inicio del periodo de lluvias, el inicio de la estación de crecimiento a diferentes niveles de probabilidad y la estación de crecimiento a diferentes niveles de probabilidad y su duración; el sexto es sobre la reducción de rendimiento del arroz, a través de un balance hídrico diario.

1.3 Literatura Citada

Barrios, P.C. (2016). Zonificación agroecológica para el cultivo de arroz de riego (*Oryza Sativa L.*) en Colombia (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia.

Degiovanni, M. V., Gómez, J.A. y Sierra, J.M. (2004). Growth, development and yield components analysis of three rice varieties (*Oryza Sativa L.*) in Monteria, Cordoba. *Temas Agrarios*. 9 (1), 21 – 29.

- Degiovanni, B.V., Martínez R.C.P. y Motta, O.F. (2010). Producción Ecoeficiente del arroz en América Latina, Tomo I. CIAT, FLAR y UNICORDOBA. (Eds). Cali-Colombia. 513p.
- FAO. (2010) Estadísticas mundiales sobre cultivos. Disponible en www.faostat.org.
- Huang, M., Shan, S., Cao, F. and Zou, Y. (2016). The solar radiation related determinants of rice yield variation across a wide range of regions. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*. 78, 123 - 128. 10.1016/j.njas.2016.05.004.
- Husserl, J., & Suso, J. (2019). ARROZ BLANQUITA: Construyendo comunidad, oportunidades y crecimiento para los pequeños agricultores. *Revista De Ingeniería*. (47), 32 - 41. 10.16924/riua.v0i47.975.
- Lasso, E. L. D. (1991). *Zonificación agroclimática de los cultivos de mayor importancia económica del territorio Colombiano*. HIMAT.
- López, F.A.J. y Hernández, C.D. (2016). Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *El Trimestre Económico*. 4 (332), 459 – 496. <http://dx.doi.org/10.20430/ete.v83i332.231>.
- Naseer, M.A.U.R., Ashfaq, M., Razzaq, A. and Ali, Q. (2020). Comparison of water use efficiency, profitability and consumer preferences of different rice varieties in Punjab, Pakistan. *Paddy Water Environment*. 18, 273 – 282. <https://doi.org/10.1007/s10333-019-00780-9>.
- Quevedo, Y.M., Beltran, J.I. and Barragán, E. (2019). Identification of climatic and physiological variables associated with rice (*Oryza sativa*L.) yield under tropical conditions. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. 72 (1), 8699 – 8706. 10.15446/rfnam.v72n1.72076.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

Las evaluaciones del cambio climático en la agricultura se han utilizado para reportar los posibles efectos de este y el potencial de adaptación de los cultivos (Reidsma et al., 2015). De los cultivos más disponibles en el mundo, el arroz es un cereal con una alta demanda en el consumo humano; y esto ha permitido identificar que en la mayoría de las investigaciones en los efectos del cambio climático sobre el rendimiento de este cereal, se muestran que, en los países del trópico y de ingresos promedios son muy vulnerables a presentar disminuciones en el rendimiento a largo plazo; aunque han registrado el mayor crecimiento de los rendimientos observados durante un mismo período de referencia (Aggarwal, Vyas, Thornton, Campbell and Kropff, 2019).

El rendimiento de los cultivos (especialmente de los cereales) expresan que las tasas de crecimiento se han mantenido entre el 1.5 y el 2% anual, desde la revolución verde hasta el presente (Crespo et al., 2018). Sin embargo, Aggarwal et al. (2019), enuncian que los efectos del cambio climático sobre el rendimiento de los cultivos a nivel mundial han proyectado disminuciones ya en el decenio de 2020 y se prevé que las pérdidas aumenten con el tiempo; hasta un 50% para la década de 2080. En general, las variables del clima suelen ser la información principal para el procesamiento de estudios agrometeorológicos. De estos, se puede observar que el desarrollo de una planta de arroz es notoriamente afectado por los valores extremos de la temperatura, la radiación solar y la disponibilidad del agua diaria; cuyos elementos afectan los índices de crecimiento y rendimiento, que permiten observar y relacionar la habilidad de una especie vegetal para crecer y desarrollarse en un ambiente determinado; manifestando su conducta en función del tiempo (Degiovanni, Gómez y Sierra, 2004).

2.1 El sector arrocero en Colombia

El Arroz es un cultivo de gran importancia en América Latina; ya que el consumo de este cereal proporciona un 30% de la energía necesaria en el ser humano

(FAO, 2018). En Colombia, este cereal ocupa el primer lugar en seguridad alimentaria, valor económico y generación de empleo (Aramendiz, Espitia y Cardona, 2011); adicionalmente ocupa el tercer lugar como país productor en América Latina y del Caribe (FAO, 2010), y gracias a su oferta ambiental posee varios sistemas de producción; donde la siembra del arroz paddy simboliza el 12% del área cosechada y el 30% de los cultivos temporales. Su producción representa el 6% del valor de la producción agropecuaria y el 10% de la actividad agrícola del país (Fedearroz, 2016).

La futura producción de arroz en el país estará determinada por el lugar donde se pueda cultivar el cereal y por la productividad de este; siendo así, ya se ha identificado que, en Colombia este cereal puede trasladarse a altitudes más altas, pero no a latitudes fuera de la zona tropical. (Castro, Hyman, Rubiano, Ramírez y Achicanoy, 2019). En el período del 2010 al 2017, los rendimientos por hectárea cosechada a nivel mundial fueron de 4,5 t ha⁻¹ mientras que en Colombia fueron de 4,6 t ha⁻¹, lo que arroja una productividad similar al promedio mundial (Fedearroz, 2019); de hecho, históricamente la ingesta de arroz ha sido constante en los 37 kilos per cápita en áreas urbanas y 40 kilos en áreas rurales desde la década de los 90; ya que en el año 2017 la demanda de consumo alcanzó los 40.56 y 44.20 kilos en zonas urbanas y rurales (Troncoso, 2019). Por ende, conocer la información climática bajo la cual se produce el arroz en Colombia; permite cuantificar su impacto en los rendimientos e identificar las condiciones más adecuados para cada cultivar.

Un estudio hecho por Delerce et al. (2016), exponen que este tipo de información es útil para que los agricultores mejoren la toma de decisiones, como la elección de un cultivar más adecuado o postergar el establecimiento de un cultivo; o esperar una pauta climática más favorable si las condiciones actuales se consideran menos favorables. También, el valor añadido de este es que demuestra cómo los datos observados pueden utilizarse para generar información eficientemente procesable y contextualizada para la toma de decisiones en las hectáreas, por ejemplo: Los registros climáticos de Saldaña en

el departamento del Tolima, destacan dos picos de radiación solar cada año; estos ocurren típicamente de febrero a abril, y de julio a octubre. Como resultado, muchos cultivos de arroz no son capaces de explotar la utilidad óptima de la radiación solar en la última etapa de crecimiento. Esta situación, se está convirtiendo en uno de los principales factores limitantes de obtención de altos rendimientos para los agricultores, pues se debe reorganizar las fechas de siembra.

Actualmente, se conoce que el cambio climático es una limitación potencial para los productores de arroz en Colombia; ya que este podría traer pérdidas económicas altas (Delerce et al, 2016), pues ha habido un notorio aumento de 7°C en la temperatura y una disminución del 10% en la precipitación total anual; lo que genera inestabilidad en el rendimiento del cultivo entre un 5 y 29% (Lizumi et al., 2014), puesto que un cese inoportuno de agua en la etapa reproductiva o de maduración del arroz; afecta la reducción del rendimiento de forma severa (Nazmul, Hazrat and Muhammad, 2019), o dicho por Lobell et al. (2018), quienes realizaron un estudio de riesgo climático para siete cultivos en 12 regiones diferentes en el mundo, indican que se proyectan reducciones del 10% en el rendimiento del arroz en la región andina de Colombia.

Acorde a lo anterior, Un estudio desarrollado por Cortés y Alarcón (2016), a través de Arcgis 10.1 simularon variables de temperatura y precipitación para nueve cultivos en el departamento de Cundinamarca, Colombia en dos escenarios pesimistas y dos optimistas; e identificaron que en nuevas condiciones climáticas, los cultivos de arveja y papa pastusa desaparecerán, en cambio el arroz será el único cultivo que podría beneficiarse; aumentando las áreas óptimas de producción, en cualquiera de los cuatro ambientes climáticos, siendo este un alimento primordial para más de la mitad de los habitantes de la tierra; a nivel mundial es el segundo cultivo en superficie cosechada después del trigo, suministrando más calorías por hectárea que cualquier otro grano sembrado (Barona 2010).

2.2 El arroz en el Valle del Cauca, Colombia

Colombia se divide en cinco regiones productoras de arroz, para la cual el departamento del Valle del Cauca; pertenece a la región central junto a los departamentos de: Cundinamarca, Tolima, Cauca, Huila y Caquetá (Castro et al., 2019), los cuales se destacan por ser valles cálidos con condiciones agronómicas y económicas similares.

En la divulgación de la zonificación agroclimática de los cultivos de Lasso (1991), se identificó que un área idónea para el cultivo de arroz es el sur del departamento del Valle del Cauca; por estar ubicada a una altitud de 1000 msnm, por presentar temperaturas mínimas de 17°C, las que pudieran alargar el ciclo vegetativo del arroz, la calidad de los suelos y por la escasez de lluvia entre Enero-Febrero y Julio-Agosto-Septiembre. La identificación de arrozales en el municipio de Jamundí, Valle del Cauca se llevó a cabo con imágenes Sentinel-1, determinando un área de 2,241 hectáreas de cultivos de arroz frente a las 1,907 ha halladas mediante el mapa de coberturas del suelo dispuesto en el geoportal de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC); resultados de los cuales enfatiza el autor que son útiles para desarrollar un inventario de los cultivos de arroz del municipio, y para estudios posteriores en ámbitos como la evaluación de la producción, el rendimiento y el calendario del cultivo o la concentración de emisiones de metano u óxido nitroso por unidad de área (Girón and Hernández, 2017). Otro hallazgo, identificó que en los sembradíos donde la asistencia técnica es mínima el rendimiento es mucho menor; que en las localidades donde sí lo hay, ya que un gran porcentaje (89%) recibe alguna asistencia técnica. Concretamente Cauca y Valle del Cauca, son departamentos en donde cerca del 95 % de las unidades de arroz mecanizado y bajo riego tienen acceso a alguna asesoría de asistencia técnica; exceptuando las áreas de arroz seco (Husserl y Suso, 2019).

Hoy 29 años después, a dichas características las decoran problemas de orden técnico que el agricultor tiene que afrontar a diario a fin de conservar con vida sus siembras, entre ellas: se distingue las fechas de siembra que no se han

llevado a cabo con la climatología de la región (Degiovanni, Martínez y Motta, 2010), Caicedo (2008) explica que, en el municipio de Zacarías, Buenaventura-Valle del Cauca la variedad FEDEARROZ 50 ha cumplido su ciclo entre 115 a 130 días y también se ha extendido hasta 132 días después de la germinación; así mismo se hallaron documentos indexados en la plataforma *Scopus* que informan sobre épocas de siembra que son equivalentes a los periodos y a la duración de la estación de crecimiento que se han reconocido en el sur del Valle del Cauca, como: En Colombia por Degiovanni et al. (2004), en la India Choudhury, Boumand and Singh (2007), Belterra Brasil por Sakai et al. (2010), y en Laguna Filipinas Alberto et al. (2014), esto permite identificar que la investigación de la fecha de siembra del arroz en Colombia es limitada y carece de importancia; debido a que los productores han sembrado arroz durante todo el año gracias a la disponibilidad hídrica de la región; generando que en cada momento existan distintos estadios en la planta y variabilidad en el rendimiento (Girón and Hernández, 2017). El rendimiento del arroz está influenciado por múltiples factores, como la radiación solar que ha sido un parámetro bastante influyente sobre la duración del ciclo del cultivo; este factor debe ajustarse a la etapa reproductiva y llenado de grano, pues no debe coincidir principalmente con periodos de baja radiación solar, en condiciones tropicales (Garcés and Restrepo, 2015). El desarrollo de prácticas de manejo que aumenten el rendimiento y sean más eficientes en el uso de los recursos es un reto de la agricultura; puesto que la estimación del rendimiento o reducciones de este; es fundamental para abordar la seguridad alimentaria a largo plazo (Espe et al., 2016).

En la actualidad, el carácter de las publicaciones consultadas y halladas hasta la fecha han sido sobre cambio climático, necesidades y requerimientos hídricos de los híbridos del arroz, se consideraría que se ha descuidado otras características de las investigaciones, como: zonificación del cultivo del arroz o zonas de adaptación del cultivo, fechas y épocas de siembra de la variedad FEDEARROZ 50 específicamente para el área elegida en este estudio. En términos relativos, para planificar e implementar mejor todos los procesos relacionados con la

producción, los productores se podrían beneficiar particularmente de los datos climáticos, incluidos los datos climáticos de alta calidad y los sistemas de alerta temprana para eventos climáticos extremos; ya que la expansión de las mejores prácticas en la gestión del agua son clave para la competitividad del sector y la rentabilidad sostenible (FEDEARROZ, 2020).

Mientras tanto, se hallan algunas propuestas de González y Alonso (2016) que serían ideales implementarlas en el Valle del Cauca como: resaltan que el arroz aeróbico bajo riego en el subtrópico ha exhibido rendimientos sobresalientes a las 8 ton ha⁻¹ superando el arroz bajo inundación que se siembra en Colombia; teniendo en cuenta que la excedencia de nutrientes es más severa en arroz aeróbico que en arroz por inundación, gracias a la detención de fósforo (P) en los suelos ácidos y la volatilización del Nitrógeno (N), y el arroz como proveedor de servicios ecosistémicos; puesto que se ha identificado que este cultivo implementado en forma de inundación es considerado como entorno para aves acuáticas y como humedal artificial, esto porque ofrece un hábitat de forrajeo y abrigo contra los depredadores similar a los ambientes naturales, contribuyendo a la preservación de las especies. De hecho, en la agricultura, la evapotranspiración es una característica importante en el desarrollo de cada cultivo; ya que dominando este parámetro se puede hacer veeduría a los escenarios hídricos con que cuenta el cultivo, estableciendo de esta forma las exigencias específicas del agua en la planta (Degiovanni et al., 2010). Realizar este cálculo en base diaria, es una forma conveniente de identificar periodos de déficit o excesos de humedad; a su vez son la base para calendarizar riegos o zonificar cultivos en una área específica, por ejemplificar dos casos de estudios realizados en el programa CROPWAT en Colombia: en el norte del Urabá antioqueño, el riego complementario se decretó transcendental para no obtener rendimientos inferiores en los escenarios seco y normal (Toro, Arteaga, Vásquez y Ibáñez, 2016), y Chaali, Ouazaa, Jaramillo, Araujo, and Ávila (2020), determinaron las necesidades hídricas de la arracacha, para diferentes años hidrológicos (Promedio, El Niño y La Niña); los resultados mostraron que el consumo total de agua para la raíz de la arracacha era de 820 mm a lo largo de

todo el período vegetativo. Expresado lo anterior, indica que el Valle del Cauca posee potencial para la inclusión del arroz en otros objetivos de investigación, pues el uso eficiente del agua determina el futuro del cultivo, por su vínculo con factores como el área cosechada, el rendimiento, los costos de producción y la sostenibilidad en el tiempo.

En concreto, se recomendaría priorizar los estudios sobre el arroz en el Valle del Cauca; puesto que la medición efectiva del consumo de agua, planeación, dirección y entendimiento del cultivo, conducen a la compensación de la inversión de los agricultores y a la rentabilidad del cereal. Finalmente, expuesto por González y Alonso (2016), el recurso hídrico es uno de los componentes más relevantes en la producción del arroz; el agua es un recurso restringido y de altos costos de producción, por lo que es inevitable confrontar la disponibilidad de agua en los diferentes lugares. El tipo de riego a emplear influencia en el desarrollo y rendimiento del cultivo a causa del alto uso de agua. La aplicación de nuevas tecnologías de riego adaptadas a las condiciones de arroz seco ha favorecido y han permitido aumentar los rendimientos minimizando el uso del líquido convirtiéndose en una alternativa ante la problemática de producción de arroz.

2.3 Literatura Citada

Aggarwal, P., Vyas, S., Thornton, P., Campbell, B. M., & Kropff, M. (2019). Importance of considering technology growth in impact assessments of climate change on agriculture. *Global Food Security*. 23, 41 – 48. [10.1016/j.gfs.2019.04.002](https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.04.002).

Alberto, M.C.R., Quilty, J.R., Buresh, R.J., Wassmann, R., Haidar, S., Correa, T.Q., and Sandro, J.M. (2014). Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler irrigation. *Agricultural Water Management*. 136, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.005>

- Aramendiz, T.H., Espitia, C.M. y Cardona, A.C. (2011). Adaptación del arroz riengo (*Oryza sativa* L.) en el Caribe colombiano. *Acta Agronómica*. 60 (1), 1 – 12.
- Barona, E. (2010). Importancia de la semilla de arroz. *Revista Arroz*. 58 (489), 1 – 52.
- Castro-Llanos, F., Hyman, G., Rubiano, J., Ramirez-Villegas, J. y Achicanoy, H. (2019). Climate change favors rice production at higher elevations in Colombia. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*. 24, 1401 – 1430. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09852-x>.
- Caicedo, O. Y. J. (2008). Evaluación de las características agronómicas de cuatro líneas interespecíficas de arroz (*Oryza sativa/ Oryza Latifolia*) comparadas con dos variedades comerciales y una nativa en el corregimiento #8 de Zacarías Municipio de Buenaventura. (Disertación doctoral) Universidad del Pacifico, Colombia.
- Chaali, N., Ouazaa, S., Jaramillo-Barrios, C. I., Araujo Carrillo, G. A., & Ávila Pedraza, E. Á. (2020). Edaphoclimatic characterization and crop water requirement of Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft) roots in upland production areas. *Scientia Horticulturae*. 272, 109533. [10.1016/j.scienta.2020.109533](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109533).
- Choudhury, B.U., Boumam, B.A.M. and Singh, A.K. (2007). Yield and water productivity of rice–wheat on raised beds at New Delhi, India. *Field Crops Research*. 100, 229–239. [10.1016/j.fcr.2006.07.009](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.009).
- Cortés, Y. y Alarcón, J.C. (2016) Impactos del cambio climático sobre las áreas óptimas de nueve cultivos en Cundinamarca – Colombia. *Temas agrarios*. 21(2), 51 – 64.
- Crespo-Herrera, L.A., Crossa, J., Huerta-Espino, J., Vargas, M., Mondal, S., Velu, G., Payne, T.S., Braun, H. and Singh, R.P. (2018). Genetic gains for grain yield in CIMMYT's semi-arid wheat yield trials grown in

suboptimal environments. *Crop Science Society of America*. 58, 1890–1898. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.01.0017>.

Degiovanni, M. V., Gómez, J.A. y Sierra, J.M. (2004). growth, development and yield components analysis of three rice varieties (*Oryza Sativa L.*) in Monteria, Cordoba. *Temas Agrarios*. 9 (1), 21 – 29.

Degiovanni, B.V., Martínez R.C.P. y Motta, O.F. (2010). Producción Ecoeficiente del arroz en América Latina, Tomo I. CIAT, FLAR y UNICORDOBA. (Eds). Cali-Colombia. 513p.

Delerce, S., Dorado, H., Grillon, A., Rebolledo, M.C., Prager, S.D., Patiño, V.H., Garcés, V.G y Jiménez, D. (2016). Assessing Weather-Yield Relationships in Rice at Local Scale Using Data Mining Approaches. *PloS One*. 11(8):e0161620. [10.1371/journal.pone.0161620](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161620)

Espe, M. B., Yang, H., Cassman, K. G., Guilpart, N., Sharifi, H., & Linquist, B. A. (2016). Estimating yield potential in temperate high-yielding, direct-seeded US rice production systems. *Field Crops Research*. 193, 123 – 132. [10.1016/j.fcr.2016.04.003](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.04.003).

FAO. (2010). Estadísticas mundiales sobre cultivos. Disponible en www.faostat.org.

FAO. (2018). Seguimiento del mercado del arroz de la FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 21(1), 1-10.

Fedearroz. (2016). Federación Nacional de Arroceros, FEDEARROZ (Database).

Fedearroz. (2019). Evolución del Arroz en Colombia. *Revista Arroz*. 67 (538), 1 – 56.

Fedearroz. (2020). Importante Elogio Del Programa Amtec De Fedearroz, Hace El Fondo Nórdico De Desarrollo (Ndf). *Revista Arroz*. 68 (546), 1-60.

- Garcés, G. and Restrepo, H. (2015) Growth and yield of rice cultivars sowed on different dates under tropical conditions. *Ciencia e Investigación Agraria*. 42(2), 217 - 226. 10.4067/S0718-16202015000200008
- Girón, G. R. & Hernández, T. F. (2017). Identificación de cultivos de arroz empleando imágenes Sentinel-1. *Análisis Geográficos*. 53, 57-67.
- González, B.M y Alonso, A.M. (2016). Tecnologías para ahorrar agua en el cultivo de arroz. *NOVA*. 13 (26), 67 – 82.
- Husserl, J., & Suso, J. (2019). ARROZ BLANQUITA: Construyendo comunidad, oportunidades y crecimiento para los pequeños agricultores. *Revista De Ingeniería*. (47), 32 - 41. 10.16924/riua.v0i47.975
- Lasso, E. L. D. (1991). *Zonificación agroclimática de los cultivos de mayor importancia económica del territorio Colombiano*. HIMAT.
- Lizumi, T., Luo, J.J., Challinor, A. J., Sakurai, G., Yokozawa, M., Sakuma, H., Brown, M.E. and Yamagata, T. (2014). Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. *Nature Communications*. 5(1), 1 - 7. 10.1038/ncomms4712.
- Lobell, D.B., Burke, M.B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M. D., Falcon, W. P., and Naylor, R.L. (2008). Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030. *Science*. 319 (5863), 607 – 610.
- Nazmul, H. M., Hazrat, A. M. and Muhammad, M.S. (2019). *Climate change Impacts on Rice production in Bangladesh*. Lambert Academic Publishing.
- Reidsma, P., Wolf, J., Kanellopoulos, A., Schaap, B.F., Mandryk, M., Verhagen, J. and Van Ittersum, M.K. (2015). Climate change impact and adaptation research requires farming systems analysis and integrated assessment: a case study in The Netherlands. *Procedia*

Environmental Sciences. 29, 286 – 287.
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.216>.

Sakai, R.K., Fitzjarrald, D.R., Oll, M., Staebler, R.M., Acevedo, O.C., Czikowsky, M.J., Rda, S., Brait, E. and Miranda, V. (2010). Land-use change effects on local energy, water, and carbon balances in an Amazonian agricultural field. *Global Change Biology.* 10, 895–907.
<https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00773.x>

Toro, T.A.M., Arteaga, R.R., Vásquez, P.M.A. y Ibáñez, C.L.A. (2016). Requerimientos de riego y predicción del rendimiento en el cultivo de banano mediante un modelo de simulación en el Urabá antioqueño, Colombia. *Tecnología y Ciencias del Agua.* 7(6), 105-122

Troncoso-Sepúlveda, R. (2019). Transmisión de los precios del arroz en Colombia y el mundo. *Lecturas De Economía.* (91), 151-179.
<https://doi.org/10.17533/udea.le.n91a05>.

3 DATOS DIARIOS FALTANTES EN REGISTROS DE SERIES CLIMATOLÓGICAS TEMPORALES

Jesica Natalia Valencia González *¹; Ramon Arteaga Ramírez ¹; Mario Alberto Vázquez Peña¹; Abel Quevedo Nolasco²

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua Universidad Autónoma Chapingo. (UACH). Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Código postal. 56230. Estado de México.

²Colegio de Posgraduados (COLPOS) Km. 36.5, México 136 5, Montecillo Código postal. 56230. Texcoco, Estado de México.

Autor para correspondencia: rarteagar@taurus.chapingo.mx

3.1 Resumen

La ausencia de registros diarios en la información de las estaciones meteorológicas es frecuente y descalifica el desarrollo de estudios agroclimáticos, que impiden conocer el comportamiento y distribución de las variables que integran el clima. El objetivo de este trabajo fue analizar y validar la estimación de los datos diarios faltantes de las variables precipitación, brillo solar, evaporación, temperatura máxima, temperatura mínima y humedad relativa, mediante los métodos: Razón Normal (RN), Serie de Fourier (SF) y Distancia Inversa al Cuadrado (IDW), en las estaciones climatológicas circundantes a la zona de producción de arroz en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. Se analizaron nueve estaciones, las cuales no presentan distancias mayores a 50 km, ni diferencias altitudinales de más de 750 m. Estas fueron empleadas con diferentes periodos de estudio de acuerdo con la variable en curso y se evaluaron los métodos con los índices estadísticos raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2); el primero permitió conocer el valor máximo admisible de error, y el segundo; el nivel de ajuste entre los valores observados y los estimados. Por lo tanto, estos

permitieron inferir que la variable brillo solar y evaporación obtuvieron los mejores resultados con la razón normal, la temperatura mínima y la humedad relativa con la serie de Fourier y la distancia inversa ponderada para completar la serie de la precipitación y temperatura máxima.

Palabras Clave: Registros diarios, datos faltantes, serie de fourier, razón normal, inverso de la distancia al cuadrado.

3.2 Introducción

El análisis climático requiere de series temporales con datos meteorológicos continuos, homogéneos y que contengan el máximo intervalo temporal posible (Nauman y Vargas, 2012). La ausencia de datos en los registros meteorológicos es común debido a varias situaciones, como lo son: la sustitución del operador, fallos de los dispositivos de registro o a negligencias operativas, lo que limita la realización de estudios agroclimáticos (Gallegos-Cedillo, Arteaga-Ramírez, Vázquez-Peña and Juárez-Mendez, 2016). Por consiguiente, Medina, Montoya and Jaramillo (2008), proponen que se debe intentar completar las bases de datos, con datos generados por alguna metodología estadística que garantice la aleatoriedad de estos, y que se ajusten a la estructura del proceso estocástico subyacente. Desde el punto de vista de Nauman y Vargas (2012), indica que una estación o serie de referencia es aquella que posee de un extenso rango de registros (*en lo posible debe abarcar el período instrumental*), además éstas deben representar zonas climáticas distintas o definidas. Por ende, se debe ejecutar el análisis de las estaciones climatológicas de referencia; ya que la estabilidad de los resultados está fijada a la mayor disponibilidad de información.

Dicho por Mintegui y López (1990), la estimación de datos faltantes ha generado métodos que permiten completar las bases de datos climatológicas, donde las variables en curso independientemente de su base teórica responden a la estructura de un estudio estadístico. La razón normal ha sido un método útil para

complementar datos faltantes de una serie a partir de los registros históricos de n estaciones cercanas, que presenten un alto valor de reciprocidad con la serie a completar (Paulhus and Kohler, 1952). De igual manera, el análisis armónico mediante las series de Fourier ha sido empleado para estimar series diarias de temperatura máxima y mínima, presión, evaporación y humedad relativa; ya que estos elementos meteorológicos, se comportan como una función periódica representándose como la suma de senos y cosenos asignándole a cada uno un coeficiente de ponderación, cuyo tratamiento ha tolerado adecuar procesos de transmisión, compresión y reconstrucción de la información requerida (Cortés, Medina, y Chaves, 2007). El cuadrado del inverso a la distancia (IDW) es de los métodos más utilizados en la hidrología, climatología y meteorología; puesto que, la superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación y, así estimar valores en puntos desconocidos, con la distancia entre las estaciones (Eischeid, Pasteris, Díaz, Plantico and Lott, 2000).

En la investigación agrícola, el campo simboliza un instrumento clave, su adecuada planificación y uso del recurso natural idóneo para el desarrollo de cultivos, ha requerido de muchos aspectos; como ha sido el crecimiento de documentos y temas específicos, que pueden ser verificados en sistemas de información y bases de datos, como *Scopus* (Lane and Kastenzholz, 2015). El relleno de las series meteorológicas desempeña un papel importante en el entendimiento del comportamiento del clima de una región; es así, que con una búsqueda de *Scopus* se han encontrado 17 documentos relacionados con uso de las series o análisis de fourier; desde el año 1986 hasta la actualidad. Seguidamente, el método de la distancia inversa ponderada (IDW), se reconocieron 979 documentos científicos desde 1969 hasta 2019; de los cuales, 737 son artículos científicos, 131 documentos fueron precisados por los filtros “*artículos*” y *palabra clave*” *Inverse Distance Weighted*” y 46 archivos se hallaron a nivel de estudio diario entre el 2001 y 2019. Por último, *Scopus* registra 82 documentos con el empleo del método de la Razón normal (RN); 33 de ellos corresponden a las áreas de estudio de: ingeniería, agricultura, ciencias de la tierra y el ambiente en la estimación de datos faltantes a nivel diario usado desde

1963 hasta la fecha actual. Dicha búsqueda exhibe la evidencia reciente sobre el tema en curso, el cual sugiere que las divulgaciones presentes pueden ser llamativas y apuntan a que la investigación agrícola logre, a largo plazo; llevar a que la agricultura alcance otros nichos de investigación prometedores en el futuro. El objetivo de este trabajo fue analizar y validar la estimación de los datos diarios faltantes de las variables precipitación, brillo solar, evaporación, temperatura máxima, temperatura mínima y humedad relativa, mediante los métodos: Razón Normal (RN), Serie de Fourier (SF) y Distancia Inversa al Cuadrado (IDW), en las estaciones climatológicas circundantes a la zona de producción de arroz en el departamento del Valle del Cauca, Colombia

3.3 Materiales Y Métodos

3.3.1 Localización del área de estudio

La producción de arroz en el Departamento del Valle del Cauca (Colombia) acoge los municipios de Jamundí, Quinamayo, Timba, Potrerito y Villa Paz que limitan con el departamento del Cauca (Figura 3.1).

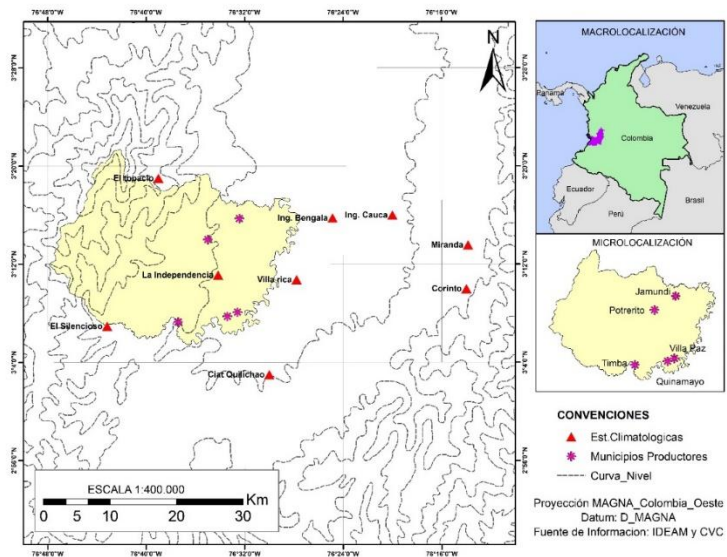


Figura 3.1. Ubicación de la zona de estudio

3.3.2 Estaciones meteorológicas utilizadas

Se eligieron nueve estaciones alrededor de la zona productora de arroz (No superan los 50 km de distancia), las cuales proporcionaron información de registros diarios de las variables: Precipitación, Temperatura Máxima y mínima, Humedad relativa, Brillo solar y evaporación con más de 20 años de información. Las bases de datos se obtuvieron del IDEAM (Instituto *De Estudios Ambientales De Colombia*) y de los boletines hidro climatológicos de la CVC (*Corporación Autónoma Del Valle Del Cauca*) (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Descripción de las estaciones climáticas

COD	Estación	Altitud (msnm)	Latitud (N)	Longitud (W)
1	El topacio	1676	03°19	76°39´
2	Ciat Quilichao	977	03°03´	76°30´
3	Ingenio Bengala	1000	03°15´	76°24´
4	Ingenio Cauca	1000	03°14´	76°13´
5	La Independencia	963	03°11´8"	76°34´9"
6	Ingenio Miranda	1128	03°16´	76°20´
7	El silencioso	1151	03°06´	76°43´
8	Villa Rica	1000	03°10´	76°28´
9	Corinto	1100	03°10´	76°14´

3.3.3 Caracterización de la información de las estaciones meteorológicas.

Las estaciones seleccionadas no contienen el mismo periodo de información de las variables climatológicas del estudio en curso, se eligieron aquellas estaciones cuyos registros cumplieran con la mayor información registrada, se establecen los periodos de estudio para cada variable y el porcentaje total de datos ausentes (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2. Datos ausentes para cada variable de acuerdo con su periodo de estudio.

Variable	NE	PE	NA	TD	TDA	%DA
Precipitación	9	1969-2018	50	164358	26171	16
Brillo solar	5	1985-2018	34	62090	11774	19
Evaporación	4	1983-2017	35	51136	5064	10
Temperatura Máxima	5	1989-2016	28	51135	14761	29
Temperatura Mínima	5	1989-2016	28	51135	12252	24
Humedad Relativa	4	1982-2016	35	51136	7843	15

NE=Número de estaciones, PE=Periodo de estudio, NA=Número de Años, TD=Total de datos de cada variable, TDA=Total de datos ausentes, %DA= Porcentaje de datos ausentes.

3.3.4 Estimación de datos faltantes diarios

Se realizó el relleno de las series históricas diarias de la zona de estudio mediante los siguientes métodos:

Razón normal (RN):

Con el paquete *climatol* programado en R, afín a la metodología propuesta por Guijarro (2004), cuyo proceso consiste en: el cálculo de cada serie, como si no existiera, por interpolación de datos estandarizados de series vecinas; el análisis de las diferencias entre las series calculadas y las observadas para detectar datos erróneos, saltos en la media, y tendencias; y por último el relleno automático de los datos faltantes, y la corrección de los errores aislados. A continuación, se presenta la ecuación del método:

$$P_x = \frac{1}{n} \left[\frac{N_x}{N_a} P_a + \frac{N_x}{N_b} P_b + \dots + \frac{N_x}{N_n} P_n \right] \quad (3.1)$$

Donde:

P_x = Dato faltante de la variable en la estación y,

$N_x, N_a, N_b \dots N_n$ = Valor de la variable media diaria de la estación del dato faltante (x) y las estaciones auxiliares a, b, n (medias de todas las series históricas)

P_a, P_b, P_n = Valor de la variable registrada en las estaciones auxiliares del día donde falta el dato en la estación x

Análisis armónico de las series de Fourier (SF):

La serie de Fourier es una función utilizada para variables periódicas como: la temperatura máxima y mínima, humedad relativa y evaporación. Esta es conocida como la función periódica $s(t)$, donde se calculan los coeficientes a_i y b_i ; y como consecuencia se asume que la señal $s(t)$ se puede descomponer en la suma de senos y cosenos cuyas frecuencias son múltiplos armónicos de la frecuencia fundamental (Nauman y Vargas, 2012). Se estima de la siguiente manera:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=0}^{N/2} (a_n \cos(i\omega t) + b_n \text{sen}(i\omega t)) \quad (3.2)$$

$$\frac{a_0}{2} = \frac{2}{P} \sum_{-P/2}^{P/2} s(t) dt \quad (3.3)$$

$$a_i = \frac{2}{P} \sum_{-P/2}^{P/2} s(t) \cos(i\omega t) dt$$

$$b_i = \frac{2}{P} \sum_{-P/2}^{P/2} s(t) \text{sen}(i\omega t) dt$$

Donde:

P es el período $P = 2\pi/\omega$,

ω Función de frecuencia angular

N es la cantidad de datos a usar

Cos= La función Coseno

Sen= La función Seno

En este estudio, este método fue procesado en el programa Excel versión 2018.

Distancia inversa al cuadrado (IDW):

El procedimiento de la distancia inversa al cuadrado es explicado por Campos (1998); donde la influencia del valor de la variable en una estación, para el cálculo de esta en cualquier punto es inversamente proporcional a la distancia entre los dos puntos.

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d^2} P_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d^2}} \quad (3.4)$$

Donde:

P_x = El dato estimado de la estación ausente

P_i = Valores de lluvia de los pluviómetros utilizados para la estimación

d_i = Distancia de cada lugar a punto que se está estimando

N = Número de estaciones vecinas

De acuerdo con Campos (1998), se recomienda emplear cuatro estaciones auxiliares (*las más cercanas*), de manera que cada una quede localizada en uno de los cuadrantes que precisan los ejes coordenados que pasan por la estación incompleta, generalmente norte-sur y oriente-poniente. Para este estudio se realizó el procedimiento en el programa Excel 2018.

Para emplear estos métodos, se realizó una pérdida de datos observados que se calcularon y posteriormente se compararon; para poder definir la bondad de cada uno de estos. Se denominó “datos perdidos” a aquella información perteneciente al volumen de datos real por variable (TD), y que luego fue asumida como inexistente durante la aplicación de los métodos de relleno. La cantidad de datos perdidos se fijó de acuerdo con el porcentaje de datos ausentes del TD (Cuadro 3.2 y 3.3). Así pues, se consideró un porcentaje de datos al azar para

efectuar los métodos de prueba, y utilizar dicha información para calcular los índices estadísticos.

Cuadro 3.3. Datos perdidos para cada variable de acuerdo con su periodo de estudio.

Variable	TD	TDP	%DP
Precipitación	164358	16439	10
Brillo solar	62090	2924	5
Evaporación	51136	7309	14
Temperatura Máxima	51135	9497	19
Temperatura Mínima	51135	9497	19
Humedad Relativa	51136	7308	14

TD= Total de datos de cada variable, TDP= Total de datos perdidos, %DP= Porcentaje de datos perdidos

3.3.5 Estimación Del Error

A fin de estimar la exactitud de los métodos mencionados para reconstruir los datos ausentes y seleccionar el mejor, se empleó: La raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RSME) (Teegavarapu y Chandramouli, 2005) y el Coeficiente de determinación (R^2) (Cervantes, Arteaga, Vásquez, Ojeda y Quevedo, 2013). El modelo ideal es cuando $R^2 \approx 1$ o con buen ajuste ≥ 0.5 y $RMSE \approx 0$ (Pereira, 2004).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |V_{obs_i} - V_{est_i}|^2}{n}} \quad (3.5)$$

Donde:

Vobs = Dato observado

Vest = Dato estimado

n = número de observaciones o estimaciones

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})(t_i - \bar{t})]^2}{[\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2][\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2]} \quad (3.6)$$

Donde:

a_i = dato estimado por el método

t_i = dato observado

\bar{a} = promedio de los datos estimados por el método

\bar{t} = promedio de los datos observados.

3.4 Resultados Y Discusión

Para determinar la homogeneidad de los datos de las variables meteorológicas, se realizó una cuantificación de datos ausentes y, posteriormente, se eliminó la información considerada discrepante o inconsistente, con el fin de obtener agrupaciones de datos más representativos; y como se indicó previamente, los datos perdidos permitieron estimar los índices estadísticos propuestos para evaluar el comportamiento de cada método respecto a cada variable.

3.4.1 Precipitación:

Para esta variable se emplearon nueve estaciones para completar sus registros, y se obtuvo intervalos de los errores (RMSE) de 7.6 mm a 13 mm, y de 6.8 mm a 13.9 mm con el método RN e IDW, respectivamente; a lo largo de las estaciones, estos errores son aceptados dado que para la zona de estudio la precipitación anual corresponde a 1706 mm año⁻¹, y la precipitación más baja se presenta en el mes de julio con alrededor de 62 a 80 mm mes⁻¹. Los valores obtenidos son superiores a los reportados por: Kanda, Negi, Rishi and Shekhar (2018), quienes completaron esta variable para 12 estaciones de 31 años de registros diarios; y estimaron errores (RMSE) para toda la serie histórica, para siete, quince y treinta días faltantes acumulados y el error promedio de la serie histórica; a través del método IDW obtuvieron 2.531, 2.497, 2.524 y 2.432 mm respectivamente, y en el método RN reportan 2.375, 2.382, 2.387 y 2.372 mm correspondientemente. Asimismo, Xia, Fabian, Stohl and Winterhalter (1999), reportan que para el IDW y RN un error promedio de 1.5 y 1.0 mm día⁻¹; en un estudio realizado para 44 estaciones con un periodo de 5 años de registros diarios.

No obstante, se obtuvo un R^2 máximo entre las estaciones de 0.45 y 0.48 en los métodos de IDW y RN, estos son superiores según Gallegos-Cedillo et al (2016), indican un valor de R^2 de 0.376 y 0.363 en los métodos RN e IDW para siete estaciones auxiliares usadas en San Luis Potosí, México. Por implicación, la distancia es un criterio lógico que se debe tener en cuenta en la estimación de relleno de series climáticas; obviamente, las estaciones vecinas deben estar cerca del lugar a analizar, sin inconvenientes como montañas y barreras que alteren su comportamiento (Vincent and Gullet, 1999). Por ende, un aspecto relacionado con la distancia es la altura; ya que para el área de estudio las estaciones no exceden los 50 km en la horizontal y tampoco los 750 m en la vertical; esto permite tener climas parecidos como en la estación Ing. Miranda e Ing. Cauca que están a 13 km de distancia y 128 m de altura una de la otra, y aun así exhiben ajustes similares de R^2 en dos métodos de relleno diferentes (Figuras 3.2 y 3.3).

Expresado lo anterior, con el propósito de obtener rellenos más adecuados en grandes cantidades de información diaria (*mayor a 10 años de registros diarios*), algunos autores sugieren emplear estaciones no mayores a 50 km de distancia (Toro, Arteaga, Vásquez and Ibáñez, 2015; De Luis, Longares, Stepanek y González, 2007). Hasta ahora, ha quedado exhibido que una serie de referencia se calcula mediante una media ponderada entre estaciones vecinas, al utilizar como factor de ponderación el coeficiente de correlación o la distancia; no obstante, el método IDW es el que se divulga como el que mejor se ajusta al relleno de esta serie climatológica y concuerda con lo obtenido en este trabajo (*ejemplos similares*: Toro et al., 2015; Teegavarapu y Chandramouli, 2005).

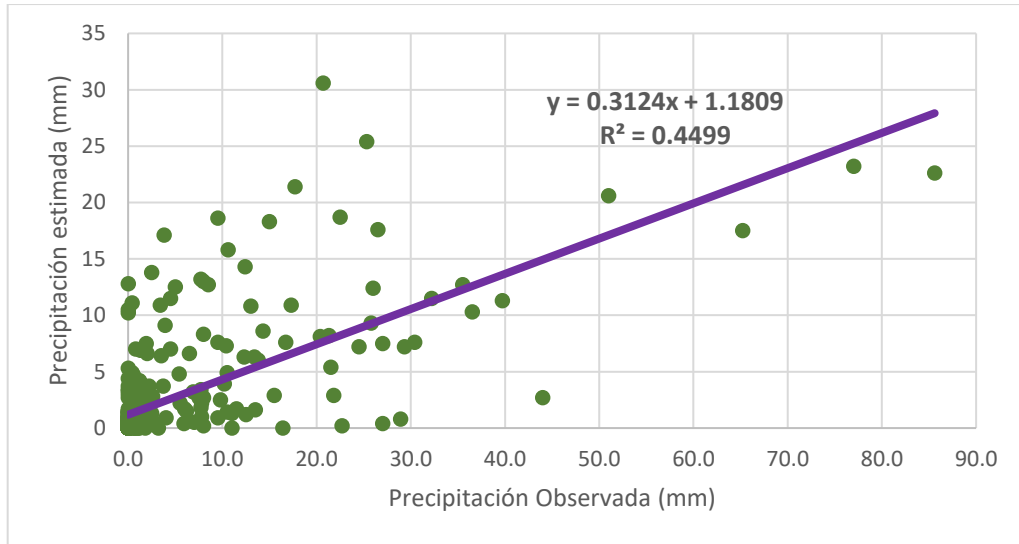


Figura 3.2. Relación de la precipitación observada y estimada de la estación Ing. miranda a través del método RN

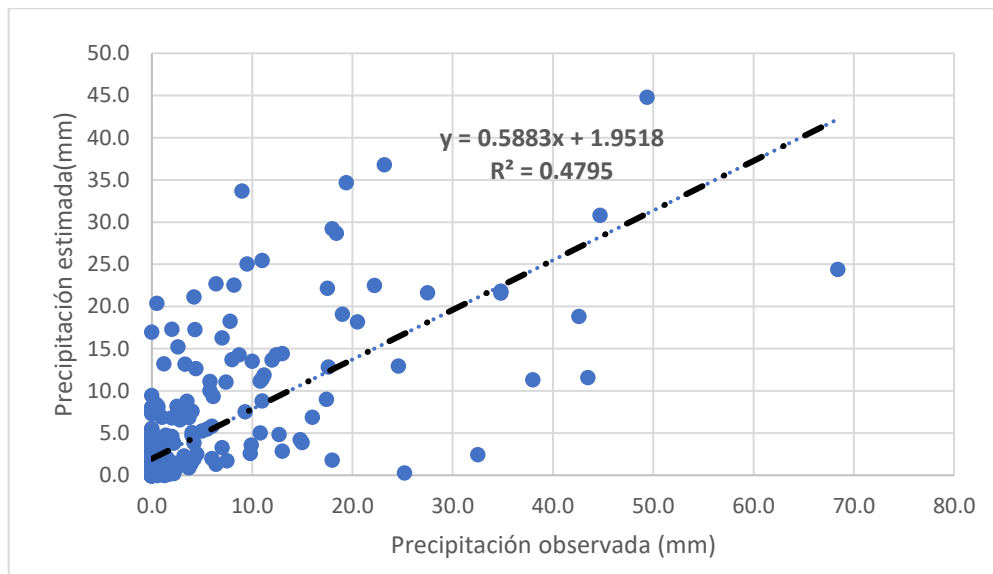


Figura 3.3. Relación de la precipitación observada y estimada de la estación Ing. Cauca a través del método IDW.

3.4.2 Brillo Solar:

En cuanto a la variable brillo solar (*Horas sol o Heliofanía*) se obtuvo un rango de errores (RMSE) de 1.6 horas a 2.4 horas y de 1.4 a 2.5 horas; con coeficientes de determinación de 0.71 y 0.78 por los métodos RN e IDW para las cinco estaciones usadas (Figuras 3.4 y 3.5); estos resultados son aceptables e inferiores respecto a los de Grossi, Raichijk y Righini (2010), quienes lograron

promedios diarios similares de 2.1, 2.9, 2.5, y 2.2 horas sol para los meses de enero, octubre, noviembre y diciembre respectivamente; al completar series temporales mensuales de 20 años de Heliofanía en 11 estaciones de Uruguay mediante el método Kriging.

En América Latina, muy pocos países identifican la importancia de la radiación solar y carecen de datos históricos (Degiovanni, Martinez y Motta, 2010); de modo que, dadas las semejanzas que presentan en el índice RMSE y el R^2 de las estimaciones, se pudieran emplear cualquiera de los dos métodos; ya que, el coeficiente determinación acepta distinguir que existe dependencia entre las medidas de ponderación o pesos, y la distancia de las estaciones (Toro et al., 2015).

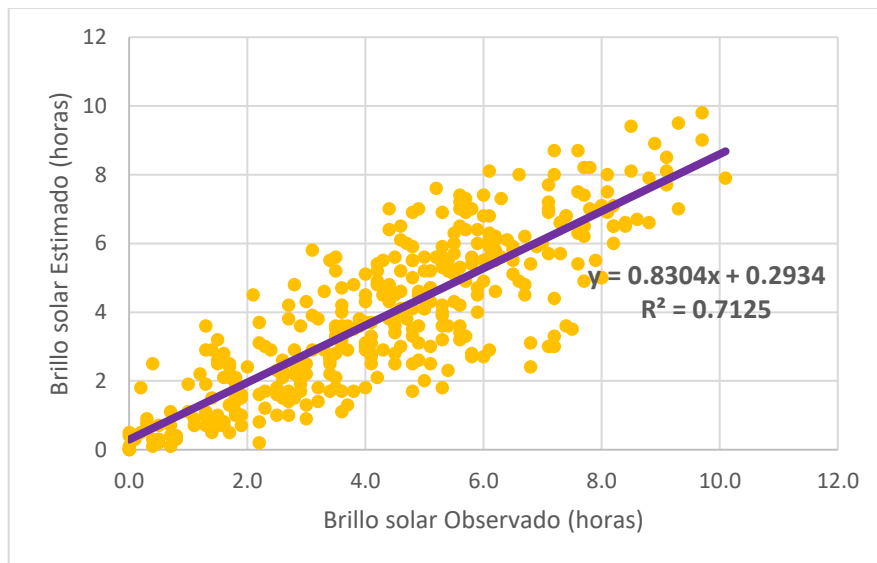


Figura 3.4. Relación del brillo solar observado y estimado de la estación Ing. Cauca a través del método RN

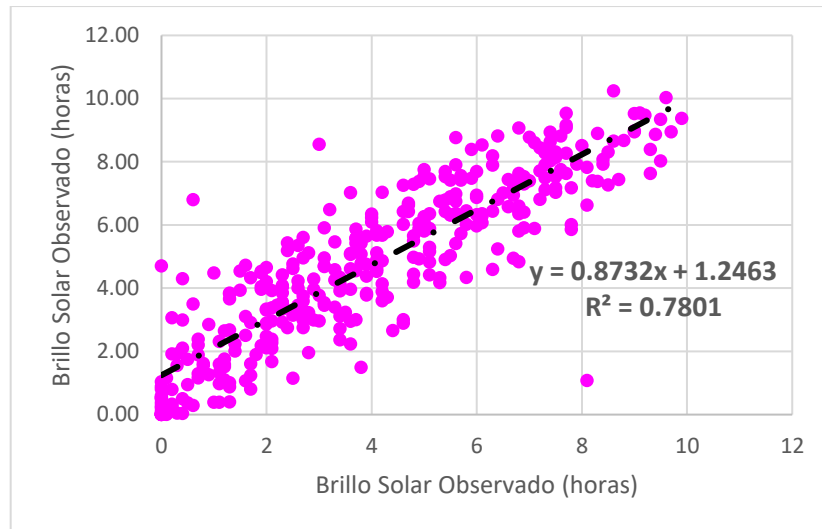


Figura 3.5. Relación del brillo solar observado y estimado de la estación Ing. Miranda a través del método IDW

3.4.3 Temperatura Mínima:

En este caso se presentan valores máximos de RMSE de hasta 1.5°C, 1.03°C, 1.64°C, y R² de 0.21, 0.25, 0.1 en los métodos RN, SF e IDW usados para las cinco estaciones empleadas; se observa que tienen una tendencia entre sí, aunque los RMSE más altos se obtienen con el método IDW. Al relacionar los datos estimados con los observados mediante cada método, se halló bajos coeficientes de determinación; por lo tanto, no presentan una relación significativa (Figuras 3.6 y 3.7). Una característica de este argumento es que para esta variable se presenta poca variabilidad espacial y temporal, además por las características altitudinales del lugar y su ubicación ecuatorial.

Estudios previos destacan que el método RN es viable dado que los resultados obtenidos de RMSE se encuentran por debajo de 3.5°C reportado por Kanda et al. (2018), que completaron la cantidad de datos ausentes en 12 estaciones de Karakorum Himalaya. La fiabilidad de los métodos RN e IDW es corroborada por Gallegos-Cedillo et al. (2016), quienes revelan valores de RMSE de 4.1 y 3.7°C respectivamente, para un periodo de estudio de 16 años de registros diarios con un 25.4% de información faltante; es interesante observar que para este estudio se tiene un 24% de información faltante en series de 28 años de registros diarios, y los índices estadísticos de RMSE fueron mucho menores; lo que indica que

ambos métodos serán adecuados para completar información faltante en periodos de estudio de más de 25 años. También, se exhibe un trabajo empleado por Cervantes-Osornio, Arteaga-Ramírez, Vázquez-Peña, Ojeda-Bustamente y Quevedo-Nolasco (2019), presentan resultados de RMSE no mayores a 0.16°C, para las estimaciones realizadas a cuatro estaciones; por un periodo de estudio de 5 años de registros diarios.

La temperatura mínima se presenta de forma más regular en el tiempo; puesto que, las variaciones temporales de los elementos meteorológicos están relacionadas directa o indirectamente con los movimientos de la tierra (Riehl, 1965). Siendo así, se elige el mejor método de la temperatura mínima; la serie de Fourier tras el empleo de su segunda armónica. Este método permite calcular el valor ausente, más probable de la temperatura en cualquier día del año sobre un lugar determinado.

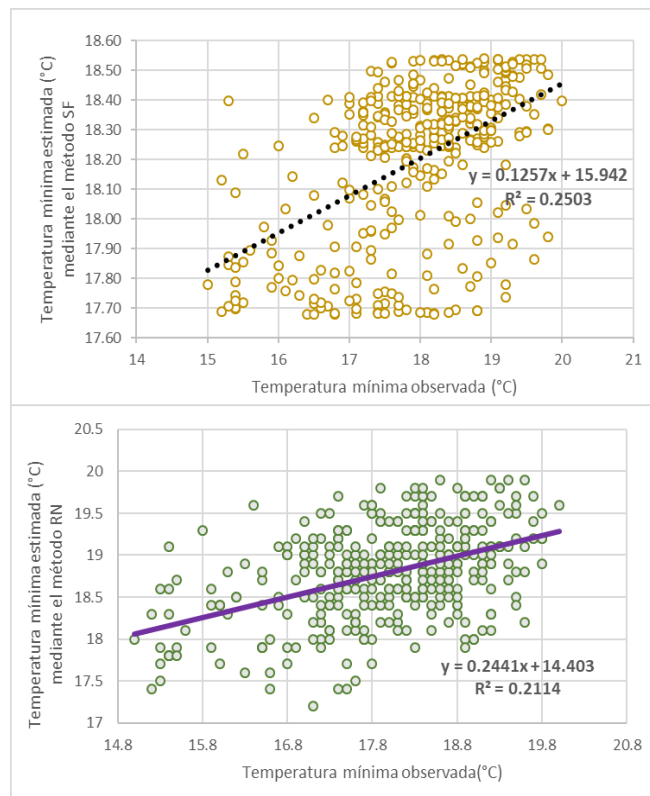


Figura 3.6. . Relación de la temperatura mínima observada y estimada de la estación Ciat Quilichao

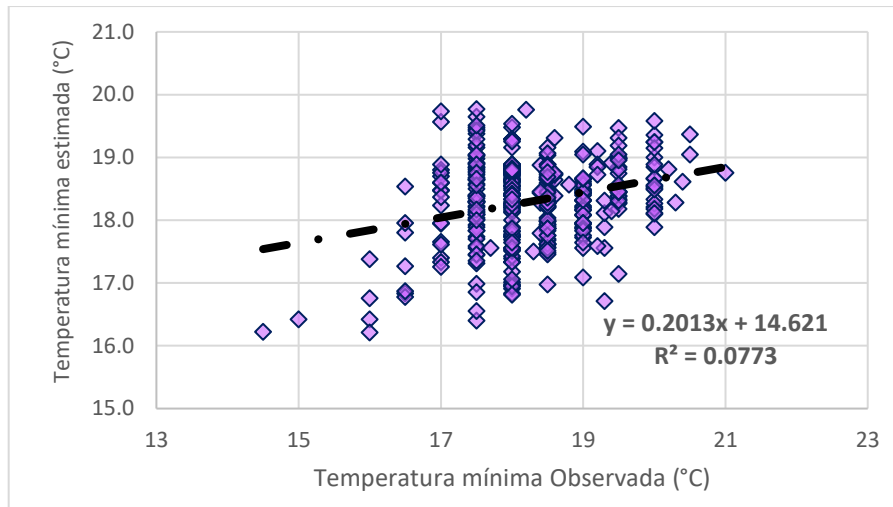


Figura 3.7. Relación de la temperatura mínima observada y estimada de la estación La Independencia mediante el método IDW

3.4.4 Temperatura Máxima:

En lo que se refiere al relleno de las series históricas de la temperatura máxima se obtuvieron como resultados de los métodos RN, SF e IDW mediante el RMSE 1.9°C, 2.0 °C, 1.8°C, respectivamente. Se observa que los valores de RMSE son similares entre sí; comparando los valores reportados por Kanda et al. (2018), en los métodos RN y IDW, encontraron 2.6 y 2.5 °C, de error máximo, siendo los valores superiores a los obtenidos en este estudio.

Una de las estimaciones representativas hechas por los métodos RN e IDW para la temperatura máxima, fue realizada para la estación Ing. Bengala, la cual exhibió el valor de $R^2=0.5$ (Figura 3.8); esto indica, que estos métodos tienen una bondad moderada en el ajuste respecto a esta variable. Caso diferente acontece con la estación Ing. Cauca que no obtuvo un coeficiente de determinación aceptable (Figura 3.9). Gallegos et al (2016), estimaron registros faltantes para esta variable y adquirieron ajustes máximos de R^2 de 0.641 y 0.493 para la RN e IDW para 16 años de registros diarios, y ajustes mínimos de hasta 0.25 de R^2 en ambos métodos; lo que indica que los obtenidos en este trabajo son admisibles y Cervantes-Osorno et al. (2019), estimaron 229 datos faltantes a través del método SF en una serie histórica de 5 años; y reportaron RMSE de hasta 0.149°C

en cuatro estaciones; lo que indica que este método exhibe mejores resultados a menor cantidad de datos faltantes.

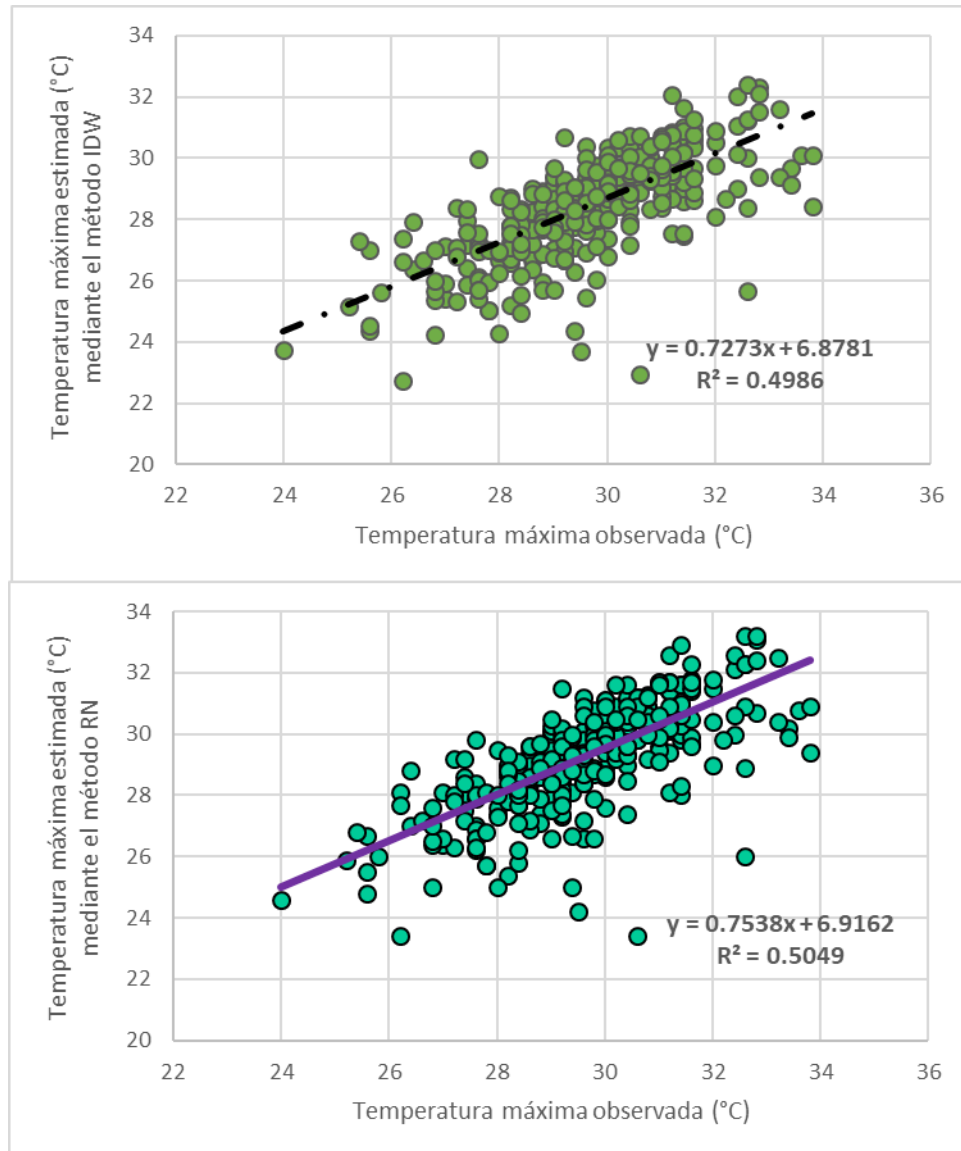


Figura 3.8. Relación de la temperatura máxima observada y estimada de la estación Ing. Bengala

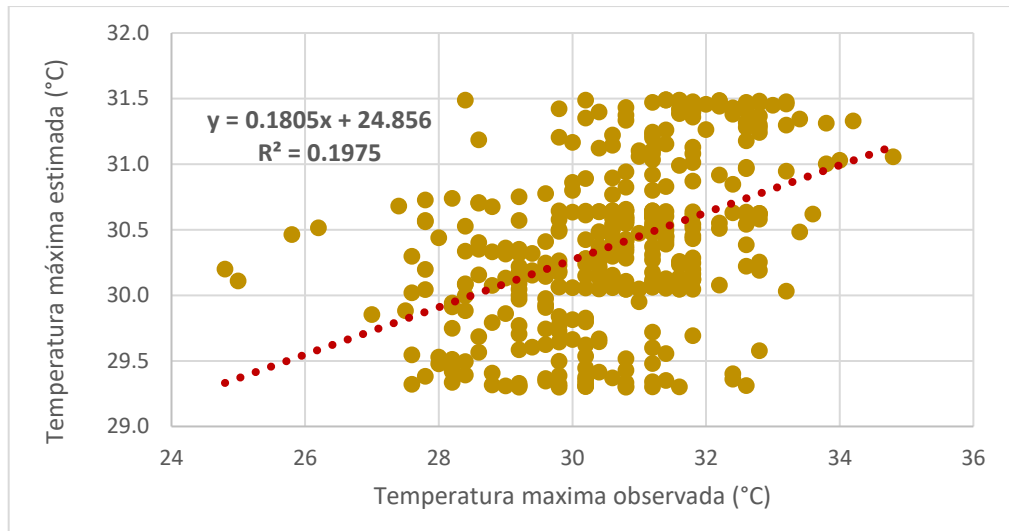


Figura 3.9. Relación de la temperatura máxima observada y estimada de la estación Ing. Cauca mediante el método SF

3.4.5 Humedad Relativa:

Diagnosticada la variable humedad relativa a lo largo de todo el conjunto de datos se ha identificado un amplio intervalo en sus registros diarios que van de 45.7% a 99.4% en las cuatro estaciones disponibles; para los cuales, en el relleno de esta serie permite admitir hasta 10.4%, 9.02%, 8.0% de RMSE para los métodos RN, SF e IDW; teniendo en cuenta que para esta variable, la manera de completar los datos ausentes en los registros históricos no se ha explorado con gran detalle a nivel diario, se han elegido estos métodos para este estudio. Por otra parte, Coutinho et al., (2018), completaron esta variable a nivel mensual para un estudio de 13 años; en el cual, adquirieron valores inferiores a 2.9% de error con cuatro métodos diferentes.

Estos resultados son admisibles; ya que, esta variable periódica tiende a exhibirse con valores mayores al 70% en lugares cercanos al ecuador (*como lo es la ubicación de este estudio*), y adicionalmente, la diferencia altitudinal entre las estaciones usadas para dicha estimación no supera los 150 msnm (Araya-López, 2011).

Respecto a los resultados adquiridos por el R^2 fueron: 0.07, 0.32, 0.18 de los métodos RN, SF e IDW; cuyos valores no son un estadístico adecuado que por

sí solo pueda predecir el comportamiento de dicha variable (Teegavarapu y Chandramouli, 2005); dado que, los datos difieren entre sí debido al proceso de relleno, puede notarse, entre estas representaciones la ventaja de mostrar no solo los datos que no fueron aleatoriamente reemplazados por dato faltante, sino que también da una idea de cuánto se desvían los datos con respecto al dato real (Figuras 3.10 y 3.12) (Araya-López, 2014).

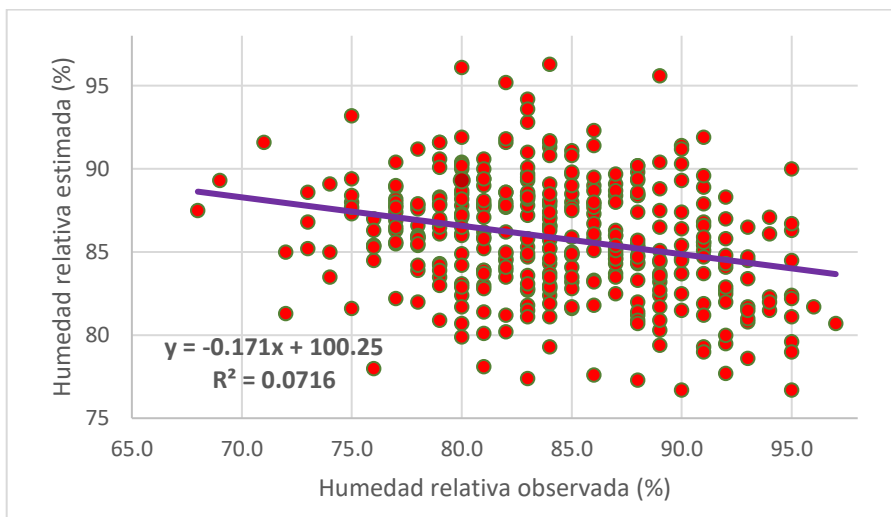


Figura 3.10. Relación de la humedad relativa observada y estimada de la estación Ing. Miranda mediante el método RN

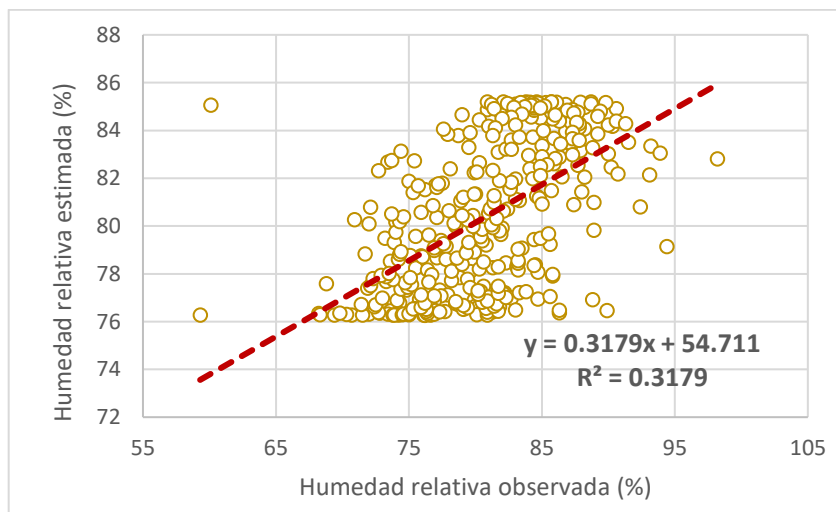


Figura 3.11. Relación de la humedad relativa observada y estimada de la estación Ciat Quilichao mediante el método SF

De las estaciones usadas, se observa que Ciat Quilichao es la que tiende a mostrar un mejor ajuste en la estimación mediante el método de la SF. Esto es posible gracias al elevado grado de humedad que presenta el área de estudio; ya que, para los valores observados y los estimados es evidente un gran número de datos concentrados (Figura 3.11). En cambio, para las Figuras 3.10 y 3.12, un valor observado obtuvo un conjunto de datos estimados para el periodo de evaluación en curso.

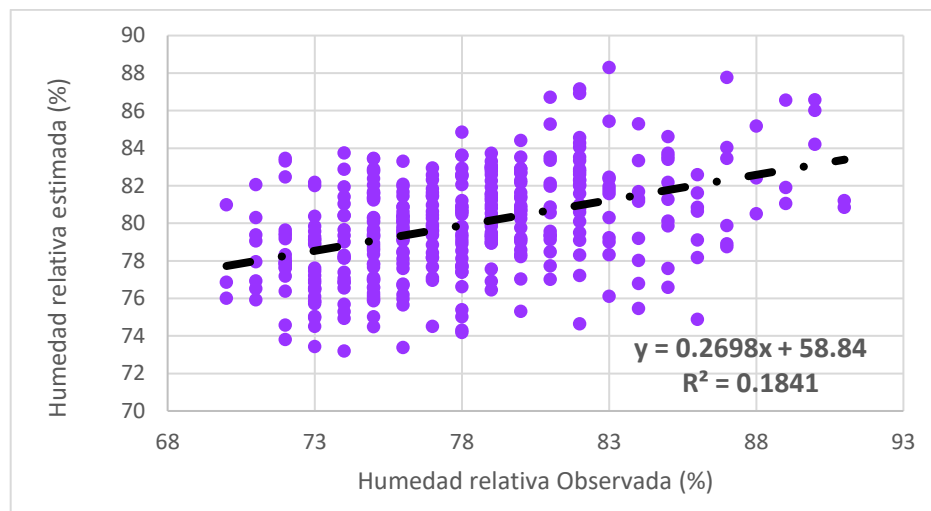


Figura 3.12. Relación de la humedad relativa observada y estimada de la estación Ing. Cauca mediante el método IDW

3.4.6 Evaporación:

La evaporación presentó valores de RMSE de 1.8 mm, 2.1 mm, 1.61 mm, en los métodos RN, SF e IDW; cuyo error promedio obtenido es 1.84 mm en las cuatro estaciones usadas, considerándose mínimo.

Una interpretación de los resultados expuestos es que el relleno de las series históricas de esta variable es más conveniente mediante la aproximación de segundo orden de las series de Fourier; porque, para la zona de estudio elegida se presenta una amplia variabilidad en la humedad relativa y esta influye directamente sobre la manifestación de la evaporación e implícitamente en la reconstrucción de su serie temporal.

Ambos métodos de estimación para la estación Ciat Quilichao se muestran de forma conveniente, dado que en sus regresiones exhiben ligeras tendencias o acumulación en la pendiente entre los valores de 3 y 5.5 mm de la evaporación observada (Figura 3.13). En comparación a la estación Topacio esta carece de una tendencia clara, y se observa una distribución amplia en la parte inferior derecha de la regresión; lo que permite inferir que esta variable para esta estación presenta algunos valores extremos en ciertas secciones de la serie histórica presente (Figura 3.14)

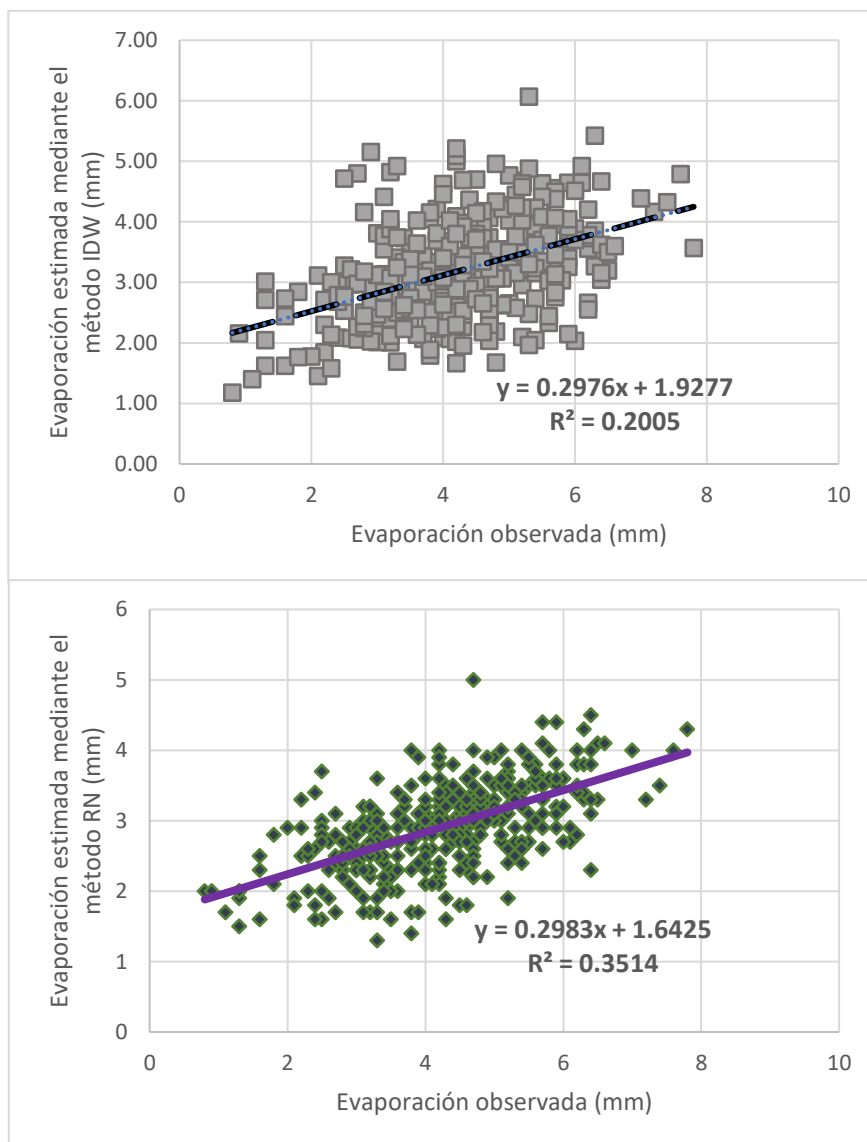


Figura 3.13. Relación de la evaporación observada y estimada de la estación Ciat Quilichao

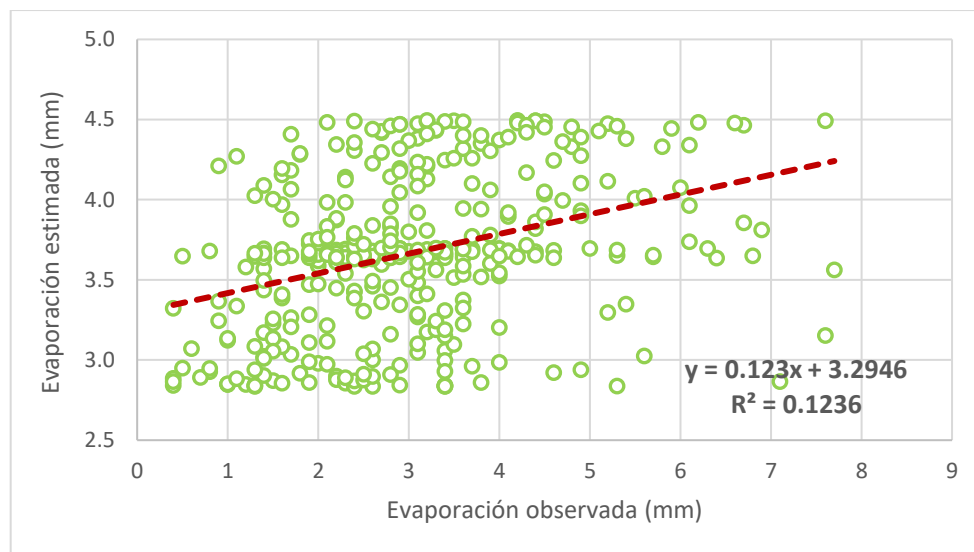


Figura 3.14. Relación de la evaporación observada y estimada de la estación Topacio mediante el método SF

La literatura científica desarrollada hasta el momento exhibe que el relleno de datos faltantes de series climatológicas comprende un análisis detallado y cauteloso por variable; del cual, se podría mencionar que es concluyente la inexistencia de un método explícito para cada caso de estudio; si no, de un método que se ajusta al comportamiento de la variable. Para el alcance de este trabajo, el índice estadístico RMSE se manifestó como buen indicador de cuanto es posible admitir el error; de acuerdo con el comportamiento de la variable, el periodo de estudio y la escala de trabajo; por ende, se indica: en primer lugar, que para las variables *evaporación*, *temperatura máxima* y *mínima*, los métodos RN, IDW y SF son adecuados para emplearse en estimaciones diarias, en periodos de estudio de más de 28 años; segundo, los resultados obtenidos en la humedad relativa se diferencian entre dos y una unidad del método IDW-RN e IDW-SF equitativamente; mientras que el brillo solar exhibió una estimación exitosa con ambos métodos; puesto que, la diferencia entre estos fue de una décima (Figura 3.15). Por último, en estudios previos la variable precipitación se manifestó para Toro et al. (2015), Gallegos-Cedillo et al. (2016) y Rodríguez-Gonzalez, Pineda-Martinez y Guerra-Cobián (2018) con valores más altos de 16,

73 y 93.9 mm de RMSE que los obtenidos en este trabajo. Siendo así, el método IDW se ha estudiado e identificado como el mejor método para esta variable.

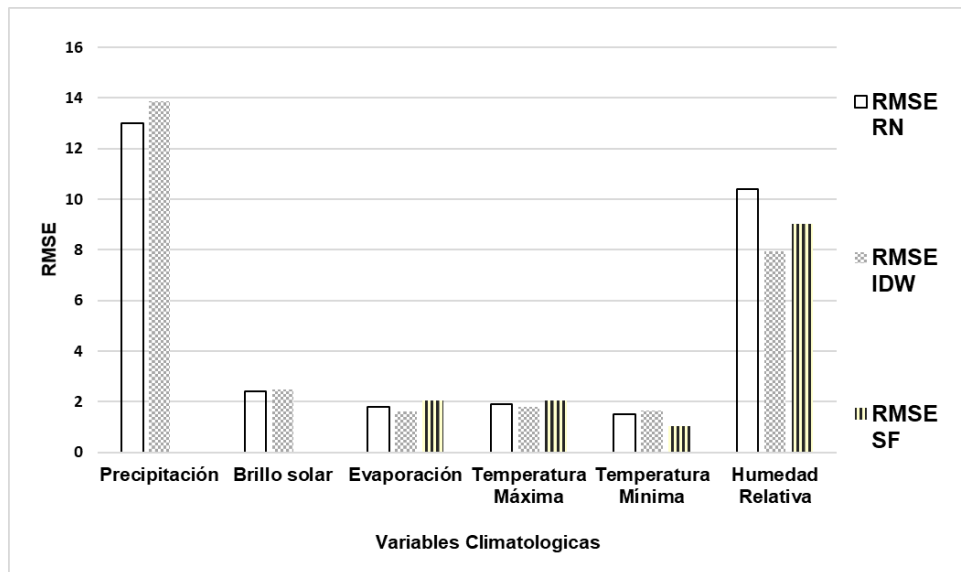


Figura 3.15. Resumen estadístico del índice RMSE de las variables en curso

3.5 Conclusiones

De los métodos usados el que tiene mejor comportamiento para el relleno de series de las variables estudiadas fue el de la distancia inversa al cuadrado, seguido por el de la razón normal; puesto que los errores obtenidos fueron iguales o muy cercanos entre sí, lo que los convierte en métodos confiables para rellenos de series a nivel diario. Por otro lado, un método no tan fiable para aplicar a todas las variables fue el de la Serie de Fourier; ya que, para emplearlo solo es posible realizarlo en aquellas variables periódicas en el tiempo.

Por lo tanto, con los datos observados de las variables y los estimados que se obtuvieron por los diferentes métodos; se exhiben valores de RMSE admisibles, pero no se logra obtener resultados significativamente altos de R^2 , por las características geográficas, altitudinales y latitudinales de la zona de estudio.

3.6 Literatura Citada

- Araya López, José Luis. (2011). Resultados de un control de calidad de datos de temperatura superficial. *Tecnología en Marcha*. 24 (1), 33-49.
- Araya López, José Luis. (2014). Experiencias en la aplicación operativa de un método multivariado de imputación de datos meteorológicos. *Tecnología en Marcha*. 27(3), 70-79.
- Campos, A.D.F. (1998). Procesos del ciclo hidrológico (3ª ed.). San Luis Potosí, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería.
- Cervantes, O. R., Arteaga, R. R., Vázquez, P. M. A., Ojeda, B. W. y Quevedo, N. A. (2013). Modelos Hargreaves Priestley-Taylor y redes neuronales artificiales en la estimación de la evapotranspiración de referencia. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. 16(2), 163 - 176.
- Cervantes-Osornio, Rocío., Arteaga-Ramírez, Ramón., Vázquez-Peña, Mario Alberto., Ojeda-Bustamente, Waldo. y Quevedo-Nolasco, Abel. (2019). Red Neuronal Artificial y series de Fourier para pronóstico de temperaturas en el Distrito de Riego 075, Sinaloa México. *Tecnología y ciencias del agua*. 10 (1), 253 - 268.
- Cortés, J.A., Medina A.F.A. y Chaves O.J.A. (2007). El análisis de Fourier a las wavelets análisis de Fourier. *Scientia Et Technica*. 13 (32),151-156.
- Coutinho, Eluã Ramos., Silva, Robson Mariano da., Madeira, Jonni Guiller Ferreira., Coutinho, Pollyanna Rodrigues de Oliveira dos Santos., Boloy, Ronney Arismel Mancebo. y Delgado, Angel Ramon Sanchez. (2018). Aplicación de Redes Neuronales Artificiales (ANN) en el Relleno de Brechas de Series Meteorológicas de Tiempo. *Revista Brasileira de Meteorologi.*, 33 (2), 317-328. <https://doi.org/10.1590/0102-7786332013>.
- Degiovanni, B.V., Martínez, R.C.P. y Motta, O.F. (2010). Producción Ecoeficiente del arroz en América Latina, Tomo I. CIAT, FLAR y UNICORDOBA. (Eds). Cali-Colombia. 513p.

- De Luis M., Longares, L.A., Stepanek, P. y González, J.C. (2007). Tendencias Estacionales De La Precipitación En La Cuenca Del Ebro 1951-2000. *Geographicalia*. 52, 53-78.
- Eischeid, J. K., Pasteris, P. A., Díaz, H. F., Plantico, M. S. and Lott, N. J. (2000). Creating a serially complete, national daily time series of temperature and precipitation for the Western United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 39(9), 1580 - 1591. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<1580:CASCND>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<1580:CASCND>2.0.CO;2)
- Gallegos-Cedillo, J., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez Peña, M. A. and Juárez-Méndez, J. (2016). Estimation of missing daily precipitation and maximum and minimum temperature records in San Luis Potosí. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*. 8 (1), 3-16. 10.5154/r.inagbi.2015.11.008.
- Grossi G.H, Raichijk C. y Righini R. (2010). Algunos Aspectos De La Climatología Solar Del Uruguay. *Revista Brasileira De Meteorologia*. 25(4), 479 – 486.
- Guijarro, J.A. (2004). Climatol: Software libre para la depuración y homogeneización de datos climatológicos. In: El clima, entre el Mar y la Montaña. J.C. García Codron, C. Diego Liaño, P. Fdez. de Arróyabe Hernáez, C. Garmendia Pedraja y D. Rasilla Álvarez. (Eds). A-4. Asociación Española de Climatología. España. 493-502p.
- Kanda, N., Negi, H. S., Rishi, M. S. and Shekhar, M. S. (2018). Performance of various techniques in estimating missing climatological data over snowbound mountainous areas of Karakoram Himalaya. *Meteorological Applications*. 25 (3), 337 - 349.10.1002/met.1699.
- Lane, B. and Kastenholz, E. (2015). Rural tourism: ¿the evolution of practice and research approaches – towards a new generation concept? *Journal of Sustainable Tourism*. 23 (8–9), 1133 – 1156. 10.1080/09669582.2015.1083997

- Medina, R.R.D., Montoya R.E.C. and Jaramillo R.A. (2008). Estimación de valores faltantes en series históricas de lluvia. *Cenicafé*. 59(3), 260 – 273.
- Mintegui, J. y López, F. (1990). La ordenación agrohidrológica en la planificación. Servicio central de publicaciones del gobierno Vasco. 308p.
- Nauman, G. y Vargas, W.M. (2012). Estabilidad de la estimación de la onda anual en escala diaria de la temperatura. Brasil. *Revista Brasileira de meteorología*. 4 (27), 401 – 412.
- Paulhus, J. L. H. and Kohler, M. A. (1952). Interpolation of Missing precipitation records. *Monthly Weather Review*. 80 (8), 129-133.
- Pereira, A.R. (2004). The Priestley-Taylor parameter and the decoupling factor for reference evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*. 125(3), 305 - 313. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.04.002>.
- Riehl, H. (1965). Tropical Meteorology. McGraw Hill. New York. United states of America. 392 p.
- Rodriguez, G.B., Pineda, M. L. F. y Guerra, C.V.H. (2018). Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en el Estado de Zacatecas, México, por medio de información satelital y pluviométrica. *Ingeniería Investigación y tecnología*. 19 (4), 1 – 12.
- Teegavarapu, R. S. y Chandramouli, V. (2005). Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *Journal Hydrology*. 312 (1–4),191–20. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.015>.
- Toro, A.M., Arteaga, R., Vázquez, M. A. y Ibáñez, L. A. (2015). Relleno de series diarias de precipitación, temperatura mínima, máxima de la región norte del Urabá Antioqueño. México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 6(3), 577 – 588.
- Vicent, L. and Gullet, D. (1999). Canadian historical and homogeneous temperatura datasets for climate changes analyses. *International Journal of Climatology*. 9, 1375 – 1388.

Xia, Y., Fábán, P., Stohl, A. and Winterhalter, M. (1999). Forest climatology: estimation of missing values for Bavaria, *Germany. Agricultural and Forest Meteorology*. 96, 131- 144. 10.1016/S0168-1923(99)00056-8.

4 MODELOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA DIARIA DEL ARROZ EN EL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA

Jesica Natalia Valencia González ¹; Ramón Arteaga Ramírez ^{*1}; Mario Alberto Vázquez Peña¹; Abel Quevedo Nolasco²

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua Universidad Autónoma Chapingo. (UACH). Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Código postal. 56230. Estado de México.

²Colegio de Posgraduados (COLPOS) Km. 36.5, México 136 5, Montecillo Código postal. 56230. Texcoco, Estado de México.

Autor para correspondencia: rarteagar@taurus.chapingo.mx

4.1 Resumen

Los cálculos oportunos de la evapotranspiración de referencia diaria (ET_o) cuantifican la demanda del recurso agua; estos son fundamentales para planificar el uso de la disponibilidad hídrica y en consecuencia determinar un consumo diario, más en las condiciones donde la falta de información climática interrumpe en el rendimiento de los diversos modelos para estimar la evapotranspiración de referencia diaria en una determinada región. Por ende, el objetivo de este trabajo fue analizar y evaluar la evapotranspiración de referencia diaria (ET_o) de las ecuaciones de Hargreaves Samani, Priestley y Taylor, García y López y Linacre; respecto a la ecuación de FAO Penman-Monteith, utilizando la información diaria de cinco estaciones próximas a la zona productora de arroz del Valle del Cauca, Colombia. Se estimó la evapotranspiración diaria de 28 años consecutivos; los resultados confirmados por los indicadores estadísticos: Coeficiente de determinación (R²), Coeficiente de correlación (R), la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) y diagramas de cajas, muestran que los modelos Priestley-Taylor (PT) y Linacre (LN) han exhibido los resultados más afines al modelo estándar y la principal restricción para el uso de esa ecuación es la

carencia de datos meteorológicas en los lugares. Las estaciones Ing. Bengala y Ciat Quilichao se exhiben como las áreas que mejores comportamientos poseen en todos los modelos; Ing. Cauca e Ing. Miranda presentaron resultados aceptables en los índices coeficiente de Pearson y raíz cuadrada del cuadrado medio del error para las diversas comparaciones realizadas. Sin embargo, existe evidencia limitada del uso a nivel diario del modelo García y López, siendo este método y el del Hargreaves - Samani los menos ideales para la estación Independencia.

Palabras clave: Modelos de evapotranspiración, arroz, datos diarios, evapotranspiración de referencia.

4.2 Introducción

Las estimaciones de evapotranspiración de referencia (ET_o) han sido ampliamente estudiadas y utilizadas en los fundamentos de ingeniería de riego para definir las necesidades de agua en los cultivos. De acuerdo con Sánchez (2000): el término ha sido usado para describir los procesos totales de transferencia de agua a la atmósfera desde superficies con vegetación. En la agricultura, la evapotranspiración de referencia es una de las variables elementales para fomentar un uso más eficiente del agua, por esto la necesidad de tener apreciaciones precisas (Back, 2008); ya que juega un papel esencial en el balance hídrico para el manejo de cuencas y para la estimación de los requerimientos de riego, la programación del riego y estudios sobre el cambio climático.

En Colombia, la cuantificación de la evapotranspiración en el cultivo de arroz a nivel diario es importante para mejorar el diseño y la programación del riego, conocer sus necesidades hídricas y efectuar un uso más eficiente del agua (Martínez y Pérez, 2006); pero para estimar dicha variable se carecen de registros diarios para utilizar el modelo Penman-Monteith (PM). En Colombia existen algunos trabajos relacionados con la estimación de la ET_o a diferentes escalas y modelos de PM: Barco et al. (2000), concluyeron que Penman y Morton

son modelos difíciles de implementar a causa de la información climática solicitada, la ecuación Cenicafe desarrollada por Jaramillo (2006), permite deducir la evapotranspiración (ETo) de forma sencilla; ya que está solo depende de la elevación sobre el nivel del mar y la evapotranspiración estimada para todo el país hecho por Poveda et al. (2007), indica que las ecuaciones presentadas por Turc y Morton son las más convenientes para estas evaluaciones.

La tendencia actual de la estimación de este tipo de parámetro ha indicado que se reportan más resultados a escala, anual y mensual; no obstante, se han identificado en *Scopus* cuatro reportes significativos sobre la estimación de la evapotranspiración de referencia diaria entorno al cultivo del arroz; publicados en los años 1985 en Japón, 1996 en la India, 2017 en Taiwán y 2019 en Senegal. Al recurrir a los ejemplos: Sakuratani and Horie (1985), usaron el modelo PM para estimar la ETo del campo de arroz en Japón cuando se utilizan valores diarios de radiación neta. Por su parte, Mohán and Arumugam (1996), comparan cuatro modelos para estimar precipitación efectiva respecto al método del balance hídrico simple; utilizan datos diarios de evapotranspiración (ETo) y los registros de precipitaciones correspondieron a trece estaciones en el sur de la India. En tercer lugar, Yao et al. (2017), obtuvieron los mapas de la ETo promedio de 10 días a partir de imágenes satelitales meteorológicas, comparada con la ETo derivada del modelo PM de la FAO, y por último Djaman, Sall, Sow, Manneh and Irmak (2019) determinan los datos climáticos medidos por encima del arroz de riego que se utilizan en la estimación de la ETo mediante el modelo Penman-Monteith en condiciones en las que no existen registros de las estaciones meteorológicas.

La elección de un modelo depende de la disponibilidad de los datos meteorológicos, así como de la exactitud y la precisión del modelo para una región determinada (De Carvalho et al., 2013). Por ende, La FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) ha adoptado el modelo de Penman-Monteith principalmente por dos razones: a) se trata de un modelo físico aplicable no sólo a una zona en específico y b) los datos que se usan se pueden

obtener de estaciones meteorológicas, observatorios o mediciones a través de lisímetros (López, Hess and White, 2009). Expuesto todo lo anterior, el objetivo de este trabajo fue analizar y evaluar la evapotranspiración de referencia diaria (ET_o) de las ecuaciones de Hargreaves Samani, Priestley y Taylor, García y López y Linacre; respecto a la ecuación de FAO Penman-Monteith.

4.3 Materiales y métodos

4.3.1 Ubicación y características del área de estudio

La zona arrocera al sur del valle del Cauca se extiende aproximadamente entre los 3°5'0" a los 3°20'0" de latitud Norte y entre los 76°10'0" y 76°50'0" de longitud Oeste. La elevación de la zona es de aproximadamente de 1000 m.s.n.m, predomina una temperatura media de 23°C; con una oscilación diaria de 11°C, humedad relativa del 73 al 80%, brillo solar de 138 a 200 horas mensuales aproximadamente (Valencia, García y Montero, 2017). Según Koppen corresponde al clima tropical lluvioso de bosque (Martínez y Mendivelso, 2004, p.53) (Figura 4.1).

4.3.2 Información climatológica

Se usaron los registros diarios de la temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa y brillo solar de cinco estaciones climáticas, por un periodo de estudio de 1989 hasta 2016 (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Descripción de las estaciones climáticas

Estación	Altitud (msnm)	Latitud (N)	Longitud (W)
Ciat Quilichao	977	03°03´	76°30´
Ingenio Bengala	1000	03°15´	76°24´
Ingenio Cauca	1000	03°14´	76°13´
La Independencia	963	03°11´8"	76°34´9"
Ingenio Miranda	1128	03°16´	76°20´

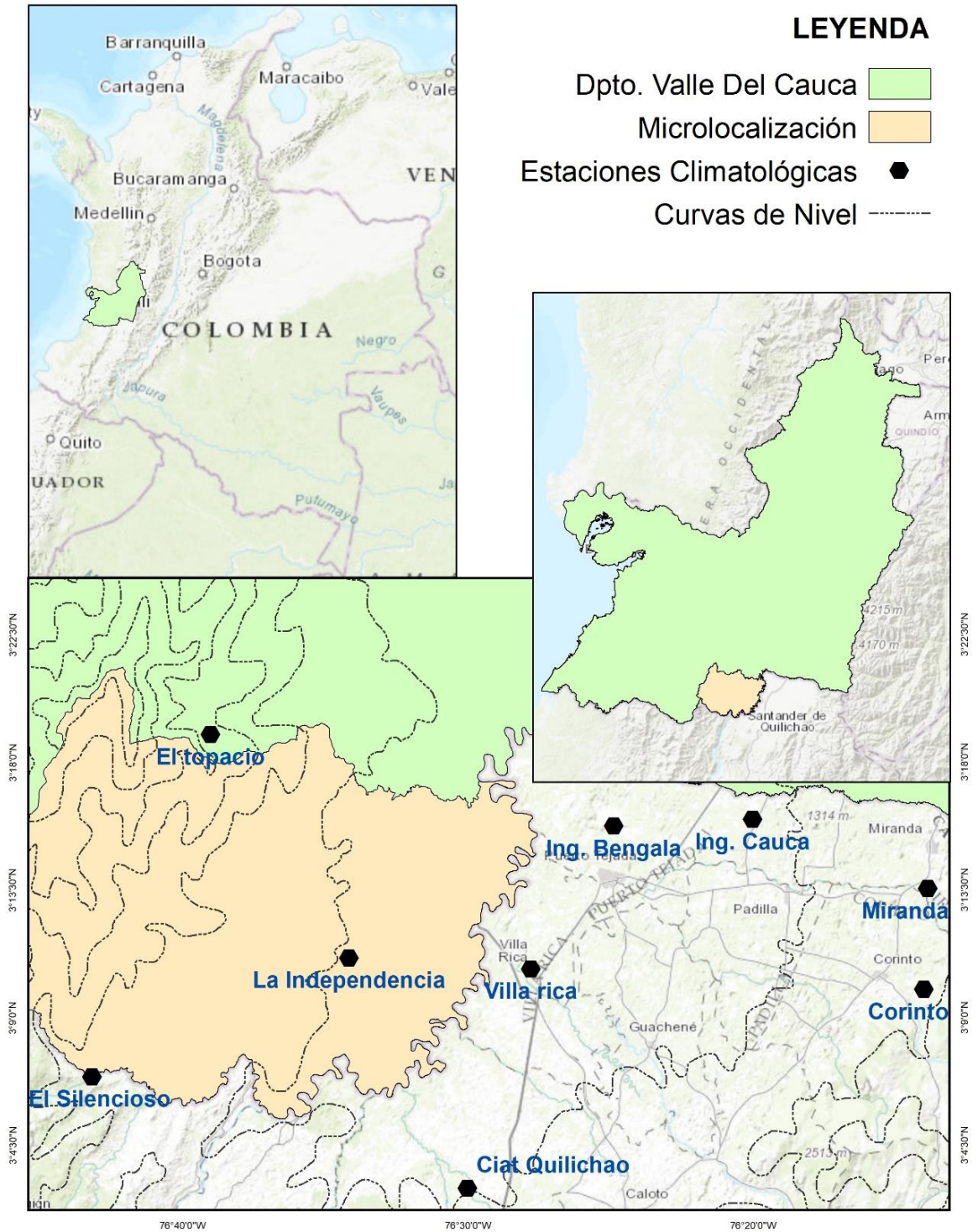


Figura 4.1. Ubicación de la Zona de estudio

4.3.3 Modelos para estimar la Evapotranspiración de referencia diaria (ET_o)

Se calculó la ET_o de los cinco modelos reconocidos a nivel diario en el programa Excel. A continuación, se enlistan los modelos a usar:

Ecuación Penman Monteith (PM)

Es considerado el modelo estándar y el más preciso para estimar ET_o (Allen, Pereira, Raes and Smith, 1998). El método FAO Penman-Monteith fue desarrollado con la definición del cultivo de referencia que es cultivo hipotético de altura de 0.12 m, con una resistencia superficial de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0.23 y que representa la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activa y adecuadamente regado (Allen, Pereira, Raes y Smith, 2006).

$$ET_{o\ PM} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (4.1)$$

ET_oPM, evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

R_n, radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² d⁻¹)

G, flujo de calor de suelo (MJ m⁻² d⁻¹)

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

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

e_a, presión real de vapor (Kpa)

Δ, pendiente de la curva de presión de vapor (KPa° C⁻¹)

γ, Constante psicrométrica (KPa° C⁻¹)

Por ser a escala diaria el valor G=0 para el cultivo de referencia según Allen et al., (2006).

Ecuación Hargreaves-Samani (HS)

El modelo de Hargreaves es un modelo que requiere de variables meteorológicas como, la temperatura (media, máxima y mínima) y la radiación incidente (Xu and Singh, 2001) y la radiación solar extraterrestre (R_a) para estimar la ET_o , para una latitud y un día determinados; R_a puede obtenerse a partir de tablas o puede calcularse mediante un conjunto de ecuaciones que utilizan la temperatura.

$$ET_{O_{HS}} = 0.0023(T_{media} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}R_a \quad (4.2)$$

Ecuación de Priestley-Taylor (PT)

Es un modelo semi-empírico que requiere de menos parámetros para el cálculo de la evapotranspiración, comparado con el modelo de Penman-Monteith (Cervantes-Osornio, Arteaga-Ramírez, Vázquez-Peña, Ojeda-Bustamante y Quevedo-Nolasco, 2013). Esta metodología involucra la radiación solar y manifiesta menos errores, respecto del método estándar (Pereira, 2004). Los elementos necesarios para su cálculo son:

Δ , es la pendiente de la curva de vapor de saturación ($KPa^\circ C^{-1}$).

α , coeficiente empírico equivalente a 1.26

γ , es la constante psicrométrica ($KPa^\circ C^{-1}$).

R_n , es la radiación neta calculada ($MJ m^{-2} d^{-1}$).

G , es la densidad de flujo de calor en el suelo ($MJ m^{-2} d^{-1}$), Por ser a escala diaria el valor $G=0$ para el cultivo de referencia según Allen *et al.*, (2006).

$$ET_{O_{PT}} = \alpha * \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] * (R_n - G) \quad (4.3)$$

Ecuación de Linacre (LN)

Este modelo se deriva de *Penman*, estimando la evapotranspiración a través de datos geográficos (latitud y altitud) y de temperatura (Carvalho, Ríos, Miranda and Castro, 2011)

$$EToLN = \frac{\left[\frac{500 * T_m}{100 - A} \right] + 15 * (T - TPR)}{80 - T} \quad (4.4)$$

EToLN, en mm día-1

Tm, T + 0.006*h

h, altura del lugar, en msnm.

TPR, temperatura del punto de rocío, °C

A, latitud del lugar (Grados decimales)

T, temperatura media, en °C

Ecuación de García y López (GL)

El modelo propuesto se adapta a las latitudes comprendidas desde los 15° N hasta los 15° S. Las variables utilizadas son la temperatura media en °C y la humedad relativa en % (García y López, 1970).

$$EToGL = \left[1.21 * 10^{\frac{7.45 * T}{234.7 + T}} * (1 - 0.01 * HR) \right] + 0.21 * T - 2.3 \quad (4.5)$$

4.3.4 Modelo de Regresión Lineal

Se utilizaron cinco estaciones para definir los diagramas de dispersión y así mismo; la relación que existe entre los datos calculados con el modelo de PM y los de HS, PT, LN y GL, de las cuales se obtienen los siguientes modelos lineales.

$$ETo_{PM-HS} = a + b * EToHS \quad (4.6)$$

$$ETo_{PM-PT} = a + b * EToPT \quad (4.7)$$

$$ETo_{PM-LN} = a + b * EToLN \quad (4.8)$$

$$ETo_{PM-GL} = a + b * EToGL \quad (4.9)$$

4.3.5 Índices estadísticos

Los índices utilizados para evaluar la bondad de ajuste de los modelos son:

- a) El coeficiente de correlación de Pearson (r) y puede ser usado como: "muy bajo" ($r < 0.1$), "bajo" ($0.1 < r < 0.3$), "moderado" ($0.3 < r < 0.5$); "alto" ($0.5 < r < 0.7$); "muy alto" ($0.7 < r < 0.9$); y "casi perfecto" ($r > 0.9$) (Cunha, Magalhaes, Castro and Souza, 2017).
- b) El coeficiente de determinación (R^2) superior a 0.60, indica el grado en que la regresión explica la suma del total al cuadrado (Tagliaferre et al., 2012).
- c) Los valores más bajos de la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) (Caí, Liu, Lei and Santos, 2007).

Diagrama de cajas

Se emplearon estos gráficos para identificar la forma en cómo se distribuyen la media y la desviación estándar en los conjuntos de datos calculados por todos los modelos, para cada estación; estos fueron elaborados en el programa gratuito Instat.

4.4 Resultados y discusión

Para las cinco estaciones empleadas los resultados obtenidos permiten observar, que el modelo que mostró mejor resultado según el índice de coeficiente de

determinación fue la relación entre la ecuación Penman–Monteith y Priestley-Taylor (Cuadro 4.2). De la misma manera Amatya, Skaggs, and Gregory (1995), evidenciaron que este modelo, se posiciono en primer lugar con el R^2 más alto (0.94) para las predicciones diarias de ET-referencia para el sitio de Carteret (Noreste de Carolina del Norte). Mientras tanto, un estudio hecho para comparar ambos modelos y estimar la evapotranspiración de los cultivos de referencia en los países tropicales fue ejecutada por Gunston and Batchelor (1983), quienes adquirieron un desempeño aceptable de $R^2=0.87$ para 126 meses húmedos, $R^2=0.90$ para 86 meses de lluvias intermedias y $R^2=0.48$ en 148 meses de sequía. Otro notable ejemplo fue ejecutado por Qiu et al. (2019), en la ciudad Nanjing, de la provincia Jiangsu en China, cuyo modelo PT pudo estimar razonablemente la ET para el arroz; con unos coeficientes de determinación de 0.92 y 0.96 para dos estaciones. Este modelo ha sido exitoso, después del método PM, gracias a la radiación neta (R_n); es una variable meteorológica dominante que afecta a la ET-referencia a corto plazo en el sistema de producción de arroz. No obstante, Cuando una estación meteorológica tiene un conjunto de datos limitado, es muy común estimar si la estación meteorológica sólo tiene datos de temperatura y radiación solar, y la mejor opción para ese caso parece ser el uso de PT, que de hecho es una simplificación del método original Penman-Montheith (Senthelas, Gillespie and Santos, 2010).

Cuadro 4.2. Coeficiente de Determinación (R^2) de la ETo-PM respecto a HS, PT, GL y LN para cada estación

Ecu	PM-Ing.Bengala	PM-Ing.Cauca	PM-Ciat Quilichao	PM-Independencia	PM-Ing.Miranda
HS	0.826	0.377	0.519	0.290	0.268
PT	0.668	0.911	0.834	0.993	0.877
GL	0.526	0.418	0.561	0.299	0.329
LN	0.758	0.354	0.546	0.299	0.273

HS: Ecuación de Hargreaves-Samani

PT: Ecuación de Priestley-Taylor

GL: Ecuación de García-López

LN: Ecuación Linacre

Los modelos de HS, GL y LN exhibieron también resultados considerablemente aceptables, descritos de la siguiente forma: HS demostró valores de R^2 igual a 0.82 y 0.51, para las estaciones Ing. Bengala y Ciat Quilichao, respectivamente. Un reporte útil lo propone Irmak, Allen and Whitty (2003), difunden que HS contra PM tiene un 0.7 de coeficiente de determinación según un estudio donde estimaron las tasas de ETo diaria en gramíneas y pastos en Florida, EE. UU. Rahimi (2008), compara el modelo HG y PM; y halló un alto coeficiente de determinación (R^2) entre estos modelos en 12 estaciones de Khuzestan plain-Iran con resultados superiores de 0.93 de R^2 entre 29.95° y 32.9°N de latitud. Un reporte más reciente, indica que la ETo diaria estimada a través del modelo Hargreaves-Samani en diferentes estaciones del oeste de Texas, EEUU revelo más del 0.7 de coeficiente de determinación entre este modelo respecto al de PM; es decir, que existe un alto nivel de concordancia entre ambos métodos para esta zona (Awal, Habibi, Fares and Deb, 2020).

El modelo de García y López presentó un rango de valores de R^2 entre 0.299 y 0.561 para las cinco estaciones de este estudio; estos resultados son considerados medianamente aceptables, puesto que este modelo se ha expuesto en otros estudios a nivel mensual y anual (Sánchez, 2000); es una opción para cuando no se pueden emplear otros métodos, debido a la carencia de registros de brillo solar.

Linacre, se manifestó de forma similar que el modelo de HS (Cuadro 4.2). Los resultados corroboran los encontrados por Issaka et al. (2016), quienes indicaron que este modelo se posicionó en último lugar con un rendimiento moderado de $R^2 = 0.47$ entre la evaluación de seis modelos respecto al estándar, cuyos datos diarios utilizados fueron los de la estación meteorológica del Aeropuerto Internacional de Doha, Qatar en un período de 30 años, otro ejemplo es el de Araújo, Oliveira, Araújo, Ledo, y Silva (2010), quienes evaluaron el desempeño de los métodos de estimación de la evapotranspiración de referencia en las ciudades del estado de Ceará, encontrando un desempeño excelente para este método de $R^2 = 0.934$. El rendimiento de este modelo se debe a que utiliza

solamente datos de temperatura del aire y altitud como la variable del sitio, limitando la representatividad de las condiciones climáticas para propósitos de estimación de la ETo (Pereira, Yanagi, Mello, Silva and Silva, 2009).

El modelo PT ha demostrado buenos resultados e indica un buen desempeño para cuatro estaciones; aunque se obtuvo una correlación baja para la estación Ing. Miranda (Cuadro 4.3). Haciendo alusión al buen desempeño de esta ecuación, Alencar, Sedyama, Wanderley, Almeida y Delgado (2011), evaluaron la ETo diaria de 10 años en tres ciudades en el norte del estado de Minas Gerais, e indican que el modelo PT es el más apropiado para estimar la evapotranspiración en comparación con el método Penman-Monteith (FAO 56); puede PT clasificarse como óptimo para un período de 365 días consecutivos. Otra investigación afín por Cunha et al. (2017), reporta altos resultados del coeficiente de Pearson de 0.7701 y 0.7908 para varias ciudades de Ceará-Brasil.

Cuadro 4.3. Coeficiente de Pearson (r) de la ETo-PM respecto a HS, PT, GL y LN para cada estación

Ecu	PM- Ing.Bengala	PM- Ing.Cauca	PM-Ciat Quilichao	PM- Independencia	PM- Ing.Miranda
HS	0.909	0.613	0.720	0.539	0.517
PT	0.772	0.593	0.913	0.526	0.369
GL	0.725	0.646	0.749	0.547	0.573
LN	0.723	0.300	0.750	0.431	0.574

En iguales circunstancias, los modelos HS y GL representan resultados positivos y a la vez similares respecto al modelo estándar en todas las estaciones (Cuadro 4.3). Esto se ejemplifica con la investigación hecha por Gurski, Jerszurki y Souza (2018), hallaron en el estado de Paraná, Brasil la media del coeficiente de Pearson fue de 0.8 entre los modelos HS y PM; ya que tiende a funcionar mejor en las regiones de clima cálido, con temperaturas medias elevadas durante todo el año. Martínez, Boueri y Escalona (2005), realizaron un estudio a diferentes zonas del centroccidente de Venezuela y obtuvieron resultados máximos de r igual a 0.67 y 0.80 para GL y HS, correspondientemente; también encontraron

que estas son las fórmulas de evapotranspiración de referencia más adaptadas a la zona. Una investigación más reciente, indica que la ecuación GL se puede emplear para el cálculo de las necesidades hídricas en las condiciones del norte de Cuba; ya que se ubicó con un 0.85 de coeficiente de correlación de Pearson respecto a 7 ecuaciones más (Santana y Peña, 2010).

El modelo de Linacre respecto al estándar expone desempeño moderado en este índice; ya que de las estimaciones tres estaciones estuvieron por encima de 0.5, y la estación Ing.Cauca e Independencia obtuvieron valores de 0.3 y 0.431 de r. Resultados superiores obtuvieron Leitão, Oliveira and Leitão (2007) en dos regiones de Paraíba, Brasil donde el coeficiente de Pearson fue de 0.904 y 0.836 para Boqueirão y Patos, respectivamente. Así mismo, Lavado, Lhomme, Labat, Loup and Boulet (2015), reportan un intervalo de valores de r entre 0.78 a 0.92 en ocho estaciones de la cuenca andina amazónica Peruana.

Los resultados proporcionan soporte concluyente sobre la estación Ing.Bengala; que obtuvo mejores estimaciones en todos los modelos, seguida de las estaciones Ciat Quilichao e Ing. Cauca que tuvieron desempeños aceptables en este índice. Las estaciones independencia e Ing. Miranda han manifestado tener resultados muy similares en los diversos índices estadísticos; a pesar de que se encuentran a 37.73 km de distancia una de la otra. Este caso muestra la necesidad de indagar a fondo, una posible relación climática entre los lugares en que se encuentran ubicadas dichas estaciones; dado que una se halla internamente en la zona productora de arroz y la otra no.

La comparación entre métodos ha permitido mostrar que el modelo PT es un buen modelo para estimar la ETo diaria y mediante el índice RMSE se adquirió los errores más bajos entre este modelo y PM (Cuadro 4.4). Para continuar, Amatya et al. (1995), divulgan un rango de valores de RMSE entre 0.39 a 1.04 mm día⁻¹ en el este de Carolina del Norte. Al mismo tiempo, Lavado et al. (2015), manifiestan un promedio de RMSE de 0.435 mm día⁻¹ en ocho estaciones y el reportado para este estudio fue de 0.64 mm día⁻¹ para cinco estaciones; es decir 0.2 unidades mayor, lo que lo hace ser admisible. Otro hallazgo importante es

reportado por Bochetti, Muñoz, Tume and Bech (2016), identificaron que a mayor número de días se estime y compare los modelos Priestley-Taylor y Hargreaves-Samani de ETo diaria respecto al de Penman-Montheith; el índice RMSE será más pequeño, pues de 30 días julianos continuos evaluados, exhibieron resultados de 1.04 y 1.19 mm día⁻¹ para PT y HS respectivamente.

Cuadro 4.4. Raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) de la ETo-PM respecto a HS, PT, GL y LN para cada estación

Ecu	PM- Ing.Bengala	PM- Ing.Cauca	PM-Ciat Quilichao	PM- Independencia	PM- Ing.Miranda
HS	0.55	1.39	1.30	2.01	1.66
PT	0.35	0.59	0.36	1.13	0.76
GL	0.64	0.66	0.71	2.69	0.73
LN	1.03	0.59	0.60	0.75	0.60

Para el estudio en curso, el error promedio del modelo HS fue de 1.38 mm día⁻¹, lo cual se exhibe como aceptable; aunque se evidencia como el error promedio más alto de todos los modelos usados respecto a PM. Similitudes son expresadas por Amatya et al. (1995), quienes obtuvieron un intervalo de errores de RMSE de 0.87 a 1.37 mm día⁻¹; en cambio, el error promedio de RMSE entre el modelo HS y PM para doce estaciones en Khuzestan, suroeste de Irán fue de 1.17 mm día⁻¹ (Rahimi, 2008). Sin embargo, Lavado et al. (2015), presenta 0.50 mm día⁻¹ como error de la media de este modelo respecto al modelo de referencia PM para ocho estaciones en Perú. Si bien es notorio, la estación independencia exhibió los resultados más altos en este índice en los modelos HS, PT y GL contra PM; esto permite enunciar que estos métodos se pueden recomendar para el cálculo de la ETo en otro tipo de escala para dicha estación (Martínez et al., 2005).

Hasta ahora este índice permite presentar el modelo de Linacre como un segundo mejor método de estimación después del método PT; puesto que su RMSE promedio de las cinco estaciones para el área de estudio fue 0.71 mm día⁻¹ (Cuadro 4.4.). Son valores similares a los reportados por Lavado et al. (2015), quienes exhiben valores de 0.42 a 1.05 mm día⁻¹ para ocho estaciones en la

cuenca amazónica andina. Esto ha sido posible, gracias a que se requiere sólo la temperatura media (T) y el punto de rocío (Td), y es un modelo útil en una amplia gama de climas; expuesto por Linacre (1997), no es necesario medir el punto de rocío si se dispone de temperaturas extremas diarias, puesto que éstas permiten hacer una estimación aproximada.

Diagrama de cajas

Los resultados obtenidos de los análisis anteriores se lograron identificar que el modelo Priestley-Taylor es el método que tiene alta afinidad con el método estándar; pero otra característica relevante de la discusión es la distribución del conjunto de datos de cada modelo por estación. Es así, como el modelo PM exhibe un rango de 3 a 4 mm día⁻¹ de la ETo estimada para la estación Ciat Quilichao; la cual coinciden con el 50% con los resultados obtenidos por el modelo PT. Ambos modelos exhiben correspondencia similar para esta estación; ya que los respectivos valores de varianza son de 0.50 para PM y 0.53 para PT y la desviación estandar es de 0.71 mm día⁻¹ para PM y 0.73 mm día⁻¹ para PT; lo que permite inferir que en ausencia de datos para estimar este parametro con el modelo de PM se puede emplear el PT (Figura 4.2); similitud que tambien divulgan Lu, Sun, McNulty and Amatya (2005) al comparar seis modelos diarios para calcular la ETo respecto al modelo PM en el sureste de Estados Unidos.

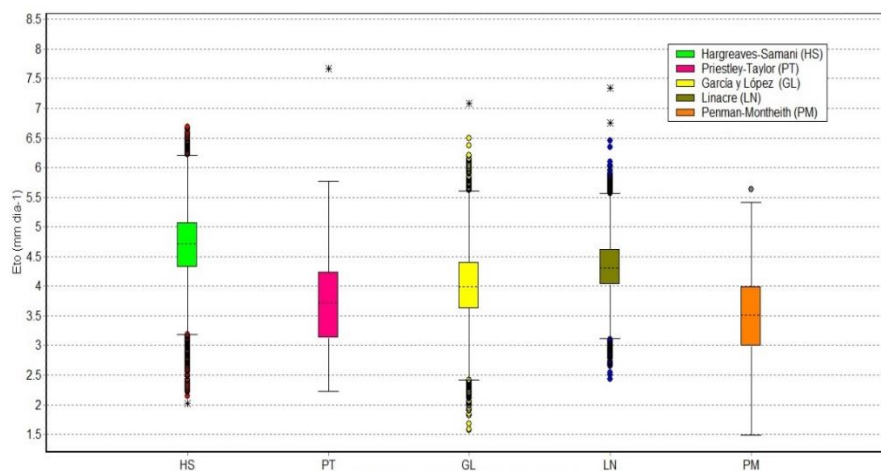


Figura 4.2. Estimaciones de la ETo para la estación Ciat Quilichao.

Linacre puede ser considerado como un tercer modelo para estimar la ETo; ya que este ha manifestado un intervalo de resultados similares al del PM para la estación Independencia. En cambio, de los otros modelos se puede mencionar que no coinciden con PM; puesto que la varianza para GL, PT y HS es de 0.60, 0,40 y 0.53, respectivamente (Figura 4.3.). Es evidente que hay una gran variabilidad en los valores de la ETo diaria por lo que es notorio la posición desigual de las cajas entre sí. Comparativamente, Vicente et al. (2014), exhiben que, para la época de otoño, el modelo Linacre mostró valores de ETo igual y más altos que el método PM; pero se observaron valores inferiores estimados de LN para la sección de verano respecto al método estándar. Esto es posible ya que cada modelo fue creado para unas condiciones climáticas específicas que difieren de las presentadas por cada estación, así el comportamiento de cada modelo es muy cambiante dependiendo del lugar y época del año en la que se utilice (Sánchez, 2000).

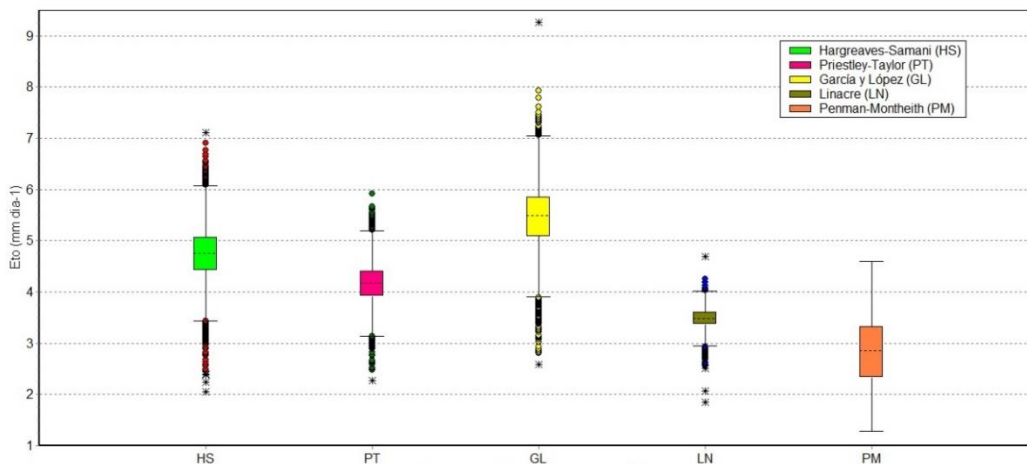


Figura 4.3. Estimaciones de la ETo para la estación Independencia.

De la estación Ing. Miranda los modelos LN y PT tienen una varianza de 0.12 y un comportamiento similar en su desviación estándar de 0.34 y 0.35 mm día⁻¹; con un conjunto de datos que coinciden con las estimaciones hechas por el método estándar. No obstante, PM presenta un conjunto de datos entre 1.7 y 5.1 mm día⁻¹, con pocos valores extremos entre 5.2 y 5.5 mm día⁻¹; eso indica que el uso de este modelo para esta estación exhibe algunos valores alejados de su

media en más de dos unidades (Figura 4.4). Una investigación similar realizada en Macedonia Occidental, Grecia por Efthimiou, Alexandris, Karavitis and Mamassis (2013), presentó que los modelos LN y PT reportaron el 79 y 89% de coincidencia en las estimaciones diarias de 34 años de la ETo respecto a las del Penman-Montheith.

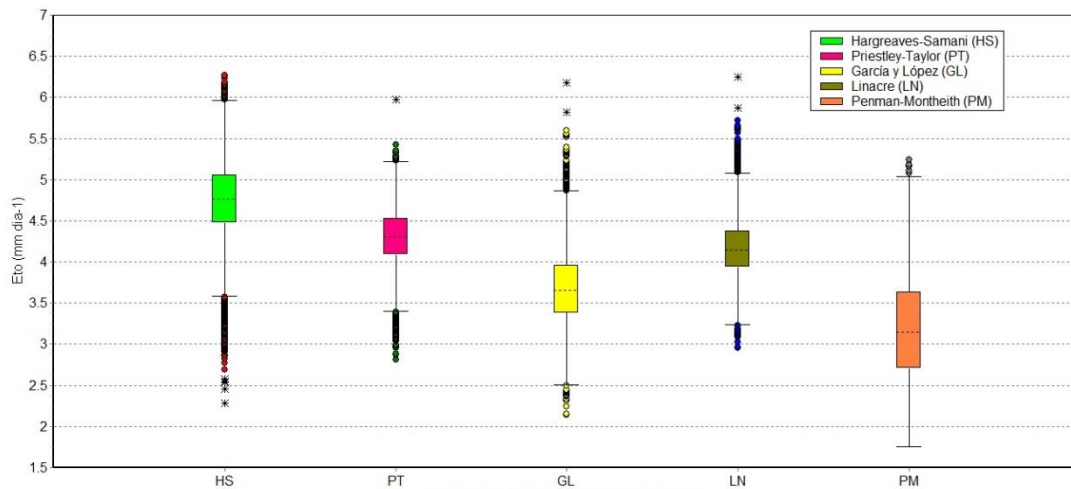


Figura 4.4. Estimaciones de la ETo para la estación Ing. Miranda.

La estación Ing. Bengala exhibe que las estimaciones hechas por el modelo PM y HS tienen una varianza de 0.281 y 0.278 respectivamente, y una desviación estándar similar de 0.53 mm día⁻¹; lo que permitiría pensar que ambos métodos sirven para caracterizar dicha estación en un tiempo de estudio definido. PM se ve influenciado por varios parámetros que, de acuerdo con los experimentos hechos por Tyagi, Sharma and Luthra (2000) existe un 93.4% de probabilidad que un modelo diferente al de PM tenga coincidencia con él (Figura 4.5); pero Lang et al. (2017), aluden que la ecuación de HS puede ser usada más fácilmente que PT para estimar la ETo en el suroeste de China; ya que la primera requiere menos parámetros para estimar la ETo que la segunda. Sin embargo, para este caso fue el mismo método estándar quien presentó más observaciones que se alejan de manera poco usual del resto de los datos. En cambio, Los modelos PT, GL y LN en su conjunto de datos se halla más cercano a la media.

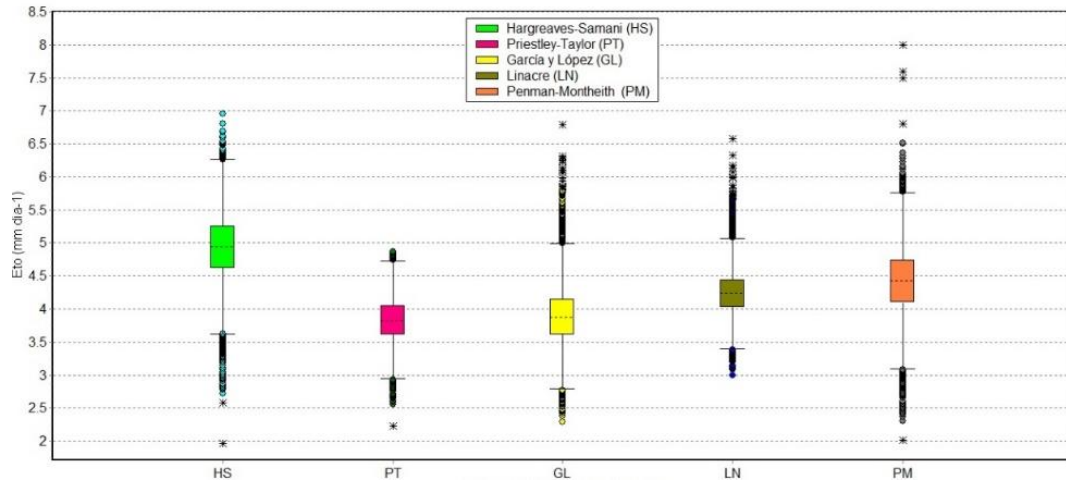


Figura 4.5. Estimaciones de la ETo para la estación Bengala.

El 95% de las estimaciones realizadas con el modelo GL coinciden con el modelo estandar para la estación Ing. Cauca. En cambio el 75% de los resultados obtenidos del modelo linacre coinciden con el 50% de los valores obtenidos del modelo PM. Respecto a PT y GL se caracterizan por presentar 0.43 y 0.44 mm dia-1 de desviación estandar pero con una media y conjunto de datos diferentes. Gong, Xu, Chen, Halldin and Chen (2006) exponen que las variables climáticas en las apreciaciones diarias de la evapotranspiración entre el modelo PM y GL manifiestan que la humedad relativa es el factor meteorológico más sensible, seguido de la velocidad del viento, la radiación solar y la temperatura; he allí la relación tan alta que han presentado en la estimación de esta estación (Figura 4.6).

Del mismo modo Hargreaves-Samani posee la media más alta con valores atipicos y extremos; que comparando este con el modelo estandar se podria indicar que HS no es un método conveniente para esta estación; ya que PM los considera dentro de su varianza. Casos similares los reportan Pérez y Castellví (2002) quienes enuncian que el modelo HS presenta la mayor dispersion en la distribución de los datos y los mayores valores atipicos en el cálculo de la ETo en la región de cataluña en España

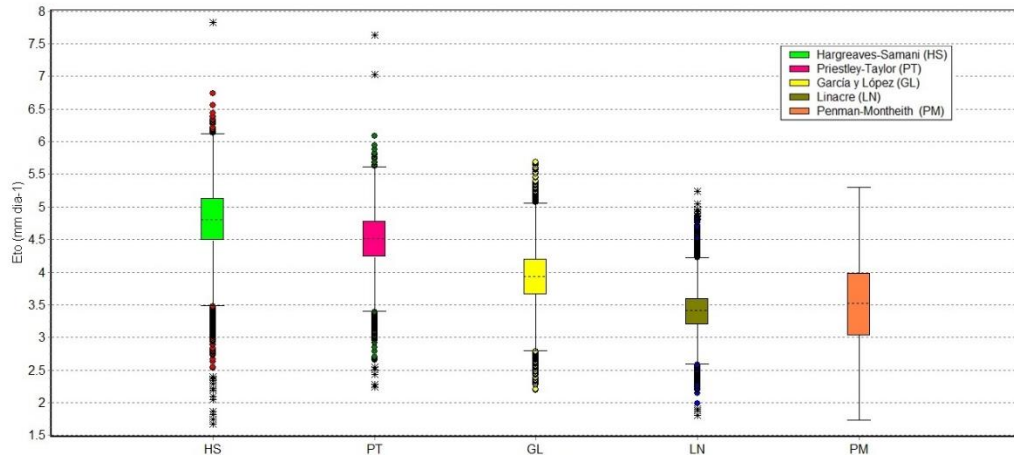


Figura 4.6. Estimaciones de la ETo para la estación Ing. Cauca.

Los gráficos exhibidos anteriormente permiten identificar que los modelos más cercanos al método estándar entre las cinco estaciones fueron el PT y LN; presentaron estadísticas idénticas, mejores ajustes o menores errores. En síntesis, la relación de las ecuaciones Penman-Monteith y Priestley-Taylor exponen su validez cuando se disponen de registros necesarios para su aplicación a nivel diario. Dos anotaciones importantes, las expresan Vicente et al. (2014), indican que los modelos basados en las temperaturas como Hargreaves-Samani suele subestimar la ETo para varias estaciones de un solo lugar y que algunos métodos pueden mostrar la mejor concordancia con el modelo PM; pero, podría tener la menor concordancia en una estación diferente. Sin embargo, es importante manifestar que los modelos restantes constituyen una herramienta admisible cuando no se cuenta con los datos climatológicos suficientes o de procedencia confiable tal como lo señalan Allen et al. (1998), quienes indican que se pueden sugerir diversos métodos para el cálculo de la ETo basado en el tipo de información climática que se tenga.

4.5 Conclusiones

El modelo Penman-Montheith de la FAO estima la evapotranspiración de referencia diaria (ETo) al considerar un conjunto completo de datos meteorológicos, principal restricción para su uso en algunos lugares. Situación

que se da en el sur del departamento del Valle del Cauca, y con pocas estaciones meteorológicas. Donde es frecuente la falta de datos de la velocidad del viento, la humedad relativa y la radiación solar, no existe ningún estudio previo que evalúe el rendimiento de los diversos métodos para estimar la evapotranspiración de referencia diaria en esta región del Colombia.

El modelo Priestley-Taylor es un buen método entre los estudiados para las estaciones usadas, este manifiesta una alta similitud a los valores obtenidos respecto al modelo estándar Penman-Montheith. Otro modelo útil para estimar la evapotranspiración de referencia diaria es el de Linacre; al igual que Priestley-Taylor ambos métodos son ideales; ya que son modificaciones del modelo estándar.

Hay evidencia que limitan el uso a nivel diario del modelo García y López; a pesar de ser una ecuación adaptada para el Trópico, cuyos factores climatológicos son de fácil adquisición. Respecto al modelo Hargreaves-Samani se presenta como un método aceptable para la estación Ing. Bengala; sin embargo, este modelo junto al de García y López no son ideales para la estación independencia debido a que los errores de la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) se presentan por encima de 2mm día^{-1} .

4.6 Literatura citada

- Alencar, L. P., Sedyama, G. C., Wanderley, H. S., Almeida, T. S. y Delgado, R. C. (2011). Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades no norte de Minas Gerais. *Revista Engenharia na Agricultura, Viçosa*. 19 (5), 437 – 449.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Serie de Riego y Drenaje. FAO-56. Roma. 301 p.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. N°56 Ed. FAO. Italia, Roma. 323 p.

- Amatya, D.M., Skaggs, R.W. and Gregory, J.D. (1995). Comparison of methods for estimating Ref-Et. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 121 (6), 427- 435.
- Araújo, E.M., Oliveira, J.B., Araújo, E.M., Ledo, E.R. And Silva, M.G. (2010). Desempenho de métodos de estimativa de ETo correlacionados com a equação padrão Penman Monteith FAO56, em cidades do estado do Ceará. *Revista Científica*. 5(2).
- Awal, R., Habibi, H., Fares, A. & Deb, S. (2020). Estimating reference crop evapotranspiration under limited climate data in West Texas. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 28, 1 - 19.10.1016/j.ejrh.2020.100677
- Back, A.J. (2008). Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para a estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga, SC. *Irriga, Botucatu*. 13 (4), 449 - 466.
- Barco, J., Cuartas, A., Mesa, O., Poveda, G., Vélez, J.I., Mantilla, R., Hoyos, C., Mejía, J.F., Botero, B. y Montoya. M. (2000). Estimación de la evaporación en Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*. 7, 43 - 51.
- Bochetti, M.J., Muñoz, E., Tume, P. and Bech, J. (2016). Analysis of three indirect methods for estimating the evapotranspiration in the agricultural zone of Chillán, Chile. *Obras y Proyectos*. 19, 74-81.
- Caí, J., Liu, Y., Lei, T. and Santos, P.L. (2007). Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman–Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology*. 145, 22–35.
- Carvalho, L., Rios, G. F., Miranda, W. & Castro N.P. (2011). Evapotranspiração De Referência: Uma Abordagem Atual De Diferentes Métodos De Estimativa. Pesquisa Agropecuária Tropical. *Agricultural Research In The Tropics*. 41 (3). 10.5216/Pat.V41i3.12760.
- Cervantes, O.R., Arteaga, R. R., Vázquez, P. M. A., Ojeda, B. W. y Quevedo, N.A. (2013). Modelos Hargreaves Priestley-Taylor redes neuronales artificiales en la estimación de la evapotranspiración de referencia. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. 14(2), 163-176.

- Cunha, F. da., Magalhaes, F., Castro, M.A. de. and Souza, E. J. de. (2017). Performance of estimative models for daily reference evapotranspiration in the City of Cassilândia, Brazil. *Engenharia Agrícola*. 37 (1), 173 -184.
- De Carvalho A., De Carvalho, M.L., Vianello, R., Sediya, G., de Oliveira M.A. y De Junior, S. (2013). Geostatistical improvements of evapotranspiration spatial information using satellite land surface and weather stations data. *Theoretical and Applied Climatology*. 13 (1-2), 155-174.
- Djaman, K., Sall, M., Sow, A., Manneh, B. and Irmak, S. (2019). Impact of Air Temperature and Relative Humidity Measured over Rice and Grass Canopies on Penman-Monteith Reference Evapotranspiration Estimates. *American Society of Civil Engineers*. 145 (1), 06018008. 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001362.
- Efthimiou, N., Alexandris, S., Karavitis, C. and Mamassis. N. (2013). Comparative analysis of reference evapotranspiration estimation between various methods and the FAO56 Penman - Monteith procedure. *European Water*. 42, 19 – 34.
- García, J. y López, J. (1970). Fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial adaptada al trópico. *Agronomía Tropical*. 20(5), 335-345.
- Gong, L., Xu, C., Chen, D., Halldin, S. y Chen, YD. (2006). Sensibilidad de la evapotranspiración de referencia Penman-Monteith a variables climáticas clave en la cuenca de Changjiang (río Yangtze). *Journal of Hydrology*. 329 (3-4), 620–629. 10.1016 / j.jhydrol.2006.03.027.
- Gunston, H. & Batchelor, C.H. (1983). A comparison of the Priestley-Taylor and Penman methods for estimating reference crop evapotranspiration in tropical countries. *Agricultural Water Management*. 6, 65-77.
- Gurski, B.C., Jerszurki D. y Souza, J.L.M. (2018). Alternative reference evapotranspiration methods for the main climate types of the state of Paraná, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 53 (9), 1003–1010. 10.1590 / s0100-204x2018000900003.
- Issaka, A.I., Paek, J., Abdella, K., Pollanen, M., Huda, A.K.S., Kaitibie, S. and Moustafa, A.T. (2017). Análisis y calibración de relaciones empíricas para

- estimar la evapotranspiración en Qatar: estudio de caso. *Revista de ingeniería de riego y drenaje*. 143 (2), 1 - 7. 10.1061 / (asce) ir.1943-4774.0001106.
- Irmak, S., Allen, R.G. and Whitty, E.B. (2003). Daily Grass and Alfalfa-Reference Evapotranspiration, Estimates and Alfalfa-to-Grass Evapotranspiration Ratios in Florida. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 129, 360 – 370.
- Jaramillo, A. (2006). Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Cenicafé*. 57 (4), 288-298.
- Lavado, W., Lhomme, J., Labat, D., Loup Guyot, J. & Boulet, G. (2015). Estimación de la evapotranspiración de referencia (FAO Penman - Monteith) con limitados datos climáticos en la Cuenca Andina Amazónica Peruana. *Revista Peruana Geo – Atmosférica*. 4, 34-36.
- Lang, D., Zheng, J., Shi, J., Liao, F., Ma, X., Wang, W., Chen, X. and Zhang, M. A. (2017). Comparative Study of Potential Evapotranspiration Estimation by Eight Methods with FAO Penman–Monteith Method in Southwestern China. *Water*. 9 (734), 1 – 18.
- Leitão, M.M.V.B.R., Oliveira, G.M. & Leitão, T.J.V. (2007). Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação para duas regiões da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 11 (6), 585-593.
- Linacre, E. T. (1977). A simple formula for estimating evapotranspiration rates in various climates, using temperature data along. *Agricultural Meteorology*. 18, 409 – 424.
- López, M.J.I., Hess, T.M. and White, S.M. (2009). Estimation of reference evapotranspiration in a mountainous mediterranean site using the Penman-Monteith equation with limited meteorological data. *Pirineos*. 164, 7 – 31.
- Lu, J., Sun, G., McNulty, S. and Amatya, D. A. (2005). comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United

- States. *Journal of the American Water Resources Association*. 41 (3), 621 - 633.
- Martínez, B.R. y Mendivelso, L.D. (2004). Aspectos del medio natural. En IGAC y CVC. Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del Departamento Del Valle Del Cauca. TOMO I. (pp 1 – 541). Bogotá D.C.
- Martínez, R., Boueri, M. A. y Escalona, P. (2005). Correlación entre la evaporación en tina y la evapotranspiración de referencia en cinco estaciones climatológicas de Venezuela. *Bioagro*. 17 (2), 79-83.
- Martínez, C.A. y Pérez, C.O. (2006). Evapotranspiración del cultivo del Arroz bajo riego por aspersión. *Ingeniería del agua*. 13 (1), 59 – 69.
- Mohán, S. B. and Arumugam, N. (1996). Comparative Study of Effective Rainfall Estimation: Methods for Lowland Rice. *Water Resources Management*. 10, 35 - 44.
- Pereira, D.R., Yanagi, S.N.M., Mello, C.R., Silva, A.M. & Silva, L.A. (2009). Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. *Ciência Rural*. 39 (9), 2488 - 2493.
- Pereira, A. R. (2004). The Priestley–Taylor parameter and the decoupling factor for estimating reference evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*. 125 (3-4), 305 313. 10.1016/j.agrformet.2004.04.002
- Pérez, P. y Castellví, F. (2002). Análisis de la evapotranspiración a escala local y regional en Cataluña. *Ingeniería del Agua*. 9 (1), 59 – 72.
- Poveda, G., Vélez, J. I., Mesa, O. J., Cuartas, A., Barco, J., Mantilla, R. I., Mejía, J. F., Hoyos, C. D., Ramírez J. M. y Ceballos, L. I. (2007). Linking long-term water balances and statistical scaling to estimate river flows along the drainage network of Colombia. *Journal of Hydrologic Engineering*. 12 (1), 4-13.
- Qiu, R., Liu, C., Cui, N., Wu, Y., Wang, Z. & Li, G. (2019). Evapotranspiration estimation using a modified Priestley-Taylor model in a rice-wheat rotation system. *Agricultural Water Management*. 224 (105755), 1-13.

- Rahimi, K.A. (2008). Comparative study of Hargreaves's and artificial neural network's methodologies in estimating reference evapotranspiration in a semiarid environment. *Irrigation Science*. 26, 253 – 259. 10.1007/s00271-007-0090-z.
- Sakuratani, T. & Horie, T. (1985). Studies on Evapotranspiration from Crops (1) On Seasonal Changes, Varietal Differences and The Simplified Methods of Estimate in Evapotranspiration of Paddy Rice. *Journal agricultural meteorology*. 41 (1), 145 - 55.
- Sánchez, M. M.I. (2000). Características y apreciaciones generales de los métodos de medida y estimación de la evapotranspiración. *Revista de Geografía Norte Grande*. 27, 27-36.
- Santana, P.L. y Peña, P.E. (2010). Obtención de modelos para la determinación de la evapotranspiración de referencia en condiciones de clima subhúmedo seco en las tunas, Cuba. *IDESIA Chile*. 28 (1), 55 – 59.
- Sentelhas, P.C., Gillespie, T.J. and Santos, E.A. (2010). Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*. 97, 635 - 644. 10.1016/j.agwat.2009.12.001.
- Tagliaferre, C., Santos, L.C., Santos NETo, I.J., Santos, T.J., Rocha, F.A. and Guimarães, D.U. (2012). Estimativa da evapotranspiração de referência com uso do irrigômetro em Vitória da Conquista-BA. *Irriga, Botucatu*. 17(1), 28 - 38.
- Tyagi, N.K., Sharma, D.K. and Luthra, S.K. (2000). Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter. *Agricultural water management*. 45, 41-54.
- Valencia, J.M., García C.E. y Montero, D. (2017). Anomalías de vegetación asociadas con el fenómeno del ENOS en el valle geográfico del río Cauca, Colombia. *Revista De Teledetección*. 50, 89 - 99. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7715>.

- Vicente-Serrano, S.M., Azorín-Molina, C., Sánchez-Lorenzo, A., Revuelto, J., López-Moreno, J.I., González-Hidalgo, J.C., Moran-Tejada, E. and Espejo, F. (2014). Reference evapotranspiration variability and trends in Spain, 1961–2011. *Global and Planetary Change*. 121, 26 – 40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.06.005>.
- Xu, C. Y. and Singh, V. P. (2001). Evaluation and generalization of temperature-based equations for calculating evaporation. *Hydrological Processes*.15, 305 – 319.
- Yao, M.H., Li, M.H., Juan, J.Y., Hsia Y.J., Lee P.H. and Shen Y. (2017). Mapping reference evapotranspiration from meteorological satellite data and applications. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*. 28, 501-515. 10.3319/TAO.2016.11.15

5 INICIO DE LA ESTACIÓN DE CRECIMIENTO DEL ARROZ EN EL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA

Jesica Natalia Valencia González ¹; Ramón Arteaga Ramírez ^{1*}; Mario Alberto Vázquez Peña¹; Abel Quevedo Nolasco²

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua Universidad Autónoma Chapingo. (UACH). Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Código postal. 56230. Estado de México.

²Colegio de Posgraduados (COLPOS) Km. 36.5, México 136 5, Montecillo Código postal. 56230. Texcoco, Estado de México.

Autor para correspondencia: rarteagar@taurus.chapingo.mx

5.1 Resumen

El objetivo de este estudio fue definir y analizar el inicio de lluvias, el inicio de la estación de crecimiento y la duración de la estación de crecimiento del arroz en el Valle del Cauca, Colombia. Para definir la época con menor riesgo para la siembra, se usaron tres criterios: a) lluvia acumulada por cinco días supere los 20 mm, b) lluvia acumulada por cinco días supere los 20 mm; aceptando al menos 3 días de sequía y c) el total de cinco días de lluvia supera la mitad de la evapotranspiración de referencia. Con el uso de la distribución Normal estándar inversa el inicio de la estación de crecimiento (IEC) presentó que la fecha más probable de siembra se da al 80% de probabilidad de no excedencia para ambas secciones del año; ya que a este nivel de probabilidad, el inicio de la estación de crecimiento acontecerá en cuatro de cada cinco años; también se representaron los resultados de los diferentes niveles de probabilidad del inicio de la estación de crecimiento por criterios en mapas; que permitieron observar que la estación independencia es la ubicación más representativa de la zona de estudio. El inicio de la temporada lluviosa (ILL) se establece después del inicio de la estación de crecimiento a un 80% de probabilidad de no excedencia. Respecto a la duración

del ciclo del cultivo es de mínimo 121 y 114 días para la primera y segunda sección del año respectivamente. Con base al balance hídrico gráfico se estimó la duración del déficit de lluvias (DDLLL) que permitió identificar; que la estación Ing. Miranda tiene 66 días de sequías e independencia es la menor días; entre una estación de crecimiento y otra.

Palabras claves: Estación de crecimiento, balance hídrico gráfico, inicio de la temporada lluviosa, duración de la estación de crecimiento, duración del déficit de lluvias.

5.2 Introducción

La disponibilidad de agua durante el desarrollo de un cultivo es fundamental para el óptimo desarrollo y crecimiento de las plantas, las precipitaciones son un factor altamente crítico; ya que, dependiendo de éste la planta puede manifestar excesos o déficit hídrico (Chaudhary, Nanda y Tran, 2003). Para la agricultura se ha convertido en una cuestión importante el registro de los variables climáticas; ya que la información contenida en esta, e integrada a diversas prácticas, permite identificar características específicas de cada lugar de producción (Delerce et al., 2016).

Según explican Degiovanni, Martínez y Motta (2010), se ha creído erradamente, que las regiones tropicales arroceras tienen los escenarios ambientales propicias para producir arroz, de manera continua y competitiva, durante casi todo el año. Por culpa de este dogma, en el sur del Valle del Cauca, Colombia no se da la atención necesaria a la fecha de siembra; ya que la mayoría de los cultivos de arroz del trópico se siembran según las prácticas o los períodos de lluvias, y rara vez se planean de registros técnicos. Sin embargo, Castilla et al. (2010), informan que las prácticas agrícolas como las fechas de siembra; no se llevan siempre acabo con la climatología de la región.

Para los cultivos perennes, el inicio de la estación de crecimiento comienza cuando el suelo que asedia la raíz está lo suficientemente húmedo y caliente. De acuerdo con Villalba, Jarma y Combatt (2017), indican que las plantas bianuales requieren de dos estaciones de crecimiento para lograr de manera exitosa sus procesos fisiológicos; ya que no es posible mantener un ambiente constante para la producción, pues este cereal necesita de combinaciones distintas de calor y humedad. Se ha identificado que los más altos rendimientos de producción se obtienen cuando los cultivos, se han establecido de manera oportuna (Sivakumar, 1988), en Filipinas el calendario de siembra se ajusta a menudo, para que coincida con el período de alta probabilidad de recibir lluvias adecuadas; para apoyar las necesidades de crecimiento del arroz (Lansigan, De los Santos y Coladilla, 2000). Bajo condiciones similares, el uso de datos diarios de precipitación en Nigeria; permitió precisar la estación de crecimiento en una pentada; donde esta posee hasta el 8% del total de la precipitación anual y la estación de crecimiento finaliza en la pentada donde se alcanza el 90% del total de lluvia acumulada (Odekunle, 2004). Otro ejemplo útil exhibido por Arteaga, Vásquez, Coras y Ángeles (2006), determinaron los componentes de la estación de crecimiento por disponibilidad de humedad para Chapingo, México mediante el balance hídrico gráfico propuesto por la FAO (1987); empleando datos agrupados de 5 días.

La necesidad de establecer una fecha oportuna de siembra implica determinar otros componentes como el inicio de la temporada lluviosa y la duración de la estación de crecimiento; para realizar una oportuna planificación de las actividades agrícolas. Por ende, el objetivo de este capítulo fue definir y analizar el inicio de lluvias, el inicio de la estación de crecimiento y la duración de la estación de crecimiento del arroz en el Valle del Cauca, Colombia.

5.3 Materiales y métodos

5.3.1 Localización de la zona de estudio

La ubicación arrocerera al sur del Valle del Cauca se extiende aproximadamente entre los 3°5'0" a los 3°20'0" de latitud Norte y entre los 76°10'0" y 76°50'0" de longitud Oeste (Figura. 5.1).

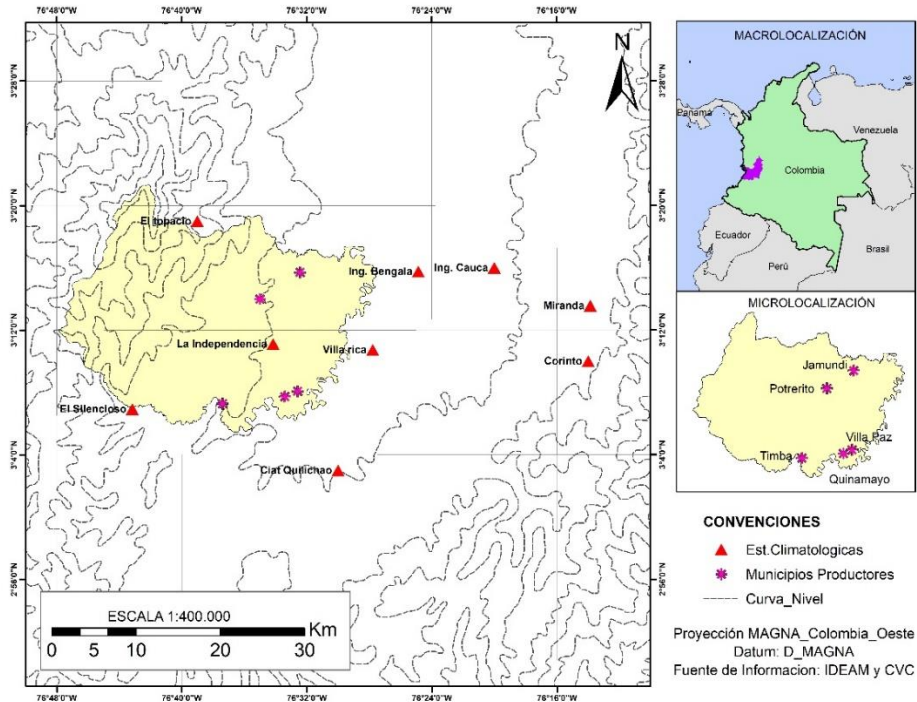


Figura 5.1. Ubicación de la zona de estudio

5.3.2 Información climatológica

Se emplearon los datos diarios de precipitación (mm) para estimar el inicio de la estación de crecimiento desde 1969 hasta 2018 de nueve estaciones climatológicas. Para estimar el inicio de la temporada lluviosa, se emplearon datos diarios de precipitación, temperatura, humedad relativa y brillo solar desde 1989 hasta el 2016 de cinco estaciones que poseen la información completa.

5.3.3 Evapotranspiración de referencia (ET_o)

Se calculó por el método de Penman-Montheith (Allen, Pereira, Raes y Smith, 2006; 25 p) a partir de los datos diarios de la temperatura máxima y mínima, humedad relativa y brillo solar para el periodo de 1989 al 2016; de cinco

estaciones que tienen información para obtener la ETo (Cuadro 5.1, estaciones COD:1,2,3,4 y 5).

Cuadro 5.1. Coordenadas geográficas de las estaciones usadas.

COD	Estación	Altitud (msnm)	Latitud (N)	Longitud (W)
1	Ciat Quilichao	977	03°03´	76°30´
2	Ingenio Bengala	1000	03°15´	76°24´
3	Ingenio Cauca	1000	03°14´	76°13´
4	La Independencia	963	03°11´8"	76°34´9"
5	Ingenio Miranda	1128	03°16´	76°20´
6	El topacio	1676	03°19´	76°39´
7	El silencioso	1151	03°06´	76°43´
8	Villa Rica	1000	03°10´	76°28´
9	Corinto	1100	03°10´	76°14´

5.3.4 Criterios del inicio de la estación de crecimiento (IEC)

Se utilizó un registro histórico de 50 años de información diaria de precipitación de nueve estaciones para establecer el IEC. Esta información fue introducida al programa Instat v+3.37; a través de la sección de herramientas climáticas para la agricultura, con la información adecuada de la capacidad almacenable del suelo (CAS = 100 mm) (Raes, Sithole, Makarau and Milford, 2004). Los criterios usados son:

Primer: El primer día (*en la zona y los meses correspondientes a Febrero y Agosto*) en que la lluvia acumulada por cinco días consecutivos supere los 20 mm (Sivakumar, 1988).

Segundo: El primer día (*en la zona en los meses correspondientes a Febrero y Agosto*) en que la lluvia acumulada por cinco días supere los 20 mm; aceptando al menos 3 días de sequía (Stern, Dennett and Dale, 1982).

Tercer: la primera vez después del 1 de Febrero y 1 agosto donde el total de 5 días de lluvia supera la mitad de la evapotranspiración de referencia (ETo) (Sivakumar, 1988).

5.3.5 Procedimiento probabilístico del inicio de la estación de crecimiento (IEC)

Para identificar el día del año en que se da el inicio de la estación de crecimiento (IEC) para los niveles de probabilidad de no excedencia del 20,40,60 y 80%, se aplica la *distribución Normal estándar inversa* y se obtiene el valor de Z que corresponde a cada una de las probabilidades mencionadas previamente. De la ecuación de Z (Infante y Zarate de Lara, 2001), se despeja el valor de X_i que es el valor (en día Juliano) del inicio de la estación de crecimiento.

$$Z = \frac{x_i - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \quad (5.1)$$

$\hat{\mu}$: media de días Julianos en los que ha iniciado la estación de crecimiento para los años de los que se disponen datos en las estacione

$\hat{\sigma}$: desviación estándar

$$X_i = \hat{\mu} + Z * \hat{\sigma} \quad (5.2)$$

Las probabilidades de Z y el cálculo del X_i se abordaron en el programa Excel 2018.

Mapas de distribución espacial IEC

Se generaron mapas de distribución espacial de acuerdo con los valores de probabilidad obtenidos en los diferentes niveles ya enunciados, para los tres criterios empleados en el IEC en el programa ArcGIS 10.2; haciendo uso de la técnica de interpolación Kriging.

5.3.6 Balance hídrico gráfico para estimar el inicio de la temporada lluviosa (ILL) y la duración de la estación de crecimiento (DEC)

Los registros diarios de lluvia se utilizaron para elaborar un balance de agua gráfico para cada uno de los años de cada estación (Figura 5.2), donde se apreciaron los valores mensuales de precipitación (PP), evapotranspiración de

referencia (E_{To}) y 0.5 de la E_{To} en función del tiempo; la intercepción de ellos define épocas relacionadas con las actividades agrícolas, como: el inicio de la temporada lluviosa, la fecha de siembra, y la duración de la estación de crecimiento (Cochemé y Franquin, 1967). Siendo así, se determinó el ILL como todos aquellos puntos de intercepción “b” y la DEC como la diferencia de los puntos “d-a”; se obtuvieron fechas en días julianos y la cantidad de días respectivamente; para las dos secciones de cada año (Sivakumar, 1988). A ambos procedimientos se les realizó un análisis probabilístico al 20, 40 60 y 80%; pero al ILL se le determinó probabilidad de no excedencia y a la DEC probabilidad de excedencia.

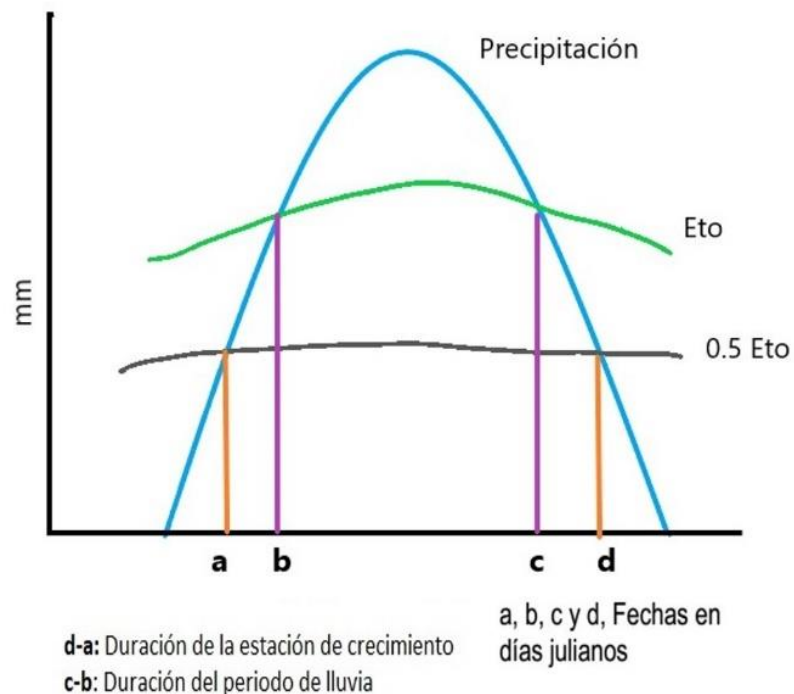


Figura 5.2. Balance hídrico gráfico, adaptada de Arteaga et al., (2006)

Cantidad de días lluviosos y Precipitación(mm)

Se realizó una regresión lineal entre dichos datos; con los valores acumulados de seis meses (enero a junio y julio a diciembre) en ambas secciones del año; por todo el periodo de estudio de las cinco estaciones que establecerán la DEC; con el propósito de conocer la oferta hídrica entre la cantidad de días julianos lluviosos por estación y por época de crecimiento.

Duración del déficit de lluvia (DDL)

Para conocer la DDL entre Junio y Agosto se restó el punto "a" de la segunda estación de crecimiento y el punto "d" de la primera sección de un mismo año y para conocer la DDL entre los meses de Diciembre y Febrero, se resta el punto "a" de la primera estación de crecimiento del año 2 y el punto "d" de la segunda estación de crecimiento del año 1; ambos procedimientos para las cinco estaciones empleadas para la DEC. Se le calcularon las estadísticas básicas como: la desviación estándar, la media y la varianza; y se realizó un análisis probabilístico al 20, 40, 60 y 80% de probabilidad de excedencia con la distribución normal estándar inversa.

5.4 Resultados y discusión

5.4.1 Establecimiento del Inicio de la estación de crecimiento (IEC)

En este trabajo se ha clasificado los niveles de probabilidad de no excedencia, como: 20% probabilidad fecha temprana, 40 y 60% fechas promedio y al 80% fechas tardías (Ruíz et al., 2012). Los criterios usados para obtener las fechas de IEC obtenidas para cada estación ofrecen una idea viable de las fechas de siembra con cierta probabilidad; es decir, misma probabilidad del IEC. Para la primera sección del año al 20% de probabilidad de no excedencia, el criterio uno presenta una variación entre estaciones de un día, para el segundo criterio, una variación de cinco días y para el último de 2 días; lo que indica que el inicio de la estación de crecimiento temprano se establece al mismo tiempo en toda la zona. La diferencia entre criterios para una misma estación a dicha probabilidad puede ser de uno a dos días. En cuanto al 80% de probabilidad de no excedencia se identifica, que el criterio número uno varía entre estaciones nueve días, el segundo doce y el tercero cinco. Asimismo, existe una variación entre los criterios para una misma estación de hasta doce días (Cuadro 5.2). En tal sentido, para el 20% de probabilidad uno de cada cinco años se establecerá en esa fecha o

antes; y al 80% de probabilidad de no excedencia indica que en cuatros de cada cinco años el IEC se establecerá en esa fecha o antes, puesto que este nivel de probabilidad se elimina la posibilidad de un falso comienzo de la temporada de crecimiento (Mupangwa, Walker and Twomlow, 2011).

Cuadro 5.2. Días julianos (Dj) del inicio de la estación de crecimiento para las diferentes probabilidades de no excedencia de la primera sección del año

ESTACIÓN	20%			40%			60%			80%		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
CIAT QUILICHAO	31	32	30	35	37	34	38	41	37	42	45	40
EL TOPACIO	30	32	30	34	36	33	37	39	36	41	43	38
CORINTO	30	29	31	36	38	35	42	46	39	48	55	43
ING. BENGALA	30	28	32	36	37	36	42	45	40	48	54	44
ING.CAUCA	30	30	31	36	37	35	42	42	38	49	49	42
INDEPENDENCIA	31	30	30	35	36	33	39	41	36	44	47	39
ING.MIRANDA	30	30	31	36	37	34	41	43	37	47	51	41
EL SILENCIOSO	31	32	30	35	37	33	38	41	36	42	45	39
VILLA RICA	31	33	31	34	37	34	37	41	36	40	45	39

Respecto a la segunda sección del año, el 20% de probabilidad de no excedencia para el criterio uno varía entre estaciones doce días, el segundo en 19 días y el tercer en ocho días; pero la diferencia entre criterios para una misma estación varía de dos a veinte días. En cambio, al 80% el primer criterio varía en veinticinco días, el segundo en veintitrés días y el tercer criterio en veintidós días; sin embargo, la diferencia entre criterios para una misma estación puede ser de cinco a veintisiete días; excepto la estación Ing. Bengala que presenta diferencias de hasta 36 días (Cuadro 5.3). Moeletsi and Walker (2012) enfatizan que no es ideal establecer las siembras al 20% de probabilidad de no excedencia; ya que es posible que los cultivos no tengan suficiente agua en el suelo para sostenerse durante las primeras etapas del crecimiento vegetativo; en cambio el nivel de probabilidad del 80% se asocia con un bajo riesgo de fracaso de los cultivos durante las primeras etapas de crecimiento y desarrollo.

Cuadro 5.3. Días julianos (Dj) del inicio de la estación de crecimiento para las diferentes probabilidades de no excedencia de la segunda sección del año.

ESTACIÓN	20%			40%			60%			80%		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
CIAT QUILICHAO	219	226	214	231	240	223	241	252	230	253	265	239
EL TOPACIO	216	221	214	225	232	221	232	241	228	241	252	235
CORINTO	226	238	222	238	250	233	248	261	243	259	273	254
ING. BENGALA	223	236	216	236	247	222	246	257	226	258	268	232
ING.CAUCA	224	235	216	238	248	226	250	259	235	264	272	245
INDEPENDENCIA	218	224	214	228	236	221	237	246	228	247	258	236
ING.MIRANDA	228	237	218	241	250	229	252	260	239	266	273	250
EL SILENCIOSO	217	221	215	224	231	221	231	240	227	238	250	233
VILLA RICA	220	230	217	231	242	226	240	252	233	251	264	242

Con los resultados obtenidos por criterio se puede determinar la época de siembra de cada estación; así mismo el tiempo de ocurrencia entre una fecha de siembra al 80% de probabilidad respecto a una del 20% de probabilidad de no excedencia; es decir si se decide sembrar bajo el primer criterio al 80% de probabilidad de no excedencia este acontecerá hasta 19 y 38 días después de haber sembrado al 20% de probabilidad; para la primera y segunda sección del año. El segundo criterio acontecerá 26 y 39 días después de haber sembrado al 20% para la primera y segunda sección del año y el tercer criterio acontecerá 12 y 33 días después la primera y segunda temporada del año (Cuadro 5.2 y 5.3).

Otra característica apreciable es que los valores obtenidos en los diferentes niveles de probabilidad de no excedencia para el IEC del criterio tres son días julianos más tempranos que los del uno, los del criterio uno son fechas intermedias y los del criterio dos fechas un poco más tardías (Ver anexos). El primer criterio proporciona un inicio de la temporada lluviosa de la zona, exhibiendo su oferta a través del balance hídrico gráfico. Se pensaría que el intervalo de fechas que promete mayores expectativas de éxito en el establecimiento del cultivo es la que deriva del criterio número dos; ya que, este considera un mínimo acumulado de 20 mm de lluvia en al menos dos días y esto

expondría al productor a sembrar bajo unas intensas precipitaciones con cortos periodos de sequía de 3 días, sin que fracase el cultivo. El tercer criterio no sería suficiente para garantizar el IEC, el éxito de este depende de un periodo húmedo; que no someta la plantación a estrés durante su desarrollo. Dicho por Tsimba, Edmeadesb, Millnerc and Kemp (2013), las fechas de siembra proporcionan diferentes condiciones de crecimiento, como la temperatura, la precipitación o los niveles de radiación solar durante todo el ciclo del cultivo; como por ejemplo: en Ludhiana, India, ha sido muy favorable sembrar en fechas tardías, pues la temperatura máxima ha servido de complemento para identificar los escenarios que ofertan cada estación, y las zonas potenciales productoras de arroz; proporcionando altos rendimiento (Pal, Mahajan, Sardana and Chauhan, 2017).

5.4.2 Identificación del Inicio de la temporada lluviosa (ILL)

La temporada de lluvias se ha identificado como el primer día de enero o febrero (*primera sección del año*) y de agosto o septiembre (*segunda sección del año*) donde la cantidad de lluvia es igual o excede a la ETo. El ILL debe estar determinado en aquellos días julianos donde acontezca dicho evento; por ello, a un 80% de probabilidad de no excedencia acontecerá el inicio de la temporada lluviosa; para ambas secciones del año. Es evidente que, aunque las estaciones no superan los 50 km de diferencia horizontal, unas exhiben el evento lluvioso días más tempranos que otras al mismo nivel de probabilidad (Cuadro 5.4 y 5.5). Estos valores son discutibles, ya que al 80% de probabilidad de no excedencia, existe una brecha de 39 y 34 días entre las estaciones, para la primera y segunda temporada de crecimiento respectivamente; esto indica que las áreas donde se hallan las estaciones poseen diferente oferta climática, estableciendo la duración del cultivo de forma diferente. Al contrastar la información del cuadro 5.4 y 5.2 se puede enunciar la estación que presenta menos días entre el IEC y el ILL a un 80% de probabilidad de no excedencia es Ing. Cauca, seguido por independencia, Ing. Miranda, Ciat Quilichao e Ing. Bengala para la primera sección del año y para la segunda sección del año se identifica que es desde la estación Ing. Miranda, Independencia, Ciat Quilichao, Ing. Cauca e Ing. Bengala

(Cuadros 5.3 y 5.5); permitiendo observar que a este nivel de probabilidad, la estación Ing. Bengala se exhibe como la estación con más días de diferencia entre el IEC y el ILL, 38 y 53 días para la primera y segunda época de siembra respectivamente; dichas diferencias indican que durante este tiempo se pueden presentar escenarios desfavorables para el cultivo, por lo que se tiene que tener medidas para evitar el daño a la siembra por falta de humedad edáfica; ya que el establecimiento de las lluvias a este nivel de probabilidad debe evitar la pérdida o disminuciones en la densidad de plantas sembradas (Ahmed, Humphreys, Salim y Chauhan, 2014).

Otra característica que resalta de los resultados obtenidos para las relaciones de los cuadros 5.4 y 5.2, 5.5 y 5.3, es que los valores obtenidos del IEC del criterio dos y el ILL al 80% de probabilidad de no excedencia; al relacionarlos se identifica que la duración entre estos eventos es menor que en los criterios uno y tres; en ambas épocas de siembra, criterio que indicaría una fecha ideal para la siembra ya que recibiría la lluvia de manera oportuna.

Sin embargo, las fechas al 20% de probabilidad de no excedencia, deben ser consideradas en la planeación de la siembra; pues estas indican que el establecimiento de las lluvias tempranas ocurre 1 de cada 5 años, para este estudio se identifica que a este nivel de probabilidad hay una diferencia del ILL entre la estación Independencia y Ciat Quilichao de hasta 5 días para la primera temporada del año y entre independencia y Ing. Bengala de 36 días para la segunda época de siembra; revelando que la estación independencia establecerá su cultivo de forma exitosa y más temprana que las demás estaciones.

Cuadro 5.4. Días julianos del Inicio de la temporada Lluviosa (ILL) de la primera sección del año, para los diferentes niveles de probabilidad

Estación	20%	40%	60%	80%
CIAT QUILICHAO	25	39	51	66
ING. BENGALA	25	46	65	87
ING. CAUCA	24	32	40	48
ING. MIRANDA	23	34	44	56
INDEPENDENCIA	19	31	40	52

Cuadro 5.5. Días julianos del Inicio de la temporada Lluviosa (ILL) de la segunda sección del año, para los diferentes niveles de probabilidad.

Estación	20%	40%	60%	80%
CIAT QUILICHAO	247	259	270	282
ING. BENGALA	269	282	293	306
ING. CAUCA	256	270	282	296
ING. MIRANDA	242	256	268	282
INDEPENDENCIA	233	247	258	272

Las dos épocas de lluvias se distinguen no solo por la necesidad de cultivar arroz; sin desatender la importancia de la frecuencia de las precipitaciones en el transcurso del año ya que en los trópicos están regidas en su mayoría por el movimiento de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) y la profundidad crítica del aire caliente y húmedo requerido para que un lugar experimente lluvias con regularidad >1000 mm (Mugalavia, Kipkorir, Raes y Rao, 2008). De este modo, se encontró de la regresión lineal elaborada; que en ambas épocas ofertan la precipitación necesaria y adecuada para establecer los cultivos más propicios y nativos de la zona; ya que en ambas agrupaciones de seis meses exhiben precipitaciones mayores a 900mm en más de 90 días; pero en la segunda época del año las precipitaciones pueden ser similares a las del primer periodo; pero con una cantidad inferior en días; dicha correspondencia se corrobora con valores del coeficiente de determinación (Cuadro 5.6); por lo que se podría pensar que a mayor precipitación semestral o altos valores de precipitación acumulada, esta condición puede proporcionar un IEC anticipado o una DEC reducido.

Cuadro 5.6. Coeficiente de determinación (R^2) entre la cantidad de días lluviosos y la precipitación en ambas épocas del año por el periodo de 1989 – 2016.

Estación	R^2 1 Época	R^2 2 Época
CIAT QUILICHAO	0.5534	0.4087
ING. BENGALA	0.4475	0.2819
ING. MIRANDA	0.582	0.5989
ING. CAUCA	0.6204	0.7375
INDEPENDENCIA	0.2546	0.165

5.4.3 Duración de la estación de crecimiento (DEC)

La variación de la DEC se centra en que la variedad FEDEARROZ 50 debe cumplir de 115 a 130 días de ciclo, en el primer periodo del año las estaciones Ing. Bengala, Ing. Miranda e Ing. Cauca poseen un conjunto de datos menos amplio respecto a las estaciones Ciat Quilichao e Independencia, en cambio; en la segunda sección del año todas las estaciones presentan diversa información (Figuras 5.3 y 5.4). Estos resultados demuestran que para la primera época del año se obtuvieron rangos de DEC de 115 a 152 días y en la segunda época desde 102 a 144 días, esto permite deducir que es muy variable la condición de humedad en el suelo; para el cultivo de arroz en esta zona de estudio año con año, pues los periodos pocos lluviosos extienden la duración del ciclo del cultivo (Cristo, González, Cárdenas y Cabrera, 2006). La variación de la DEC promedio en días fue de 129 y 126 para la estación Ing. Miranda e Independencia, de 131 y 125 para las estaciones Ciat Quilichao e Ing. Cauca y de 129 para la estación Ing. Bengala; dichos resultados no superan los 10 días en promedio de diferencia en la DEC de alguna de las dos épocas del año. Por mencionar un ejemplo, el estudio hecho por Odekunle (2004) en Nigeria, donde la DEC vario de 60 a 150 días; y cuya distribución de lluvias en las cinco estaciones respectivas fueron inadecuadas para la germinación, el establecimiento y el pleno desarrollo de los cultivos; de hecho, un estudio más reciente realizado por Qiu et al. (2019), informan que los diferentes cultivares de arroz en China pueden variar de 138 a 161 días de duración de ciclo. Para interés de este estudio; la estación independencia es la ubicación que exhibió menor DEC en ambos periodos y esto se corrobora con la información utilizada para realizar la regresión lineal; de la cual se identificó que esta es la estación que posee mayor precipitación en más días lluviosos que el resto de las estaciones (Cuadro 5.7, 5.8 y anexos).

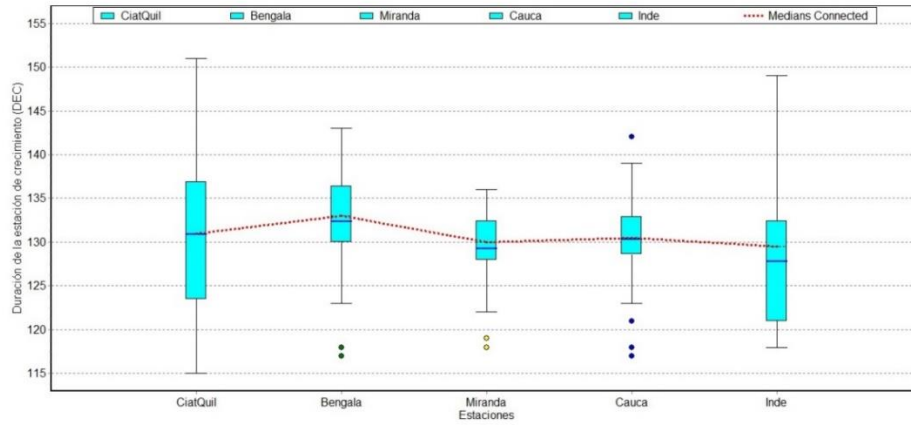


Figura 5.3. Variación de la DEC para la primera época del año

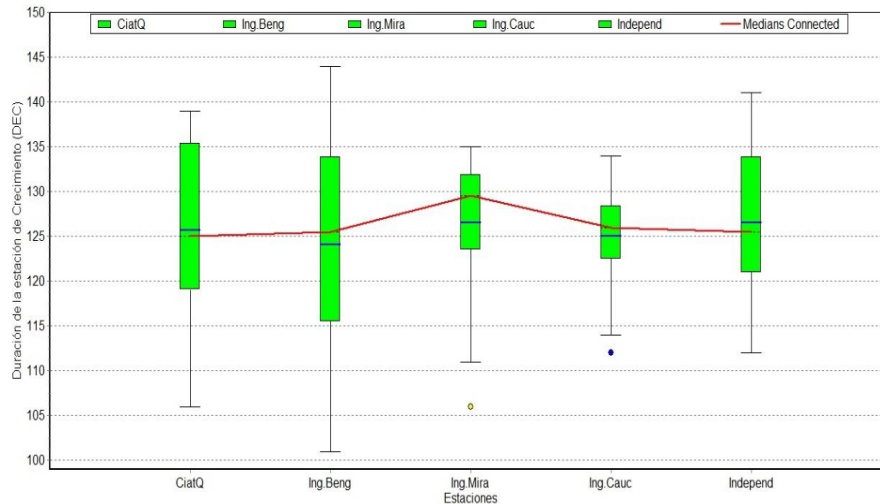


Figura 5.4. Variación de la DEC para la Segunda época del año.

La cantidad de días que dure el ciclo del cultivo de arroz depende de la disponibilidad de los elementos climáticos; una evidencia se muestra en la Figura 5.5, en la cual se exhibe que el año 2016 en la estación Ing. Bengala, fue un año lo suficientemente húmedo como para establecer dos periodos de siembra para el arroz; alcanzando 763 y 825 mm de lluvia, en 44 y 40 días lluviosos (un día lluvioso > 1mm) para la primera y segunda sección del año individualmente; no obstante, la duración de la estación de crecimiento es mayor, ya que la precipitación es > ETo. Es notorio la presencia del déficit de lluvia a mitad de año,

este a la larga es necesario y beneficioso; ya que, permite implementar técnicas de labranza, dar una idónea preparación al terreno y establecer un próximo plan de siembra que no se conduzca al fracaso, y así; reanudar la plantación de la segunda época del año.

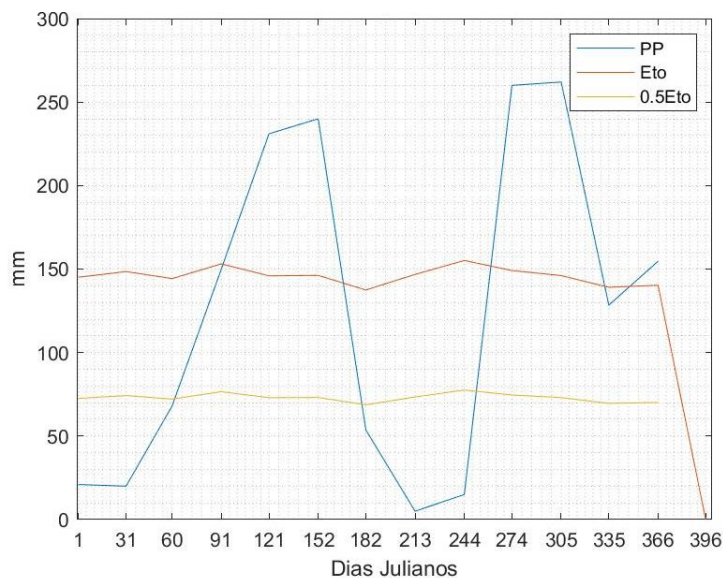


Figura 5.5. Balance hídrico gráfico de la estación Ing. Bengala, año 2016.

La DEC se presenta a diferentes niveles de probabilidad de excedencia, de las cuales se identifica variación de hasta 7 días en ambas secciones del año; dentro de cada nivel. Es notorio que a medida que disminuye la probabilidad, los valores de DEC aumentan; indicando que estas cantidades son menos frecuentes de que ocurran (Cuadro 5.7 y 5.8). Por ende, los valores reportados al 80% de probabilidad de excedencia en las cinco estaciones son los valores más usuales de que acontezcan; ya que en cuatro de cada cinco años se presentará ese valor de DEC; para la primera sección del año en la mayoría de las estaciones cumplen con la duración de 115 días de la variedad de arroz, pero en la segunda sección del año la estación Ing. Bengala no cumple por un día con el límite inferior que requiere el cultivo (115 días). Pero teniendo en cuenta la interpretación de la probabilidad se salva esta limitante. La variedad Fedearroz 50 se ha caracterizado por ser una semilla precoz; dado que esta puede durar los 115 o 130 días de ciclo del cultivo (Degiovanni, Gómez y Sierra, 2004); esto se ha evidenciado gracias a que en Colombia existe una distribución bimodal de lluvias,

lo que permite que exista la plantación de arroz dos veces al año. Es notorio que los valores máximos en la primera sección del año los exhibió la estación Ing. Bengala y en la segunda época del año, la estación Ing. Miranda; esto indica que las localidades de esas estaciones tienen las mejores oportunidades para el desarrollo óptimo del cultivo; puesto que la precipitación anual está por encima de 1900mm en más de 170 días lluviosos; para ambas estaciones. El resto de las estaciones se recalcaría la importancia de conocer el agua disponible por precipitación (*puntos b y c*) o generar una alternativa de riego que se pueda requerir en un futuro para alguna sección del año.

Cuadro 5.7. Duración de la estación de crecimiento (DEC) en días de la primera sección del año, para los diferentes niveles de probabilidad de excedencia.

Estación	20%	40%	60%	80%
CIAT QUILICHAO	138	133	129	123
ING. BENGALA	138	134	131	127
ING. CAUCA	133	130	128	125
ING. MIRANDA	135	132	129	126
INDEPENDENCIA	134	130	126	121

Cuadro 5.8. Duración de la estación de crecimiento (DEC) en días del mes de la segunda sección del año, para los diferentes niveles de probabilidad de excedencia.

Estación	20%	40%	60%	80%
CIAT QUILICHAO	134	128	123	118
ING. BENGALA	134	127	121	114
ING. CAUCA	133	128	125	120
ING. MIRANDA	129	126	124	121
INDEPENDENCIA	134	129	124	119

Consistente a todo lo anterior, se ha identificado una divulgación por Caicedo (2008), quien explica que, en el corregimiento de Zacarías, Buenaventura-Valle del cauca esta variedad ha cumplido su ciclo entre 115 a 130 días; pero también

se ha extendido hasta 132 días después de la germinación. La DEC en países tropicales como Filipinas se reduce hasta 100 días (Bouman, Peng, Castañeda and Visperas, 2005), hasta más de 140 días en la Ciudad de palmira, Valle del Cauca Colombia (CIAT, 1985), y como es el caso del Plan de riego Besut en Terengganu, Malasia; donde se desarrolla el ciclo del cultivo a 155 y 157 días por la escasez de lluvia (Lee, Aminul and Najim, 2005). En último lugar, se identifica el hallazgo de varios documentos que informan las épocas de siembra que son equivalentes a los periodos y a la DEC que se han enunciado en el alcance de este trabajo (Cuadro 5.9).

Cuadro 5.9. Periodos de crecimiento de diferentes regiones para el cultivo de arroz

Periodo de la EC	DEC (Días)	Ubicación	Fuente
Julio - Diciembre	± 120	Montería, Colombia	Degiovanni et al. (2004)
Julio - Diciembre	± 135	New Delhi, India	Choudhury et al. (2007)
Febrero - Junio	± 125	Belterra, Brasil	Sakai et al. (2010)
Enero -Mayo	± 120	Laguna, Filipinas	Alberto et al. (2014)
Enero -Mayo	± 130	Omusati, Namibia	Suzuki et al. (2014)
Marzo - Junio	± 122	Llanos Orientales, Colombia	Coy y Castillo (2015)

DEC: Duración de la estación de crecimiento

EC: Estación de crecimiento

Duración del déficit de lluvia (DDLL)

La reducción consistente de días lluviosos se aprecia al 80% de probabilidad de excedencia, cuyas duraciones serán las que acontezcan en cuatro de cinco años; aceptando hasta nueve días de diferencia entre la estación Ing. Bengala e Ing. Miranda; no obstante, este nivel de probabilidad indica que en la región se cuenta con alrededor de dos meses en todas las estaciones, tiempo suficiente para poder llevar una planificación adecuada de la segunda temporada de cultivo en un mismo año (Cuadro 5.10). A nivel del conjunto de datos obtenidos para cada estación, se halló que existe una variación de veinticinco días carentes de lluvia para las estaciones Ing. Bengala y Ciat Quilichao, veintiún para Ing. Miranda, diecinueve para Ing. Cauca y dieciséis para independencia; lo que indica

diferentes umbrales de déficit de lluvia para cada estación (cuadro 5.10); dejando en certeza que la estación independencia se ha manifestado como la ubicación con mayor oferta hídrica para el arroz. Un estudio similar a este realizado en Etiopia por Bekele, Alamirew, Kebede, Zeleke and Melese (2017), informan que entre los meses de junio a agosto; existe un descenso de lluvias que genera más de 15 días de sequía en 12 estaciones de estudio; afectando el fin de la estación de crecimiento de la primera sección del año y el inicio del segundo periodo de siembra.

Cuadro 5.10. Diferentes niveles de probabilidad de excedencia para la duración del déficit de lluvia (DDLL) entre las estaciones de crecimiento de Junio y Agosto.

ESTACIÓN	σ	20%	40%	60%	80%
CIAT QUILICHAO	26	103	88	75	60
ING. BENGALA	25	101	86	73	58
ING. CAUCA	19	93	82	73	62
ING. MIRANDA	21	102	89	79	66
INDEPENDENCIA	16	84	74	66	57

σ desviación estándar de una muestra

Sin embargo, cuando se evalúa la DDLL entre las estaciones de crecimiento de diciembre y febrero, se identifica que este periodo es más corto; excepto para la estación Independencia que presentó 23 días de sequía (Cuadro 5.11). La duración de esta sección presenta variaciones de 16 días secos para Ciat Quilichao, 18 para Ing. Bengala e Ing. Cauca, 19 para Ing. Miranda; siendo estas variaciones muy similares entre sí, excepto los 21 días secos que exhibió Independencia; lo que indica que en la zona de estudio el periodo de lluvias acontece más pronto entre Diciembre y Febrero en comparación del intervalo entre los meses de Junio y Agosto.

Cuadro 5.11. Diferentes niveles de probabilidad de excedencia para la duración del déficit de lluvia (DDLL) entre las estaciones de crecimiento de Diciembre y febrero

ESTACIÓN	σ	20%	40%	60%	80%
CIAT QUILICHAO	16	36	26	18	9
ING. BENGALA	18	40	30	21	11
ING. CAUCA	18	47	37	28	17
ING. MIRANDA	19	43	31	21	10
INDEPENDENCIA	21	58	46	36	23

σ desviación estándar de una muestra

La pérdida por falta de agua para sostener un cultivo se puede minimizar con prácticas agronómicas tempranas. Por ende, los resultados y las evidencias expuestas proporcionan soporte concluyente para inferir en que el IEC acontecerá antes del inicio de la temporada lluviosa; permitiéndosele al cultivo establecerse para obtener una cantidad considerada de precipitación para el desarrollo efectivo del cultivo. Adicionalmente, los mapas de distribución espacial exhibieron continuamente un dominio en el IEC en la estación independencia; lo que indica que al presentar mayor precipitación en todo el año; con al menos 57 días de déficit hídrico a mitad de año y 23 días secos entre las estaciones de crecimiento de Diciembre y Febrero, se puede catalogar como la estación más representativa del área de estudio.

5.5 Conclusiones

El inicio de la estación de crecimiento (IEC) acontece al 80% de probabilidad de no excedencia para ambas secciones del año. Los tres criterios empleados dependen de la precipitación acumulada que oferte la zona de estudio; sin embargo, el criterio dos es el que presentó días julianos más cercanos a inicio de la época lluviosa; esto indica que es una fecha ideal para la siembra puesto que recibiría la lluvia de forma oportuna.

Los datos mensuales han servido como indicadores generales de las estaciones climatológicas utilizadas, para estimar el inicio de la temporada lluviosa y la

duración de la estación de crecimiento mediante el balance hídrico gráfico; puesto que la intercepción de los puntos a, b, c y d, permiten apreciar de mejor manera la oferta hídrica para ambas secciones del año. Así mismo, la duración del déficit de lluvia permite identificar que el área de estudio cuenta con alrededor de dos meses para realizar la planificación entre las épocas de siembra de un Junio y Agosto; y de hasta 23 días entre las épocas de Diciembre y Febrero.

Finalmente será recomendable para la zona de estudio no depender solo de la precipitación, si no; implementar alguna estrategia de riego, práctica de labranza o incorporación de la materia orgánica en el suelo; para que este aumente la capacidad de almacenamiento de agua, ya que el final de la estación de crecimiento se ve influenciado por el nivel de agua en el suelo.

5.6 Literatura citada

- Ahmed, S., Humphreys, E., Salim, M. y Chauhan, B.S. (2014). Optimizing sowing management for short duration dry seeded aman rice on the High Ganges River Floodplain of Bangladesh. *Field Crops Research*. 169, 77- 88. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.09.009>.
- Alberto, M.C.R., Quilty, J.R., Buresh, R.J., Wassmann, R., Haidar, S., Correa, T.Q., and Sandro, J.M. (2014). Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler irrigation. *Agricultural Water Management*. 136, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.005>.
- Allen, R. G., Pereira L. S., Raes D. y Smith M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. N°56 Ed. FAO. Italia, Roma. 25 p.
- Arteaga-Ramírez R., Vázquez-Peña M. A., Coras-Merino P. M. y Angeles-Montiel V. (2006). Componentes de la estación de crecimiento, variación temporal y espacial en Chapingo, México. *Ingeniería hidráulica en México*. 21 (2): 57 - 68.

- Bekele, D., Alamirew, T., Kebede, A., Zeleke, G. and Melese, A.M. (2017). Analysis of rainfall trend and variability for agricultural water management in Awash River Basin, Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change*. 8(1), 127 – 141. 10.2166/wcc.2016.044
- Bouman B.A.M., Peng S., Castañeda A.R., & Visperas R.M. (2005). Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems. *Agricultural Water Management*. 74, 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.11.007>.
- Caicedo, O. Y. J. (2008). Evaluación de las características agronómicas de cuatro líneas interespecíficas de arroz (*Oryza sativa*/ *Oryza Latifolia*) comparadas con dos variedades comerciales y una nativa en el corregimiento #8 de Zacarías Municipio de Buenaventura. (Disertación doctoral) Universidad del Pacifico, Colombia.
- Castilla, L. A., Pineda, D., Ospina J., Echeverry, J., Perafan, R., Garces, G., Sierra, J. & Diaz, A. (2010). Cambio climático y producción de arroz. *Revista Arroz*. 58 (489), 4-11.
- Chaudhary, R.C., Nanda, J.S. y Tran, D.V. (2003). Guía para Identificar las Limitaciones de Campo en la Producción de Arroz. Comisión Internacional del Arroz, FAO, Roma.
- Choudhury, B.U., Boumam, B.A.M. and Singh, A.K. (2007). Yield and water productivity of rice–wheat on raised beds at New Delhi, India. *Field Crops Research*. 100, 229–239. 10.1016/j.fcr.2006.07.009.
- CIAT. (1985). Investigación y producción de arroz. Crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de Arroz. Palmira, 83-100.
- Cochemé, J. y Franquin, P. (1967). An agroclimatology survey of a semiarid area in Africa south of the Sahara. Nota técnica núm. 86. Ginebra: Organización Mundial de Meteorología, 136 pp.
- Coy, T.C.A., y Castillo, A.L.F. (2015). Efecto De Cuatro Épocas De Siembra Sobre El Comportamiento Agronómico De Cinco Variedades Comerciales De Arroz (*Oryza Sativa*) En El Centro De Investigación Santa Rosa, Villavicencio. Colombia. (Tesis de licenciatura) Universidad de los Llanos, Villavicencio.

- Cristo, E., González, M., Cárdenas, R. y Cabrera, A. (2006). comportamiento de nuevos genotipos de arroz (*Oryza sativa L.*) obtenidos mediante cultivo de anteras para condiciones de bajo suministro de agua. *Cultivos Tropicales*. 27(2), 57 – 62.
- Degiovanni, M. V., Gómez, J.A., y Sierra, J.M. (2004). growth, development and yield components analysis of three rice varieties (ORYZA SATIVA L.) in montería, cordoba. *Temas Agrarios*. 9(1), 21 – 29.
- Degiovanni, B.V., Martínez, R.C.P. y Motta, O.F. (2010) Producción Ecoeficiente del arroz en América Latina, Tomo I. CIAT, FLAR y UNICORDOBA. (Eds). Cali-Colombia. 513p.
- Delerce, S., Dorado, H., Grillon, A., Rebolledo, M.C., Prager, S.D., Patino, V.H., Varon, G.G. y Jimenez, D. (2016). Assessing weather-yield relationships in rice at local scale using data mining approaches. *PLoS ONE*. 11(8), 1 – 25. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161620>.
- Infante, S. y Zarate, L. (2001). Métodos estadísticos. Trillas México.
- Lansigan, F.P., De los Santos, W.L. y Coladilla, J.O. (2000). Agronomic impacts of climate variability on rice production in the Philippines. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 82, 129 – 137. 10.1016/S0167-8809(00)00222-X
- Lee, T, S., Aminul H.N, & Najim M.M.M. (2005). Scheduling the cropping calendar in wet-seeded rice schemes in Malaysia. *Agricultural Water Management*. 71, 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.06.007>
- Moeletsi, M., & Walker, S. (2012). Rainy season characteristics of the Free State Province of South Africa with reference to rain-fed maize production. *Water SA*. 38(5). 10.4314/wsa.v38i5.17.
- Mugalavai, E., Kipkorir, E., Raes, D. and Rao, M. (2008). Analysis of rainfall onset, cessation and length of growing season for western Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*. 148 (6-7), 1123 - 1135. 10.1016/j.agrformet.2008.02.013.
- Mupangwa, W., Walker, S. and Twomlow, S. (2011). Start, end and dry spells of the growing season in semi-arid southern Zimbabwe. *Journal of Arid*

Environments. 75(11), 1097 - 1104.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.05.011>.

- Odekunle, T. (2004). Rainfall and the length of the growing season in Nigeria. *International Journal of Climatology.* 24 (4), 467 - 479.
- Pal, R., Mahajan, G., Sardana, V. and Chauhan, B.S. (2017). Impact of sowing date on yield, dry matter and nitrogen accumulation, and nitrogen translocation in dry-seeded rice in North-West India. *Field Crops Research.* 206, 138 -148. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.025>.
- Qiu, R., Liu, C., Cui, N., Wu, Y., Wang, Z. and Li, G. (2019). Evapotranspiration estimation using a modified Priestley-Taylor model in a rice-wheat rotation system. *Agricultural Water Management.* 224, 105755. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105755>.
- Raes, D., Sithole, A., Makarau, A. and Milford, J. (2004). Evaluation of first planting dates recommended by criteria currently used in Zimbabwe. *Agricultural and Forest Meteorology.* 125 (3-4), 177 - 185. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.05.001>.
- Ruíz, O. Á., Arteaga, R.R., Vázquez, P.M.A., Ontiveros, C. R. E. y López, L. R. (2012). Inicio de la estación de crecimiento y periodos secos en Tabasco, México. *Tecnología y Ciencias del Agua.* 3 (2), 85-102.
- Sakai, R.K., Fitzjarrald, D.R., Oll, M., Staebler, R.M., Acevedo, O.C., Czikowsky, M.J., Rda, S., Brait, E. and Miranda, V. (2010). Land-use change effects on local energy, water, and carbon balances in an Amazonian agricultural field. *Global Change Biology.* 10, 895–907. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00773.x>.
- Sivakumar M.V.K. (1988). Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern sahelian and sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology.* 42, 295 – 305.
- Suzuki, T., Ohta, T., Hiyama, T., Izumi, Y., Mwandemele, O. and Iijima, M. (2014). Effects of the introduction of rice on evapotranspiration in seasonal wetlands. *Hydrol. Process.* 28, 4780–4794. [10.1002/hyp.9970](https://doi.org/10.1002/hyp.9970).

- Stern, R.D., Dennett, M.D. and Dale, I.C. (1982). Analysing daily rainfall measurements to give agronomically useful results. I. Direct methods. *Experimental Agriculture*. 18, 223 - 236.
- Tsimba, R., Edmeadesb, G.O., Millnerc, J.P. and Kemp, P.D. (2013). The effect of planting date on maize grain yields and yield components. *Field Crops Res.* 150, 135 – 144.
- Villalba, J.V., Jarma , A.J. y Combatt, E.M. (2017). Respuesta fisiológica de cultivares de arroz a diferentes épocas de siembra en Córdoba, Colombia. *Temas Agrarias*. 22 (2), 9 – 19.

6 REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ARROZ PARA DOS ÉPOCAS DE SIEMBRA EN EL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA

Jesica Natalia Valencia González ¹; Ramón Arteaga Ramírez ^{1*}; Mario Alberto Vázquez Peña¹; Abel Quevedo Nolasco²

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua Universidad Autónoma Chapingo. (UACH). Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Código postal. 56230. Estado de México.

²Colegio de Posgraduados (COLPOS) Km. 36.5, México 136 5, Montecillo Código postal. 56230. Texcoco, Estado de México.

Autor para correspondencia: rarteagar@taurus.chapingo.mx

6.1 Resumen

La producción de arroz en el sur del valle del Cauca es una actividad agrícola importante por su valor nutricional, económico y social. El objetivo del presente trabajo fue determinar la reducción de rendimiento del arroz seco para dos épocas de siembra mediante el programa Cropwat en el sur del Valle del Cauca, Colombia. Se usaron datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima, humedad relativa, brillo solar y velocidad del viento desde 1989 hasta 2016 en 4 estaciones cercanas a la zona de producción. El análisis de la información simulada indica que la estación Ing. Cauca e Ing. Miranda son las de menos referencia para la zona de producción; en cambio Ciat Quilichao presentó mejores condiciones que Independencia; debido al tipo de suelo de dicha estación, a pesar de que Independencia está ubicada entre los municipios productores. Los resultados obtenidos de reducción de rendimiento exhibieron que en la etapa inicial (A) dominó el 0% de reducción de rendimiento, pero en la etapa media (C) mostró ser demasiado sensible en la zona radicular dada la falta

de agua; sin desmeritar las etapas de desarrollo (B) y final (D). Así mismo, el año 2015 presentó reducción de rendimiento en todas las estaciones en ambas secciones, e Ing.Cauca presentó los valores más extremos de reducción de rendimiento por estación en los años 2000 y 2001 superiores al 22%; en cambio Ing. Miranda mostró reducciones de hasta del 15%. Se determinó que el programa Cropwat cumple con la función de exhibir el consumo de agua por parte del cultivo y mediante la ecuación de productividad de Doorenbos y Kassam la respuesta a la cantidad de agua proporcionada.

Palabras claves: Arroz, evapotranspiración, precipitación, reducción de rendimiento, Cropwat,

6.2 Introducción

El arroz es uno de los cereales más importantes del mundo, hace parte de la lista de alimentos que más demanda tiene; debido al incremento de la población mundial (Suryadi, Ruswandi, Dwiratna and Prawiranegara, 2019). En Colombia, el arroz ocupa el tercer lugar entre los cultivos de mayor importancia en términos de área cultivada, de producción y generación de empleo, después del café y el maíz (Chica, Tirado and Barreto, 2016).

En el año 2014, Colombia reportó un promedio de 4.8 ton ha⁻¹ de arroz, entre los 24 países de Latinoamérica y el caribe (FAO, 2017); sin embargo, las cifras reportadas en el IV Censo Nacional Arrocero 2016, divulgan que la producción anual de arroz en el Valle del Cauca es de 3750 ha y 26582 toneladas de arroz; lo que representa un 94% de la producción del Valle del Cauca, lo que permite percibir que en algunos de los 210 municipios productores de arroz en Colombia el rendimiento puede llegar a ser superior que el total reportado del país. Estas cifras demuestran la importancia del sector a nivel nacional, más aún si se tiene en cuenta que históricamente, el consumo ha permanecido en los 37 kilos per cápita en áreas urbanas y los 40 kilos en áreas rurales desde la década de los 90 y, en

el año 2017 la demanda de consumo llegó a 40.56 y 44.20 kilos en las zonas urbanas y rurales(Troncoso, 2019)

Por ende, este cereal es uno de los cultivos que se convierte en el objetivo de la planificación del desarrollo en el ámbito de alimentos y de la agricultura Colombiana. Los rendimientos de los cultivos en zonas de temporal son fuertemente dependientes de la aleatoriedad de la precipitación y la presencia de altas temperaturas, lo que influye en la disponibilidad de agua en suelo (Surendran, Sushanth, Mammen and Joseph, 2017), y la estimación del rendimiento o reducciones de este; es fundamental para abordar la seguridad alimentaria a largo plazo de una zona específica (Espe et al., 2016).

El programa Cropwat se ha utilizado ampliamente como un instrumento práctico de gestión para la programación del riego y estimar las reducciones de rendimiento en condiciones de déficit hídrico; algunos ejemplos de ellos en Colombia, han sido: en el norte del Urabá antioqueño, el riego complementario se estableció relevante para no presentar disminuciones en el rendimiento en las simulaciones de la época seca y normal (Toro, Arteaga, Vásquez y Ibáñez, 2016), y Chaali, Ouazaa, Jaramillo, Araujo, and Ávila (2020), determinaron las necesidades hídricas de la arracacha, para diferentes años hidrológicos (*Promedio, El Niño y La Niña*); los resultados mostraron que el consumo total de agua para la raíz de la arracacha era de 820 mm a lo largo de todo el período vegetativo. No obstante, un caso experimental hecho por Quevedo, Beltrán y Barragán (2019), identificaron que la radiación solar, el índice de ares foliar, la altura de la planta y la materia seca en la etapa B y C del ciclo del cultivo es un parámetro clave en el rendimiento de arroz en el departamento del Tolima, Colombia y para mantener una buena productividad en fechas de siembra; con condiciones ambiental óptimas y deficientes. Expresado lo anterior, la producción de arroz puede verse afectada por diversos factores, de los más importantes el “déficit de agua”; por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue determinar la reducción de rendimiento del arroz secano para dos épocas de siembra mediante el programa Cropwat.

6.3 Materiales y métodos

6.3.1 Localización del área de estudio

La zona de estudio está ubicada al sur del departamento del Valle del Cauca, limitando con el Norte del departamento del Cauca (Figura 6.1) con un área de producción de 3750 ha (DANE y FEDEARROZ, 2017). Ubicada entre las longitudes -75.8° y -76.6° y las latitudes $3,0^{\circ}$ y $5,0^{\circ}$, la altura de la zona es de alrededor de 1,000 m.s.n.m, una precipitación media anual de 1,296 mm y una temperatura promedio de 23°C con una oscilación media diaria de 11°C (Valencia, García y Montero, 2017).

6.3.2 Información climática

Se empleó una base de datos climatológica diaria de cuatro estaciones desde 1989 a 2016 de las variables: precipitación, humedad relativa, viento, brillo solar, temperatura máxima y mínima, proporcionada por la CVC y el IDEAM.

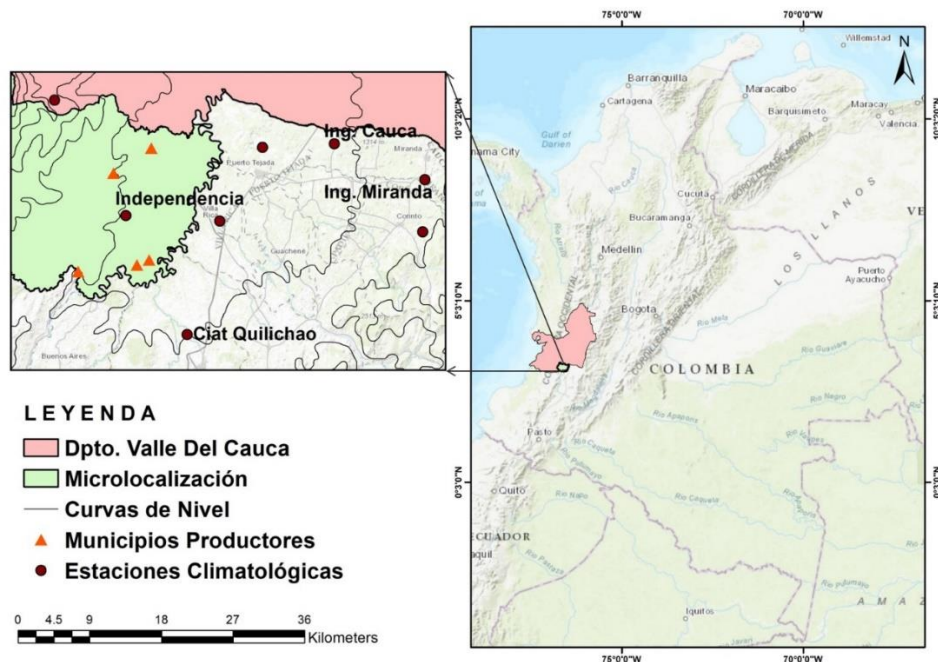


Figura 6.1. Ubicación de la Zona de estudio

6.3.3 Modelo Cropwat

Cropwat es un programa informático publicado por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) para facilitar el análisis de las necesidades de riego, la planeación de la siembra y la predicción de rendimientos de cultivos (Suryadi et al., 2019). A continuación, se enlistan los datos básicos de entrada para la manipulación del programa:

Módulo de clima:

Requiere de la información climática de la zona y datos de ubicación como la altitud, latitud y longitud. Esta información es necesaria para llevar a cabo la estimación de la evapotranspiración (ET_o) sea escala diaria, decadiarios o mensual; los valores de ET_o obtenidos es con base en el método de Penman Monteith (Allen, Pereira, Raes y Smith, 2006).

Módulo de Precipitación:

Se ingresa el total mensual de la precipitación año con año, estos valores se convierten en uno de los factores que determinan el valor de las necesidades de agua de los cultivos. Sin embargo, para el alcance de este trabajo se ingresó la información requerida más no fue considerada en los cálculos de riego (*precipitación efectiva*).

Módulo de cultivo:

Los datos característicos de los cultivos de entrada incluyen el número de días en cada fase de crecimiento, el valor K_c en cada fase de crecimiento, la profundidad de las raíces, el valor de agotamiento crítico y el factor de respuesta del rendimiento de los cultivos (Cuadro 6.1).

Cuadro 6.1. Datos de entrada del arroz

Etapa de Crecimiento	Inicio (A)	Desarrollo (B)	Media (C)	Final (D)	Total
Longitud de ciclo (d)	30	32	32	30	± 120 - 126 (1)
	30	30	31	30	± 119 - 121 (2)
Coefficiente del cultivo (Kc)	1.10	1.13	1.19	1.11	
Profundidad de las raíces (m)	0.1		0.6	1.00	
Fracción de agotamiento crítico (p)	0.2		0.2	0.2	
Factor de rendimiento (Ky)	0.5	0.7	1.5	0.85	0.50

(1) : Primera fecha de siembra correspondiente al mes de febrero

(2) : Segunda fecha de siembra correspondiente al mes de agosto o septiembre

Fracción de agotamiento de la humedad en el suelo para condiciones sin estrés hídrico (p, porcentual decimal), tomado de Allen, Pereira, Raes y Smith (2006)

Factor de rendimiento (Ky) tomado de Frère y Popov (1986).

Elaboración propia

Módulo de suelo:

El programa necesita algunos datos generales del suelo como la humedad total del suelo disponible, la tasa máxima de infiltración de la lluvia, la profundidad máxima de enraizamiento, el agotamiento inicial de la humedad del suelo y la humedad del suelo disponible inicialmente. Para la zona de estudio en curso existen dos tipos de suelo: Arcilloso correspondiente a la estación Ciat Quilichao y Franco-Arcilloso de las estaciones Independencia, Ing. Cauca e Ing. Miranda.

6.3.4 Estimación de la Reducción de rendimiento (RR)

La respuesta al rendimiento del déficit de agua es con base en el enfoque del boletín No. 33 de riego y drenaje de la FAO, que utiliza cálculos de balance hídrico diario del programa CROPWAT 8.0 (Doorenbos y Kassam, 1980) (Ecuación 6.1). La reducción de rendimiento del arroz sin riego se determinó a través de la programación de riego: no regar (secano) con eficiencia de riego del 50%.

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_{c-aj}}{ET_c}\right) \quad (6.1)$$

Donde:

Ya representa el rendimiento alcanzable en condiciones reales

Ym es el máximo rendimiento del cultivo a plena satisfacción siendo en este caso el rendimiento logrado bajo en riego con la ET al 100 %

ETc-aj es la evapotranspiración del cultivo en condiciones no estándar (con niveles de reducción de la ETc)

ETc es la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar

6.4 Resultados y discusión

Se realizó un análisis y seguimiento a las publicaciones científicas indexadas en la base de datos *Scopus*; empleando diversos filtros como, palabras clave: stages, cropwat, "upland rice", "yield reduction", tipo de documento: Artículo o revisión (ar OR re) y años de búsqueda desde el año 2014 al 2020 (pubyear > 2013). Qué permitió obtener diversos artículos que contribuyen a la discusión de los presentes resultados, como: el trabajo elaborado de arroz en Waghodia, India por Shah, Mistry, Amin, Parmar and Shaikh (2015), la *Jathropha* en Botswana por Moseki, Murray-Hudson and Kashe (2019), y el de la *arracacha* en Colombia por Chaali et al (2020), todos hechos mediante el programa Cropwat 8.0.

6.4.1 Evapotranspiración de referencia (ETo)

Los resultados de la estimación de la ETo a través del modelo Penman Montheith presenta un comportamiento similar para las cuatro estaciones, presentando los valores medios mensuales más altos de la ETo en la estación Independencia,

seguida por Ing. Cauca, Ciat Quilichao e Ing. Miranda (Figura 6.2). En los meses de Mayo, Junio y Julio se registra un descenso al igual que en Noviembre y Diciembre; los descensos indicados permiten a la zona de producción de arroz establecer dos periodos de siembra de máximo 126 a 121 días para la primera y segunda sección de siembra, respectivamente. En el resto de los meses no mencionados se les imputa el periodo de lluvias y el establecimiento del cultivo, donde suele acontecer un aumento en la temperatura del aire en el período de desarrollo (B); la radiación solar entra en contacto directo con la superficie del suelo debido a que el cielo a menudo está despejado, y provoca un aumento de la evapotranspiración (Lee and Dang, 2018).

Argumentos adicionales son expuestos por diversos autores, como: Shah et al. (2015), comentan que la superficie foliar respecto al suelo corresponde al 10% del cultivo durante la etapa A y por ende la ETo es predominante alta, afectando de la misma forma a la evapotranspiración del cultivo ETc. Akinbile, Ogundipe and Davids (2020), informaron que la evaporación suele ser pronunciada durante la fase vegetativa, pero la pérdida de agua a través de los estomas y lenticelas es marcada a mediados del ciclo del cultivo; suceso en que el uso y necesidad de agua es máximo por la planta. El modelo Cropwat ha demostrado que al final de la fase de desarrollo, las mayores tasas de evapotranspiración fueron de 46.6 mm/decadal, estos altos valores de evapotranspiración indican la cantidad de agua que necesitan las plantas; por lo general, son muy sensibles a los déficits de agua durante las tres primeras etapas, hasta el comienzo de la maduración (Bahrun et al., 2019).

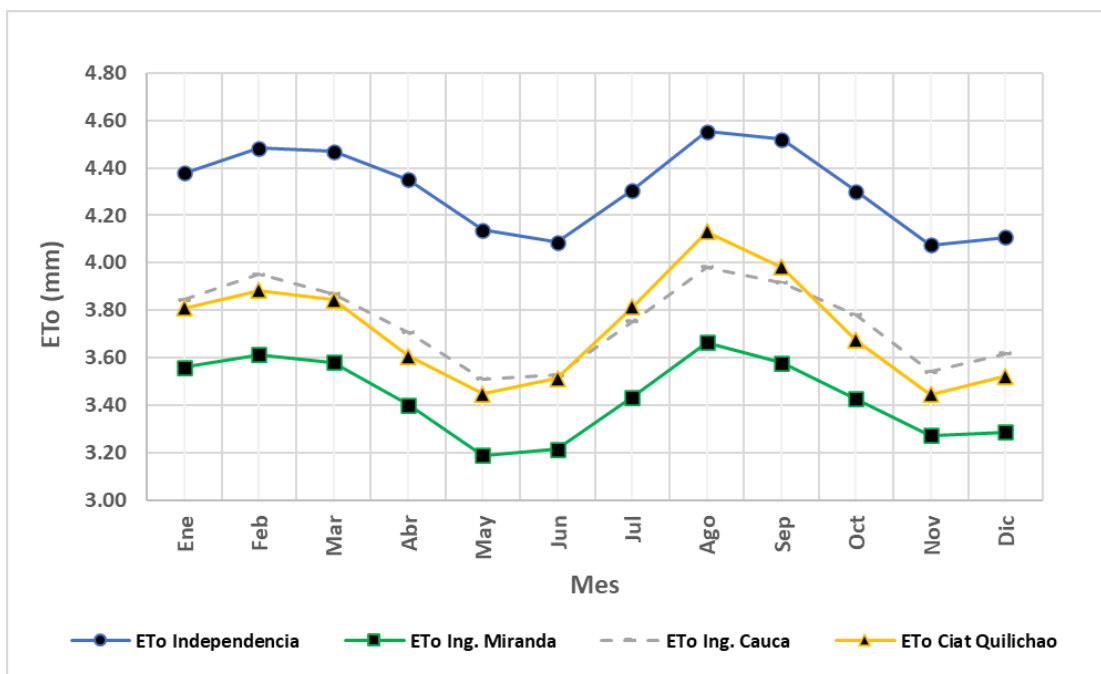


Figura 6.2. Evapotranspiración de referencia media mensual de las estaciones

6.4.2 Evapotranspiración del cultivo (ETc)

A nivel general, se puede observar que en las etapas A, B y C del arroz la ETc no supera los 55 mm etapa⁻¹; esto es posible porque la duración en días en cada etapa es muy similar. En la última etapa (D) se observan descensos significativos; que son atribuidos a: el descenso de la disponibilidad de precipitación por época de crecimiento entre estaciones, además la evapotranspiración del cultivo varía en el curso de cada estación porque las características morfológicas y ecofisiológicas del cultivo cambian con el tiempo (Shah et al., 2015), (Figura 6.3).

Es evidente que en la etapa A, para las cuatro estaciones, en ambas secciones, se mantiene en el rango de 40 a 50 mm de ETc en 30 días; y como se había mencionado anteriormente, en esta etapa apenas existe un 10% del área foliar del cultivo sobre el suelo (Shah et al., 2015), observaciones similares enuncian Bouraima, Zhang and Wei (2015), quienes obtuvieron ETc acumulada del arroz durante la etapa A equivalente a 50.40 y 57.50 mm etapa⁻¹ para una sección lluviosa y seca, respectivamente. En la etapa B, se identifica que las estaciones Independencia-Ciat Quilichao e Ing. Cauca-Ing.Miranda poseen medias

similares, ya que el suelo está cubierto por todo el cultivo (Shah et al., 2015); aunque para la segunda sección las estaciones independencia y Ciat Quilichao presentan un leve aumento en la evapotranspiración del cultivo a lo largo del periodo de estudio.

En la etapa C se mantienen los valores de ETc para ambas secciones en todas las estaciones, excepto en Ing.Miranda donde se observa que la ETc de la sección 2 es superior por 6.89 mm en relación con la sección 1. De hecho, Acharjee, Van Halsema, Ludwing, Hellegers and Supit (2019), manifiestan que cuando los cultivos se han establecido de manera oportuna para su zona de producción, existen diferencias mínimas de ETc en las primeras etapas (A, B y C). Respecto a la etapa D, se presentan significativas diferencias entre secciones por estación y entre estaciones, excepto la estación Ciat Quilichao que presentó una ETc similar en sus dos secciones. Esto tiene lugar gracias a las características estables del suelo arcilloso que domina en la locación de la estación. En cambio, en las demás estaciones domina el tipo de suelo Franco-Arcilloso, cuyo suelo no posee la misma capacidad de retención del agua en el suelo como el arcilloso; por ende, Independencia presentó una diferencia de 36.36 mm de la sección 2 a la 1. En cambio, Ing. Cauca e Ing. Miranda fue mayor la ETc en la sección 1 que en la 2; exhibiendo 22.02 y 14.58 mm de diferencias entre las secciones de las respectivas estaciones. Una observación considerable la enfatizan Lee and Dang (2018), que la ETc del arroz disminuye lentamente en los primeros 19 días de la última etapa del cultivo.

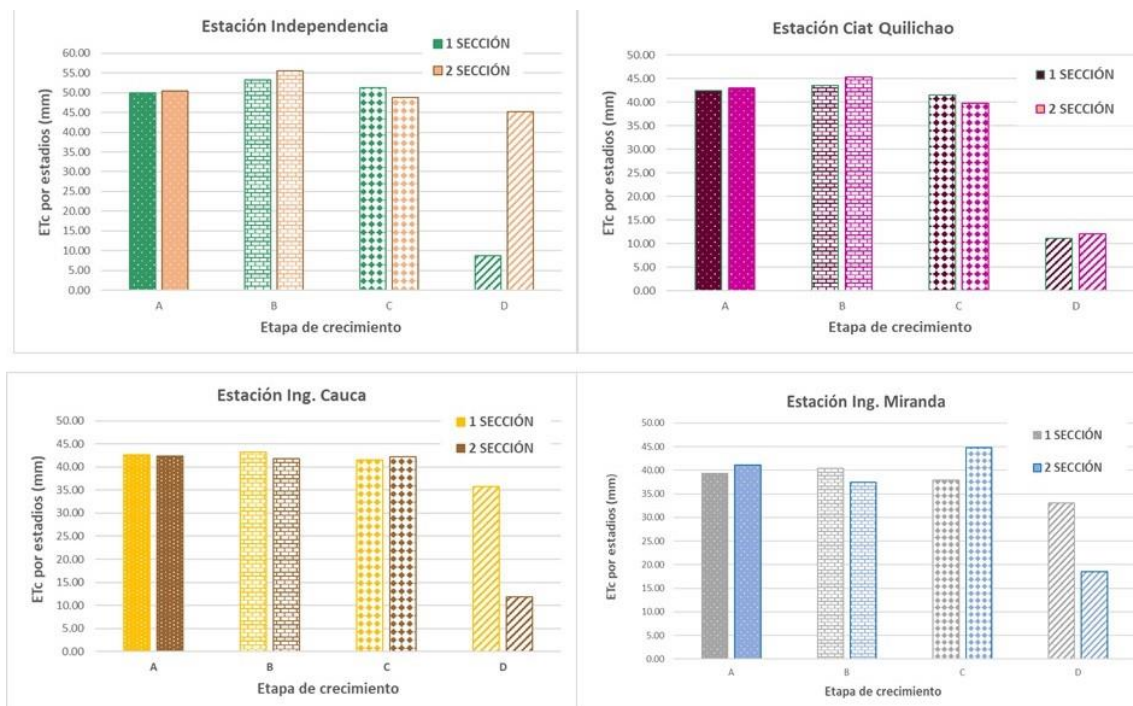


Figura 6.3. Promedio de la Evapotranspiración del cultivo por etapas de cada estación

De este apartado, se puede enunciar que la estación que presenta más estabilidad en la ETc por etapa es Ciat Quilichao, seguido por Ing. Cauca, independencia e Ing. Miranda; del mismo modo, Bouraima et al. (2015), expresaron que la evapotranspiración del cultivo está en función de la cantidad de precipitaciones y esta varía mucho entre las estaciones; así mismo, la capacidad de retención de agua del suelo de cada estación, teniendo en cuenta la duración del ciclo del cultivos y las etapas de crecimiento. Por ejemplificar, el modelo CROPWAT 8.0 fue utilizado por Shrestha, Gyawali and Bhattarai (2013) para estimar las necesidades de agua, donde se exhibió diferentes tendencias en diferentes regiones fisiográficas y en las diferentes etapas de crecimiento del arroz y el trigo; pero, se concluyó que los planes de irrigación son suficientes para cumplir los requisitos del cultivo. Sin embargo, con el modelo estadístico de reducción de escala (SDSM) para la región de Terai, la modelización indicó un déficit en la precipitación efectiva para ambos cultivos en el desarrollo de las etapas media y final, esperando un cambio mínimo en la ETc.

6.4.3 Precipitación Efectiva (Pef)

El modelo CROPWAT considera cuatro métodos para estimar precipitaciones efectivas como: porcentaje fijo, la fórmula FAO/AGLW, la fórmula empírica y el método del servicio de conservación del suelo U(SDA); sin embargo, para el alcance de este estudio no se empleó ninguno de los cuatro métodos enunciados ya que las simulaciones se realizaron para arroz de secano.

La cantidad de lluvia disponible por cada estación de crecimiento de un año es eficazmente aprovechable por las plantas en ciertos porcentajes respecto del valor total de la lluvia, esto permite identificar que la estación Ing. Cauca presenta mayor dispersión en la disponibilidad de precipitación efectiva para ambas secciones (Figura 6.4 y 6.5); a diferencia de Ciat Quilichao que presentó menor dispersión en la información por el periodo de estudio establecido. Ahora bien, es notorio que, en ambas secciones, las estaciones presentan valores de la mediana mayores a 500 mm; excepto Ing. Cauca, en la segunda sección presentó 490.9 mm de mediana. Otras características estadísticas de la Pef para ambas secciones es la desviación estándar, la cual corresponde a 66.4, 90.7, 117.8 y 73 mm para la primera sección y 80.4, 55.7, 90.6 y 91.4 mm para la segunda sección en las estaciones Ciat Quilichao, Independencia, Ing. Cauca e Ing. Miranda, respectivamente; a nivel general, este índice indica poca dispersión entre cualquier valor de Pef respecto de su media.

Los resultados obtenidos de la simulación en el modelo Cropwat 8.0, la lluvia efectiva corresponde a más del 50% de la precipitación total por sección; pues para la primera sección la Pef varía de 250 a 800 mm y en la segunda sección de 200 a 700 mm entre las estaciones; en contraste con ello Boonwichai, Shrestha, Babel, Weesakul and Datta, (2018) discuten que el arroz paddy necesita entre 450 y 700 mm de agua por periodo de crecimiento.

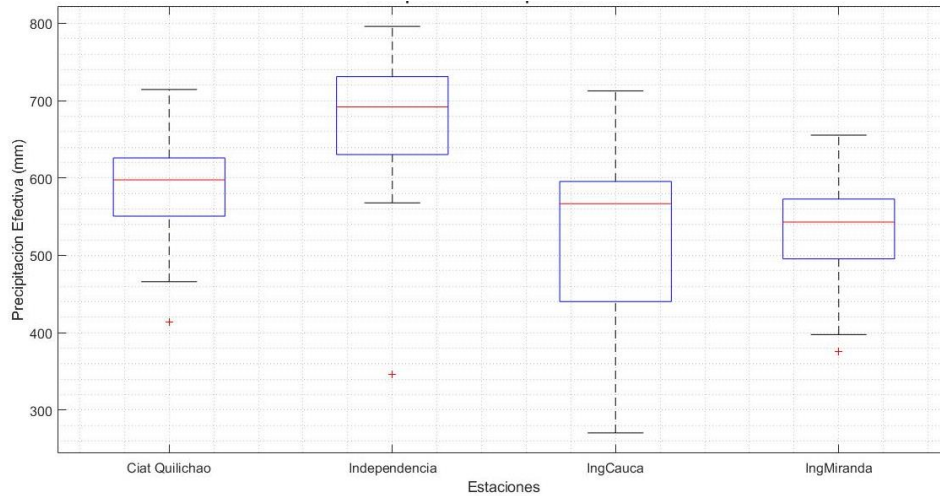


Figura 6.4. Precipitación efectiva de las estaciones en la primera sección

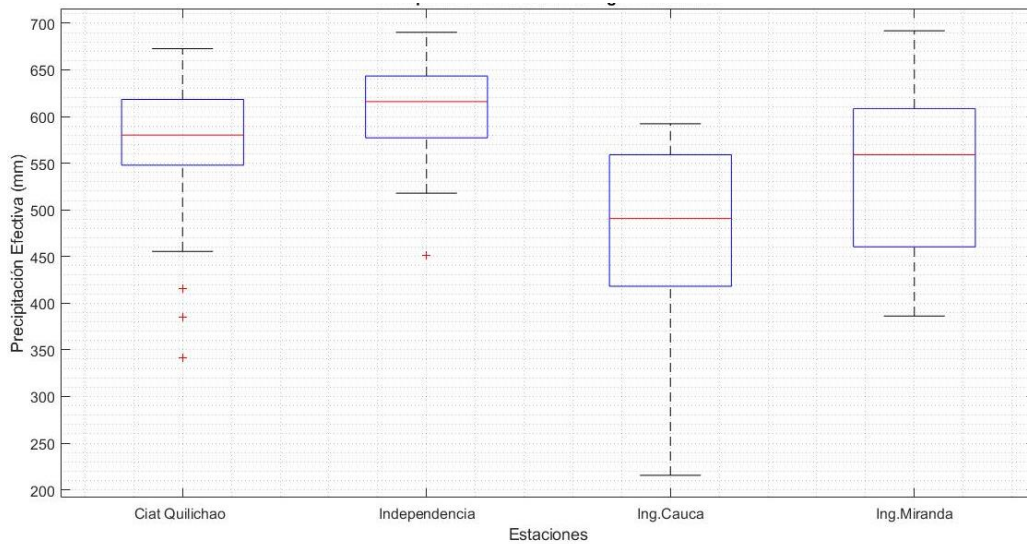


Figura 6.5. Precipitación efectiva de las estaciones en la segunda sección

Los resultados exhiben algunos valores atípicos inferiores para algunas estaciones en ambas secciones; estos valores son numéricamente poco distantes al conjunto de datos que comprende cada estación en cada sección, siendo así, en la primera sección los puntos atípicos corresponden a un 99, 80 y 58% de la precipitación total de las estaciones Ing. Miranda, Independencia y Ciat Quilichao y para la segunda sección, la estación Ciat Quilichao tiene un valor atípico que corresponde a la precipitación efectiva de 341.7 mm en el año 1997;

equivalente al 54% de la precipitación total de la sección y 416.1mm, equivalente al 96% de la precipitación total de la segunda sección del año 1994, pero en la segunda sección del año 2015, Ciat Quilichao e independencia, presentaron una Pef de 385.3 y 451.2 mm, equivalentes al 82% del total de lluvia de esas secciones. Los valores atípicos son valores que no se esperaban obtener, pero aun así los porcentajes de correspondencia respecto al total de lluvia indican que más del 50% fue utilizado en el desarrollo eficaz del ciclo del cultivo.

En circunstancias similares, la precipitación efectiva ha sido aprovechada eficazmente en un 97.4%, 63.1%, 29.6% y 34.3% por el trigo, la cebada, el maíz blanco y los tomates, respectivamente (Ewaid, Abed and Al-ansari, 2019). Véase por ejemplo la investigación realizada por Chaali et al. (2020), quienes aseguran que tras una simulación hecha en Cropwat durante un año con lluvias regulares a un año seco, estas registran una menor precipitación efectiva e indicaron que se necesita un riego suplementario para satisfacer las necesidades diarias de agua de los cultivos; ya que la arracacha, requiere una precipitación moderada y distribuida uniformemente de al menos 600 mm, pero preferiblemente 1000 mm, y si la precipitación natural es insuficiente debe ser complementada con el de riego.

Es conveniente reconocer que en cada estación existe suficiente lluvia para establecer de forma exitosa el cultivo y satisfacer la evapotranspiración del cultivo (ETc); aunque las lluvias sean abundantes y desiguales entre las cuatro estaciones, su distribución desigual no afecta el inicio de la estación de crecimiento en la zona de estudio; caso contrario ocurre en la programación del riego del arroz (*Oryza sativa L.*) utilizando el modelo CROPWAT en el Región occidental de Bangladesh, allí durante siete meses del año, la ETo supera las precipitaciones efectivas en las que el riego es indispensable para el arroz sin reducción del rendimiento (Hossain, Yesmin, Maniruzzaman and Biswas, 2017). Otro argumento a favor ha sido sustentado en el trabajo de la *Jatropha* por Moseki et al. (2019), donde la precipitación efectiva coincidió con los meses correspondientes a la última etapa del cultivo en la región semiárida de Bostwana;

etapa en la que el agua es vital para que la producción fuese económicamente sostenible, a fin de maximizar los rendimientos sin consecuencias adversas para los recursos hídricos. De forma alternativa, Laouisset and Dellal (2016), destacan que, si las precipitaciones efectivas durante el período son insuficientes para cubrir todo el ciclo de cultivo, teniendo en cuenta la tasa de infiltración del suelo y su permeabilidad, es obligatorio construir el sistema de riego.

6.4.4 Reducción del rendimiento (RR)

La reducción de rendimiento estimado con el modelo Cropwat 8.0 se debe únicamente al estrés por humedad del suelo (*coeficiente de estrés hídrico: Ks*), que se expresa como un porcentaje de la producción máxima alcanzable en la zona en condiciones óptimas y puede calcularse con referencia a una sola etapa del ciclo de cultivo o a todo el período vegetativo (Chaali et al., 2020). A continuación, se presentan los resultados por secciones y por etapa de las estaciones:

La sección 1, para las cuatro estaciones, revela que la disminución porcentual del rendimiento fue de 0% en un 42.86 % para las estaciones Ing. Cauca e Ing. Miranda (Figura 6.8 y 6.9), en un 60.71% para la estación independencia y un 75% para Ciat Quilichao (Figura 6.6 y 6.7). Las reducciones de rendimiento más extremas fueron en 1 año para Ciat Quilichao, Independencia e Ing. Cauca y de 2 años para Ing. Miranda. A pesar de ello, en un 32.1% de los años, las reducciones de rendimiento fueron de 3.08% para Ing. Miranda, para la estación Independencia en un 25% de los años fue de 3.36% la reducción de rendimiento, en un 21% de los años fue de 5.52% la reducción de rendimiento para Ing. Cauca

y en un 14% de los años la reducción de rendimiento fue de 1.9% en Ciat Quilichao.

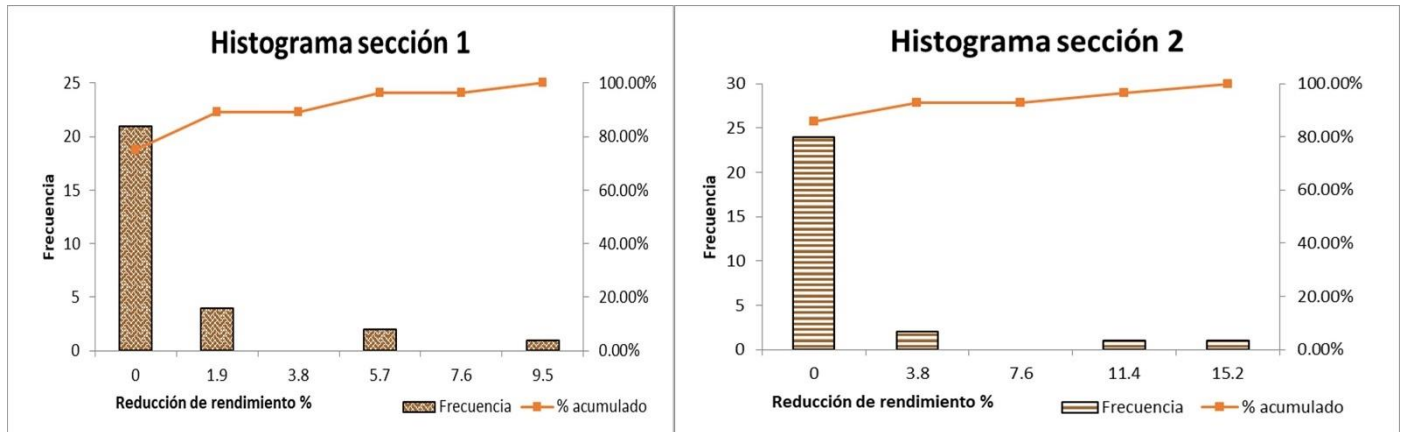


Figura 6.6. . Frecuencia relativa y frecuencia relativa acumulada de las disminuciones porcentuales del rendimiento de arroz, para la estación Ciat Quilichao (1989 - 2016).

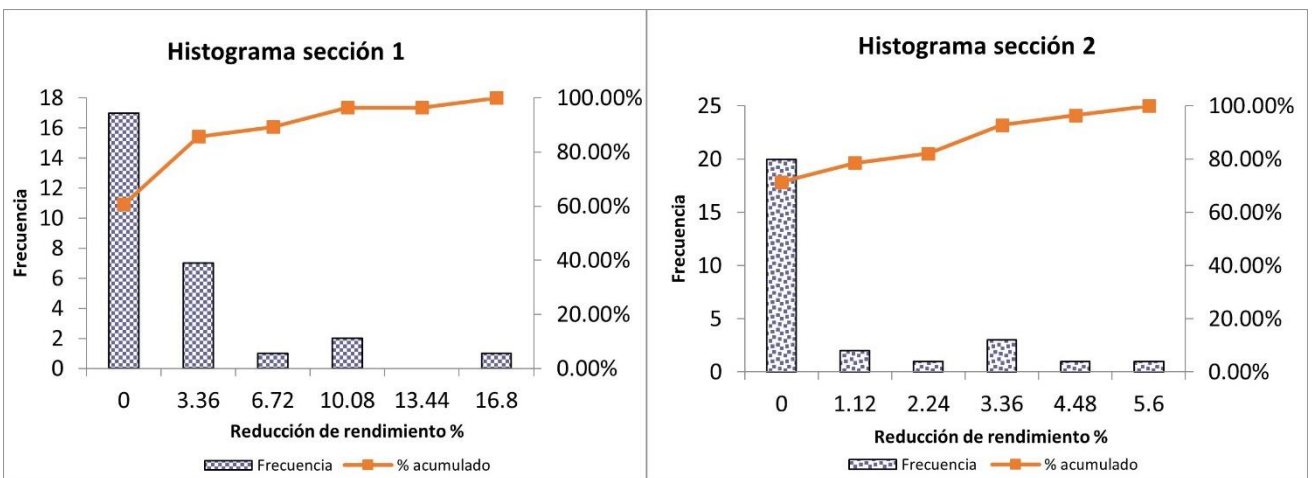


Figura 6.7. Frecuencia relativa y frecuencia relativa acumulada de las disminuciones porcentuales del rendimiento de arroz, para la estación Independencia (1989 - 2016).

También en la sección 2 se presenta una disminución de rendimiento del 0% para más del 50% de los años en las estaciones Ciat Quilichao e Independencia, respectivamente (Figura 6.6 y 6.7). Sin embargo, la estación Ing. Cauca solo presentó en un 25% e Ing. Miranda un 35.71% de los años reducciones de rendimiento igual a cero (Figura 6.8 y 6.9). Los valores más extremos los exhibió

Ing. Cauca, Ing. Miranda, Ciat Quilichao e Independencia en al menos un año cada estación. No obstante, las reducciones de rendimiento equivalentes a 5.74% se evidencian en un 35.7% de la información en la estación Ing. Cauca, en un 21.4% de los años la reducción de rendimiento fue de 2.76% para Ing. Miranda y en un 7.14% de los años la reducción de rendimiento fue de 1.18% para Ciat Quilichao y 1.12% para Independencia.

Se observa que la estación Independencia es la zona que presenta una baja frecuencia en las reducciones de rendimientos de ambas secciones por todo el periodo de estudio; pese a ello, presentó algunas reducciones de rendimientos en la sección 1, a pesar de ser la estación que se halla en medio de toda la zona de producción. Ciat Quilichao es una estación cercana a la zona de estudio y evidencia menos valores de reducción de rendimiento que Independencia; esto es atribuido a que en su ubicación domina el suelo arcilloso, el cual retiene con mayor capacidad el agua de la lluvia y esta es eficazmente usada por la planta. Las estaciones Ing. Cauca e Ing. Miranda se hallan a 30 km de la zona de producción y presentan altos valores en la reducción de rendimiento año con año; y más en la sección 2, de acuerdo con Abeywardena (2016), este tipo de estaciones son ideales para estimar futuros rendimientos mínimos, medios o máximos; ya que, cada estación posee un entorno específico de temperatura y radiación solar dentro de la zona de estudio.

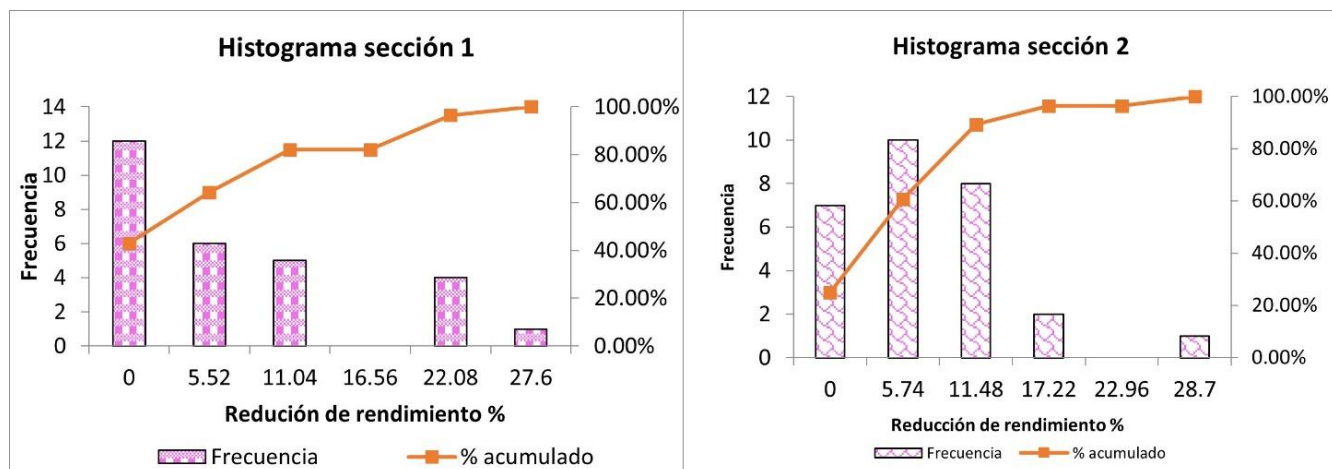


Figura 6.8. Frecuencia relativa y frecuencia relativa acumulada de las disminuciones porcentuales del rendimiento de arroz, para la estación Ing. Cauca (1989 - 2016).

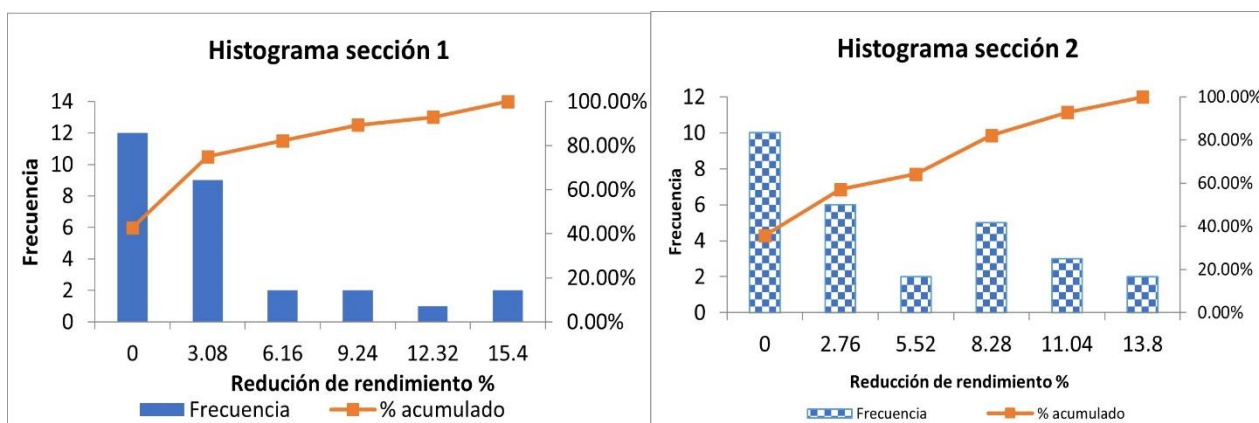


Figura 6.9. Frecuencia relativa y frecuencia relativa acumulada de las disminuciones porcentuales del rendimiento de arroz, para la estación Ing. Miranda (1989 - 2016).

Específicamente en la zona de estudio de este trabajo, se observa que el promedio de la reducción de rendimiento por año de la sección 1 fue menor a 4% en la mayoría de los años; a excepción de los extremos que presenta, caso contrario acontece en la sección 2, donde se detalla que en la mayoría de los años hubo una reducción de al menos 4% (Figura 6.10). En la primera sección los años 1992, 2001, 2004, 2009, 2015 y en la segunda sección en los años 1991, 1994, 1998, 2000, 2001 y 2015 presentan los promedios más altos de la RR; la

primera sección es donde se exhibe más RR y la responsabilidad de esto recae sobre un descenso superior al 15% en la precipitación diaria; ya que ocasiona RR de hasta el 9% (Surendran et al., 2017). En contraste, la RR presentada en la primera sección en el año 2001 es aproximadamente el doble de la RR de la sección dos; y esto tiene lugar ya que la estación Ing. Cauca presentó el mayor valor de RR en ese año de 27.6% antecedida por 270.6 mm de precipitación efectiva, de los cuales, esta corresponde a un 95% de la lluvia total; demostrando que en este año el ciclo del cultivo estuvo pobre de precipitación, afectando el rendimiento final; hecho similar acontece para la segunda sección solo que en esta la Pef fue de 334.9 mm, equivalente al 96% de la lluvia total de esa sección. Y el año 2015 presentó un promedio similar en la reducción de rendimiento en las secciones 1 y 2 de 8 y 9.6%, respectivamente. Esto fue posible, gracias a que durante el ciclo del cultivo se empleó más del 58 y 82% del total de la lluvia en la primera y segunda sección respectivamente de las estaciones del área de estudio.

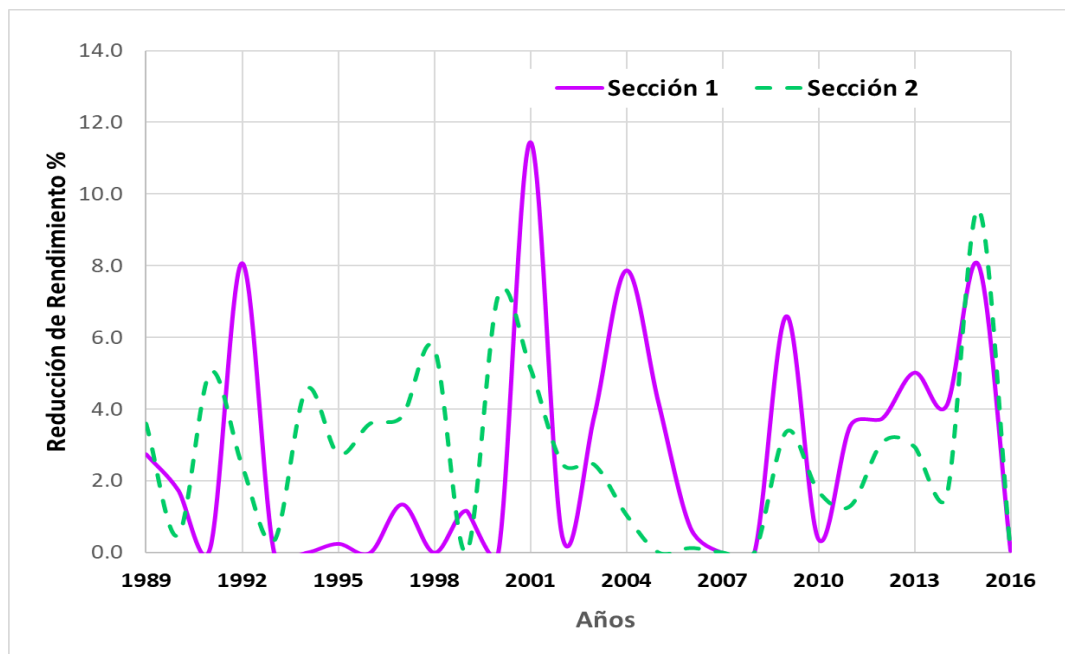


Figura 6.10. Promedio de la reducción de rendimiento por año para ambas secciones

Sin embargo, se debe hacer hincapié en la reducción de rendimiento que se da por cada etapa en el cultivo, pues la respuesta del rendimiento difirió en gran medida según la etapa en que se produce el estrés hídrico. Típicamente, las etapas de floración y madurez son las más sensibles al estrés, algunos aspectos identificados por estaciones son:

La etapa A es conocida por los estadios de germinación y la formación de los primeros brotes laterales (ahijamiento), la sección 1 presentó una RR de 2% en el año 2004 en la estación Ing.Cauca y en la sección 2 durante toda la etapa en todas las estaciones no presentó RR (Figura 6.13); esto es posible gracias a la relación entre la duración de una etapa u otra; ya que dependen fundamentalmente de la época de siembra (Maqueira, Roján, Torresm Duque y Torres, 2018). De hecho, durante esta etapa, la superficie foliar del cultivo es aún pequeña y las plantas necesitan agua para que crezcan y se desarrollen; mientras que, en la fase de desarrollo, las plantas necesitan agua para la formación de los tallos para alcanzar el máximo crecimiento (Bahrun et al., 2019)

La etapa B manifiesta algunos valores de la RR en ambas secciones de Independencia e Ing.Cauca (Figura 6.12 y 6.13), en la primera sección de Ing.Miranda y en ninguna sección de Ciat Quilichao (Figura 6.11 y 6.14); esto tiene lugar ya que la cobertura total efectiva del cultivo sobre el suelo no acontece al mismo tiempo en las estaciones por las diferentes fechas en que fue establecido el cultivo (Shah et al., 2015). Una evidencia notaria fue en la primera sección de Independencia en el año 2005 presenta días secos en intervalos de 2,3 y 5 días desde la etapa B con precipitaciones superiores a 17 mm día^{-1} hasta final de la etapa C e inicios de la D; ocasionando déficit directo sobre el agua que debe ser retenida por el suelo. En cambio, en el año 2013 de la segunda sección, en la etapa C tuvo lugar 9 días con disminuciones inferiores a uno de ks con dos días lluviosos de 22.3 mm y otros dos días lluviosos de 26.3 mm reduciendo el agua disponible en la zona radicular para esta etapa que es tan sensible (Figura 6.12). El agotamiento radicular afecta los estadios de esta etapa, que son: la hoja bandera, seguido por el hinchamiento de la panícula (embuchamiento) y salida

de las panículas (Maqueira et al., 2018). La hoja bandera es la última hoja que emerge del tallo, generalmente es más pequeña que las otras y se encuentra posicionada justo por debajo de la espiga o panícula en las gramíneas; sus características como forma, tamaño, contenido de clorofila y capacidad fotosintética han sido parámetros considerados importantes que determinan el rendimiento en cereales; ya que la morfología de la hoja bandera afecta la calidad del grano, madurez y rendimiento (Quevedo et al., 2019).

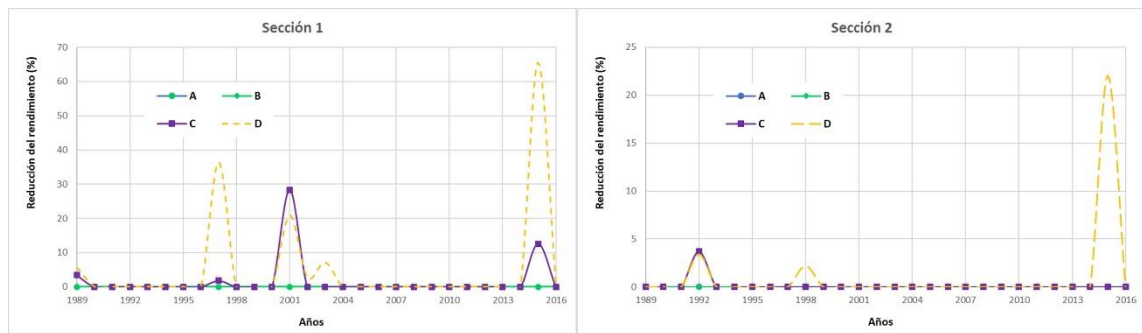


Figura 6.11. Reducción de rendimiento por etapas en ambas secciones para la estación Ciat Quilichao

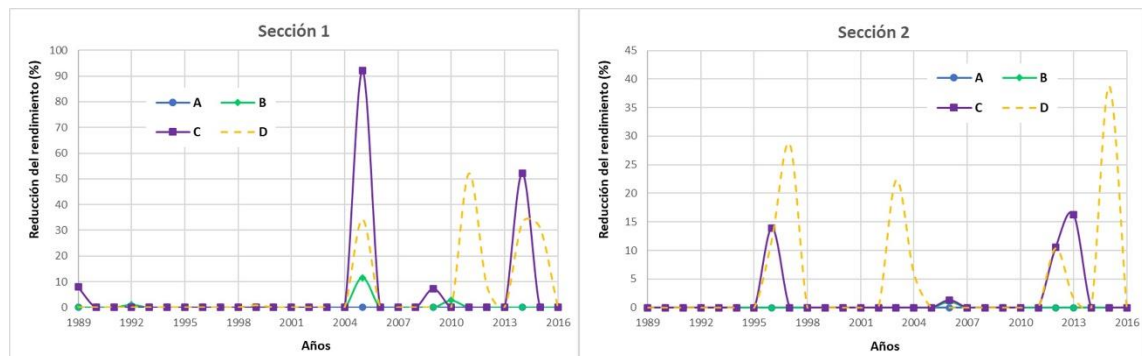


Figura 6.12. Reducción de rendimiento por etapas en ambas secciones para la estación Independencia

La etapa C (Media) presenta más evidencia de los valores de RR, esto tiene lugar ya que la planta requiere energía para el proceso de floración; en esta fase tiene lugar el valor de K_y más alto (*Factor de respuesta de rendimiento*) en toda la duración del ciclo, debido a que el cultivo es muy sensible a los déficits de agua durante la floración-Madurez y el comienzo de la fase de la cosecha (Bahrun et

al., 2019). Es necesario reconocer que fase está determinada por los estadios de floración-hasta el comienzo de la madurez, grano lechoso, pastoso o masoso. Zhao et al. (2020), destacan en que el número de granos rellenos son determinantes para el rendimiento del arroz; que se cultivan en las condiciones agroclimáticas del sur de China. En la estación Ing. Cauca lucio los puntos extremos presentados en esta fase en los años 2009 y 2013 de la primera sección, estos presentaron dos días lluviosos iguales a 0.1 y 0.2 mm en el año 2009 y cuatro días con lluvias superiores a 20 mm para el año 2013; esta ausencia de precipitación afecta los valores de ks por estrés en la zona radicular y la tasa y duración del llenado de los granos. Para la segunda sección, el año 2000 también presentó un comportamiento similar a los años previamente mencionados en la primera sección de esta estación; la diferencia radica en que este año, presentó la precipitación efectiva más baja en la estación igual a 215.5 mm, siendo insuficiente para las etapas B, C y D, tomando el ejemplo de Fereres y García (2019), indican que cuando se emplea el riego deficitario se espera cierta reducción del rendimiento debido a la relación entre la ETc y el rendimiento de algunos cereales; de hecho, se ha comprobado que el déficit de agua regulado induce la maduración del fruto del olivo y en su cosecha.

La etapa final, a nivel general, las cuatro estaciones presentan picos, pero Ing.Cauca e Ing.Miranda presentan más valores de RR que en Ciat Quilichao e Independencia (Figura 6.11, 6.12, 6.13 y 6.14); este acontecimiento permite enunciar que las primeras estaciones no serán las más recomendables para el manejo de datos en la producción de arroz; puesto que presentan reducciones superiores al 20% en varios años de esta fase que se caracteriza por la maduración y senescencia (Shah et al., 2015); cuyos estadios para el arroz son susceptible a grandes pérdidas de rendimiento, debido a la disponibilidad reducida de agua (Steduto, Hsiao, Fereres y Raes, 2012). Ciat Quilichao presentó reducciones de rendimiento en el año 1997 de la primera sección, de los 30 días que dura la etapa D, los últimos 25 días exhibió disminuciones en el valor del coeficiente Ks, ya que solo presento 4 días lluviosos distribuidos a lo largo de esta etapa con dos días de 10.1 y 23.7 mm, y el año 2015 en ambas secciones

manifestaron RR pues en los últimos 24 y 13 días finales de la etapa D para la primera y segunda sección, respectivamente, presentaron valores de ks inferiores a 0.37 para la primera sección y solo dos días lluviosos para la segunda sección (Figura 6.11).

Las simulaciones realizadas para Ing. Miranda manifestaron los valores más bajos de Ks en la etapa D, en la primera sección del año 2012, los últimos 26 días exhibió un intervalo de ks entre 0.24 y 0.06 y en la segunda sección del año 1998, presentó valores de ks entre 0.2 y 0; esto indica que en la ubicación de esta estación climatológica el tipo de suelo presentó baja capacidad de retención de humedad en esta fase, pues las precipitaciones efectivas fueron superiores a 400 mm sección⁻¹. Sin embargo, para el alcance de este trabajo, dichas características de las etapas no afectaron la RR final de la estación de esos años; ya que para el 2012 la RR fue de 8.9% y para 1998 fue de 13.9%. Consistente a esto, Chaali et al. (2020), en su estudio de la arracacha, la mayor reducción del rendimiento (18.9%) se alcanzó en esta etapa bajo el escenario del Niño. Esto indica que la etapa intermedia corresponde a la producción de las raíces donde podría verse fuertemente afectada por el déficit de agua. Durante el evento de La Niña, el rendimiento de las raíces no se vio afectado (0% de reducción de rendimiento) ya que todas las necesidades de agua se satisfacen con las lluvias. Además, durante la etapa inicial (A) y desarrollo (B) no se produjeron reducciones significativas en el rendimiento de las raíces afectadas por el déficit de agua.

Una virtud de esta etapa es que termina cuando la precipitación es menor o igual a la mitad de la evapotranspiración de referencia de la zona de estudio; sin embargo, Shah et al. (2015), explican que en el caso de los cultivos perennes en climas libres de heladas; pueden crecer durante todo el año, de modo que la fecha de terminación puede tomarse como la misma que la fecha del "inicio de la estación de crecimiento". Para el alcance de este trabajo, la fecha de terminación de la etapa está determinada por el fenómeno de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) que presentan los países como Colombia, ubicados muy cerca de la línea ecuatorial y se caracteriza por la disminución de la precipitación.

Un notable ejemplo fue realizado por Moseki et al. (2019), quienes obtuvieron diferentes respuestas de rendimiento a la programación de riego de la *Jatropha curcas L.* en Bostwana a través del modelo Cropwat y concluyeron que en la fase final requiere más agua que las demás etapas; dada la baja y muy variable pluviosidad en el lugar, sólo se obtendrán rendimientos satisfactorios si se realiza el riego, cuando no se realiza ningún tipo de riego; esto da lugar a una reducción del 95% del rendimiento en la etapa tardía. Por lo tanto, recomendaron cambiar las fechas de plantación para que coincidan con las precipitaciones y también asignar agua a las etapas de desarrollo más críticas de los cultivos, lo que ayudaría a maximizar el rendimiento.

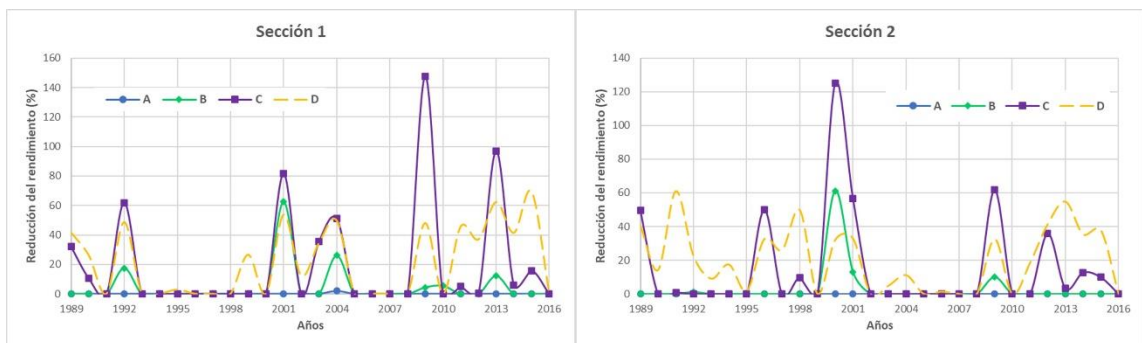


Figura 6.13. Reducción de rendimiento por etapas en ambas secciones para la estación Ing.Cauca

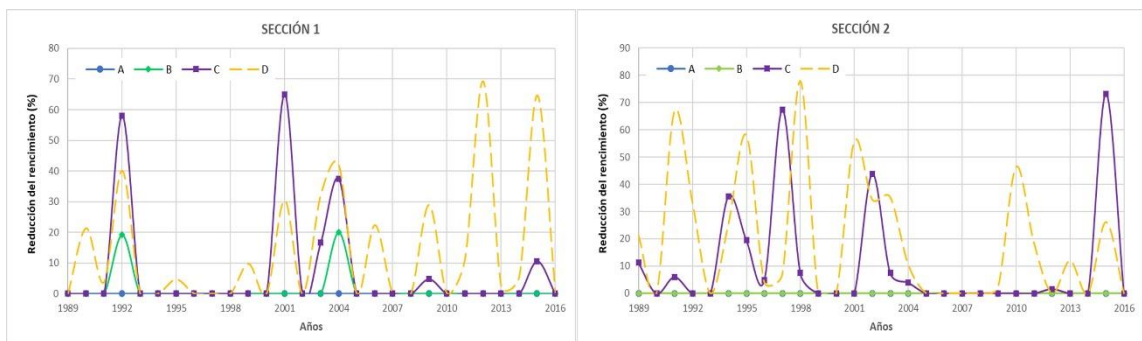


Figura 6.14.Reducción de rendimiento por etapas en ambas secciones para la estación Ing.Miranda

Finalmente, la información climática bajo la cual se produce el arroz en el sur del Valle del Cauca permite conocer su impacto en los rendimientos e identificar

etapas más críticas. Sin embargo, este tipo de información es útil; ya que determina la toma de decisiones, como: la elección de un cultivar más adecuado o posponer el establecimiento de un cultivo; o esperar una pauta climática más favorable si las condiciones actuales se consideran menos favorables. El valor añadido de este es que demuestra cómo el manejo de los datos observados puede utilizarse para generar información eficientemente procesable y contextualizada para las necesidades y toma de decisiones en un determinado lugar de estudio (Delerce et al., 2016).

6.5 Conclusiones

El programa Cropwat orienta en la correcta información del cultivo, como: la duración del ciclo, características del crecimiento, fecha de siembra e información del suelo; del cual se pudo observar que el arroz presenta “déficit hídrico” en cualquiera de sus etapas; pero es más sensible en la etapa C, como lo ilustró la estación Ing.Cauca; cuya locación presentó precipitación efectiva, evapotranspiración del cultivo y reducciones en el rendimiento mayores a otra estación. A diferencia de Ciat Quilichao que exhibió mejores características que Independencia; a pesar de estar a 17 km de esta.

El manejo de bases de datos para la producción de arroz permite distinguir que la distribución y cantidad de agua no fue óptima en varios años de la estación Ing. Cauca e Ing. Miranda; ya que presentaron los valores más altos de reducción de rendimiento no sólo por etapa sino también por estación. Siendo así, el Cropwat cumple con la función de exhibir el consumo de agua por parte del cultivo y mediante la ecuación de productividad de Doorenbos y Kassam la respuesta a la cantidad de agua proporcionada.

6.6 Literatura citada

- Abeyasiriwardena, D.S.D.Z. (2016). Yield potential, potential yield and realized yield at farmer level of cereals with special reference to rice (*Oryza sativa* L.). *Sri Lanka Journal of Food and Agriculture*. 2(1), 1 – 18. <http://doi.org/10.4038/sljfa.v2i1.20>.
- Acharjee, T. K., Van Halsema, G., Ludwig, F., Hellegers, P., & Supit, I. (2019). Shifting planting date of Boro rice as a climate change adaptation strategy to reduce water use. *Agricultural Systems*. 168, 131–143. 10.1016/j.agsy.2018.11.006.
- Akinbile, C. O., A. Ogundipe. And Davids, R.O. (2020). Crop water requirements, biomass and grain yields estimation for upland rice using CROPWAT, AQUACROP and CERES simulation models. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 22 (2), 1 – 20.
- Allen, R. G., Pereira L. S., Raes D. y Smith M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. N°56 Ed. FAO. Italia, Roma. 25 p.
- Bahrin, A. H., Nurfaida., Ridwan, I., Zul, A. F., Widiyani, N. & Kusumah, R. (2019). Management of planting system based on water balance patterns on corn plants using Cropwat 8.0 model. *Earth and Environmental Science*. 343, 012015. 10.1088/1755-1315/343/1/012015
- Boonwichai, S., Shrestha, S., Babel, M. S., Weesakul, S. & Datta, A. (2018). Climate change impacts on irrigation water requirement, crop water productivity and rice yield in the Songkhram River Basin, Thailand. *Journal of Cleaner Production*. 198, 1157–1164. 10.1016/j.jclepro.2018.07.146.
- Bouraima, A., Zhang, W. & Wei, C. (2015). Irrigation water requirements of rice using CROPWAT model in northern Benin. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 8(2), 58-64.
- Chaali, N., Ouazaa, S., Jaramillo-Barrios, C. I., Araujo Carrillo, G. A., & Ávila Pedraza, E. Á. (2020). Edaphoclimatic characterization and crop water requirement of Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft) roots in upland

- production areas. *Scientia Horticulturae*. 272, 109533. 10.1016/j.scienta.2020.109533.
- Chica, J., Tirado, Y. & Barreto, J. (2016). Indicadores de competitividad del cultivo del arroz en Colombia y Estados Unidos. *Revista de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Nariño*. 33 (2), 16-31.
- DANE y FEDEARROZ. (2017) 4º Censo Nacional Arrocerero 2016. Boletín técnico ISBN: 978-958-56286-2-5, Bogotá, Colombia.
- Delerce, S., Dorado, H., Grillon, A., Rebolledo, M.C., Prager, S.D., Patiño, V.H., Garcés, V.G y Jiménez, D. (2016). Assessing Weather-Yield Relationships in Rice at Local Scale Using Data Mining Approaches. *PloS One*. 11(8):e0161620. doi:10.1371/journal.pone.0161620.
- Doorenbos, J. y Kassam, A. H. (1980). Efectos del agua sobre el rendimiento en los cultivos. Estudios de riego y drenaje. FAO. Boletín 33. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 212 p.
- Espe, M. B., Yang, H., Cassman, K. G., Guilpart, N., Sharifi, H., & Linqvist, B. A. (2016). Estimating yield potential in temperate high-yielding, direct-seeded US rice production systems. *Field Crops Research*. 193, 123 – 132. 10.1016/j.fcr.2016.04.003.
- Ewaid, S.H., Abed, S.A. & Al-Ansari, N. (2019). Crop Water Requirements and Irrigation Schedules for Some Major Crops in Southern Iraq. *Water*. 11(4), 756. 10.3390/w11040756.
- FAO. (2017). FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. www.fao.org/faostat/es/#data.
- Fereres, E. and García-Vila, M. (2019). Irrigation management for efficient crop production. In: Savin, R., Slafer, G.A. (Eds.) *Crop Science*. Springer, New York, New York, NY, pp. 345–360.
- Frère, M. y Popov, G.F. (1986). Pronóstico agrometeorológico del rendimiento de los cultivos. Estudio FAO: Producción y protección vegetal. Núm 73. Roma: FAO.
- Hossain, M., Yesmin, S., Maniruzzaman, M. & Biswas, J. (2017). Irrigation Scheduling of Rice (*Oryza sativa L.*) Using CROPWAT Model in the Western

- Region of Bangladesh. *The Agriculturists*. 15(1), 19-27.
<https://doi.org/10.3329/agric.v15i1.33425>.
- Laouisset, M. B. and Dellal, A. (2016). Estimation of Barley (*Hordeum Vulgare L.*) Crop Water Requirements Using Cropwat Software in Ksar-Chellala Region, Algeria. *AGRIS on-line Papers in Economics and Informatics*. 8(3), 91 - 102.10.7160/aol.2016.080309.
- Lee, S. K, & Dang, T. A. (2018). Predicting future water demand for Long Xuyen Quadrangle under the impact of climate variability. *Acta Geophysica*. 10.1007/s11600-018-0176-4.
- Maqueira, L.A., Roján, O., Torres, K., Duque, D. y Torres, W. (2018). Duración de las fases fenológicas, su influencia en el rendimiento del arroz (*oryza sativa l.*) *Cultivos Tropicales*. 39 (1), 68 – 73.
- Moseki, O., Murray-Hudson, M., & Kashe, K. (2019). Crop water and irrigation requirements of *Jatropha curcas L.* in semi-arid conditions of Botswana: applying the CROPWAT model. *Agricultural Water Management*. 225, 105754. 10.1016/j.agwat.2019.105754.
- Quevedo, Y.M., Beltrán, J.I. y Barragán, E. (2019). Identification of climatic and physiological variables associated with rice (*Oryza sativaL.*) yield under tropical conditions. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 72 (1), 8699 – 8706. 10.15446/rfnam.v72n1.72076.
- Shah, P.V., Mistry, R.N, Amin, J.B., Parmar, A.M. and Shaikh, M.R.A. (2015). Irrigation Scheduling Using Cropwat. *International Journal of Advance Research in Engineering, Science & Technology(IJAREST)*. 2(4), 2394 – 2444.
- Shrestha, S., Gyawali, B. & Bhattarai, U. (2013). Impacts of climate change on irrigation water requirements for rice–wheat cultivation in Bagmati River Basin, Nepal. *Journal of Water and Climate Change*. 4(4), 422– 439. 10.2166/wcc.2013.050.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. y Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua, Estudio Fao: Riego y Drenaje 66. Roma, Italia.

- Surendran, U., Sushanth, C.M., Mammen, G. and Joseph, E. J. (2017). FAO-CROPWAT model-based estimation of crop water need and appraisal of water resources for sustainable water resource management: Pilot study for Kollam district humid tropical region of Kerala, India. *Current Science*. 112 (1), 76 – 86. 10.18520/cs/v112/i01/76-86.
- Suryadi, E., Ruswandi, D., Dwiratna, S and Prawiranegara, B.M.P. (2019). Crop Water Requirements Analysis Using Cropwat 8.0 Software in Maize Intercropping with Rice and Soybean. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*. 9 (4), 1364 – 1370. 10.18517/ijaseit.9.4.6868.
- Toro, T.A.M., Arteaga, R.R., Vásquez, P.M.A. y Ibáñez, C.L.A. (2016). Requerimientos de riego y predicción del rendimiento en el cultivo de banano mediante un modelo de simulación en el Urabá antioqueño, Colombia. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 7(6), 105-122.
- Troncoso-Sepúlveda, R. (2019). Transmisión de los precios del arroz en Colombia y el mundo. *Lecturas De Economía*. (91), 151-179. <https://doi.org/10.17533/udea.le.n91a05>.
- Valencia, J.M., García, C.E y Montero, D. (2017). Vegetation anomalies associated with the ENSO phenomenon in the Cauca river valley, Colombia. *Revista de Teledetección*. 50, 89 – 99. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7715>.
- Zhao, H., Mo, Z., Lin, Q., Pan, S., Duan, M., Tian, H., Wang, S. y Tang, X. (2020). Relationships between grain yield and agronomic traits of rice in southern China. *Chilean Journal Of Agricultural Research*. 80(1), 72 – 79. 10.4067/S0718-58392020000100072.

7 ANEXOS

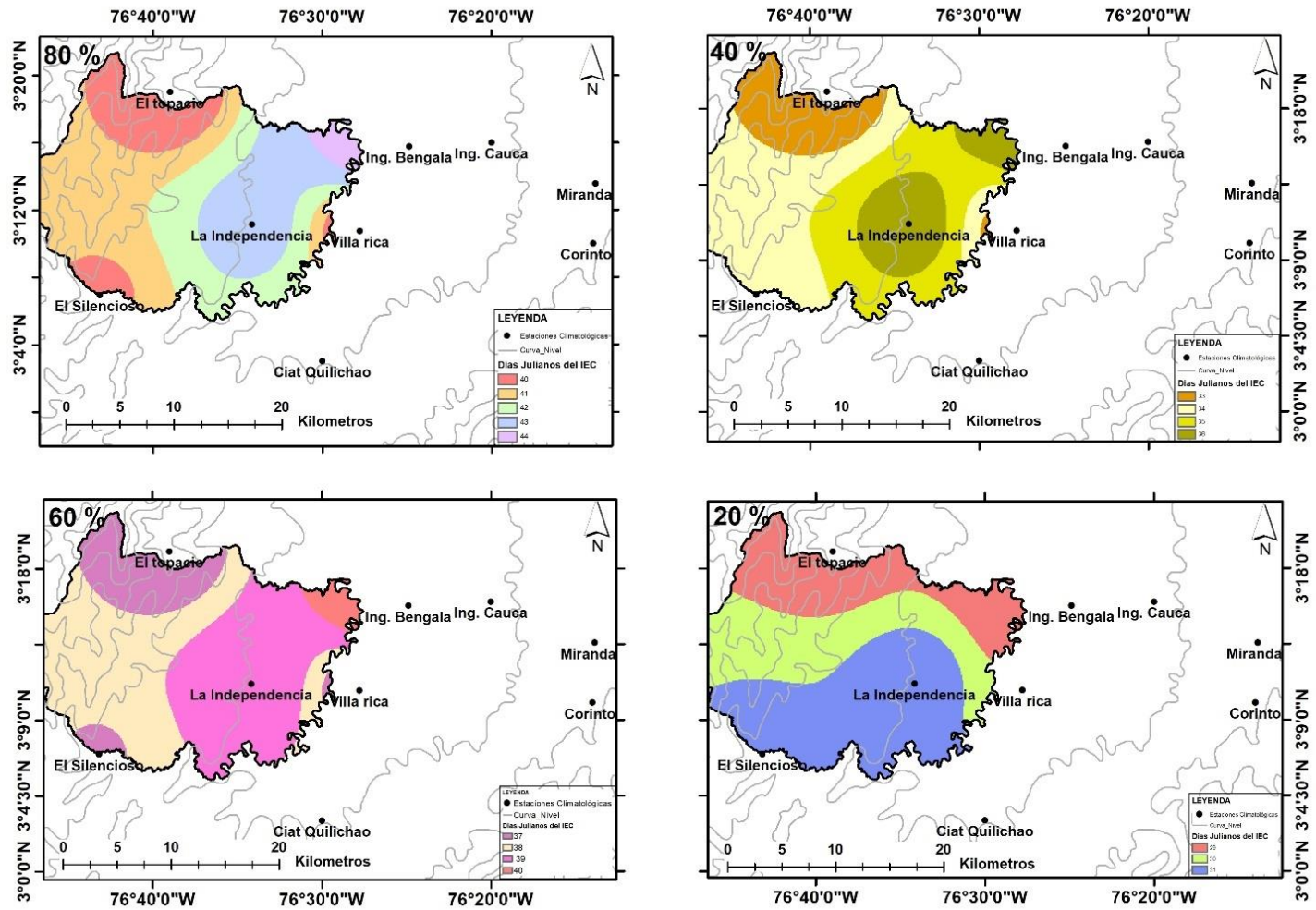


Figura 7.1. Distribución espacial del IEC del primer criterio de la primera época del año

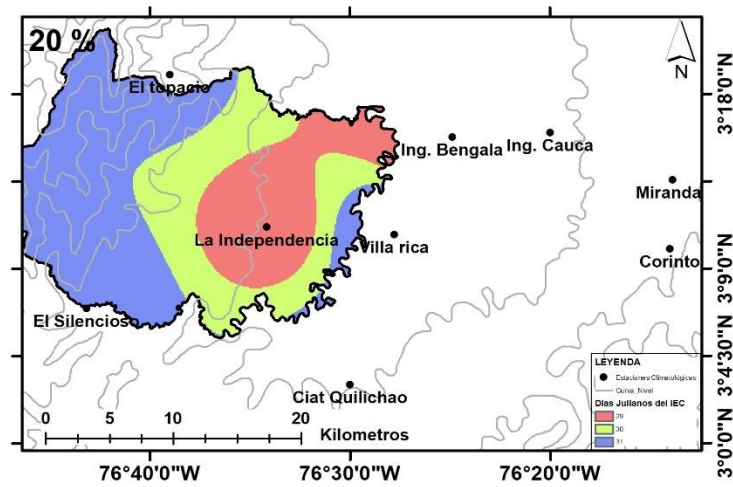
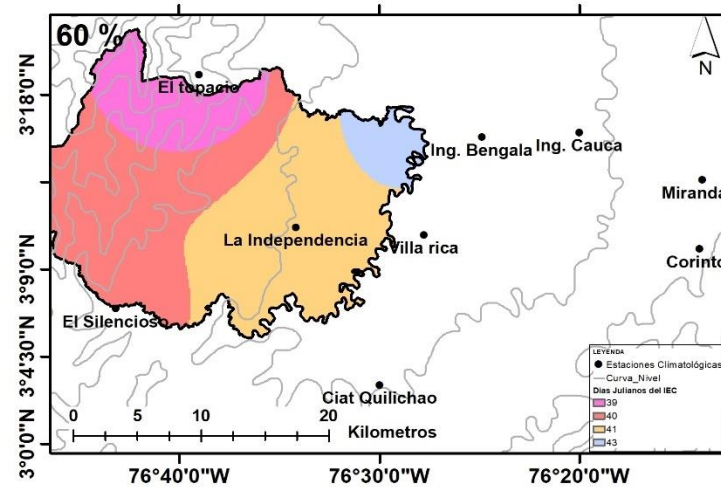
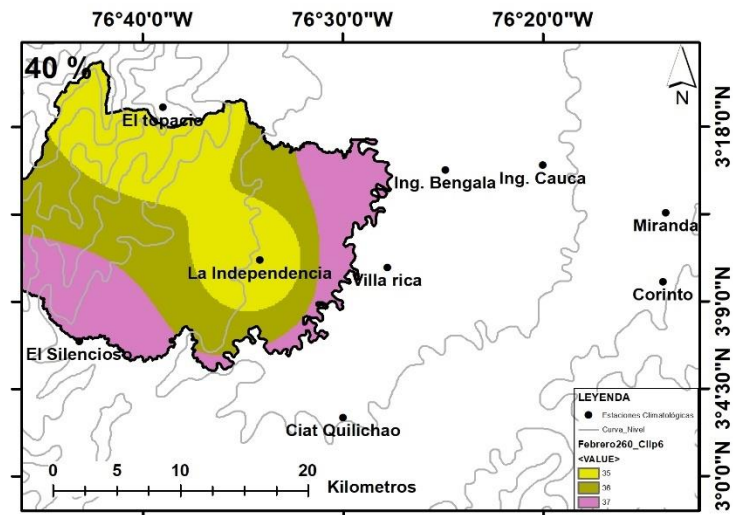
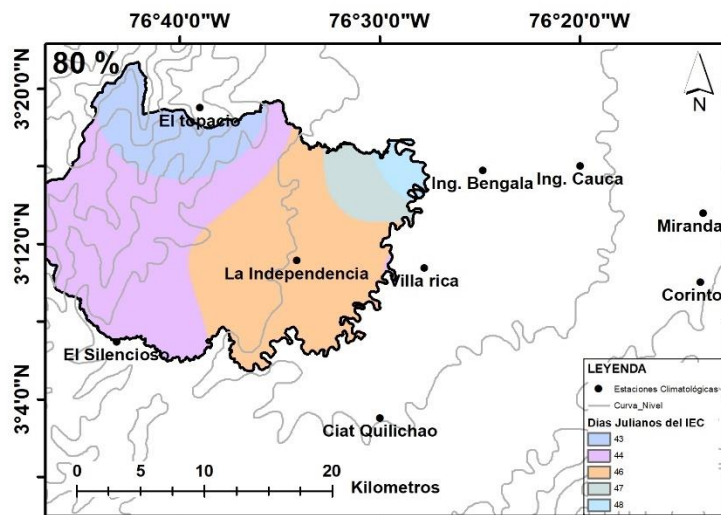


Figura 7.2. Distribución espacial del IEC del segundo criterio de la primera época del año

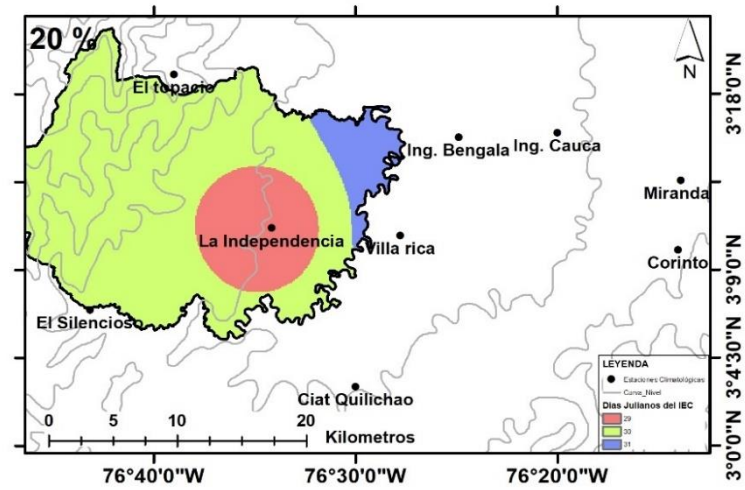
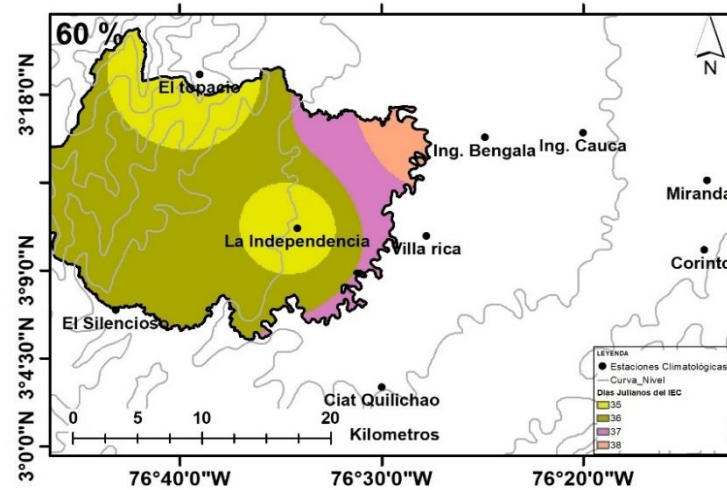
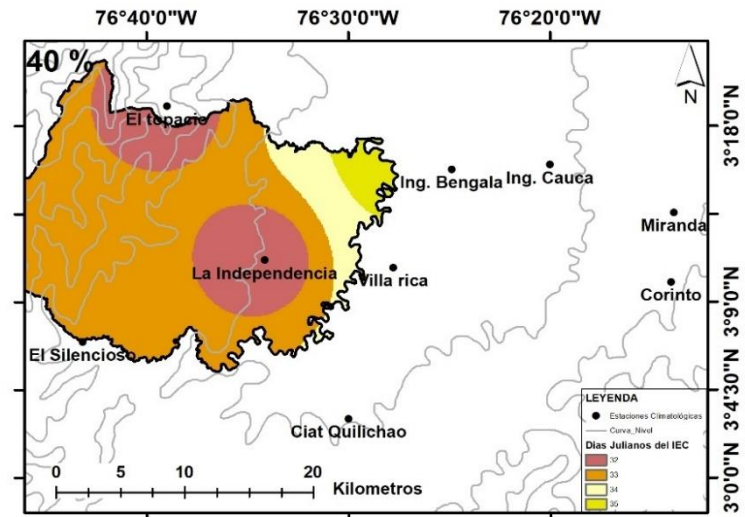
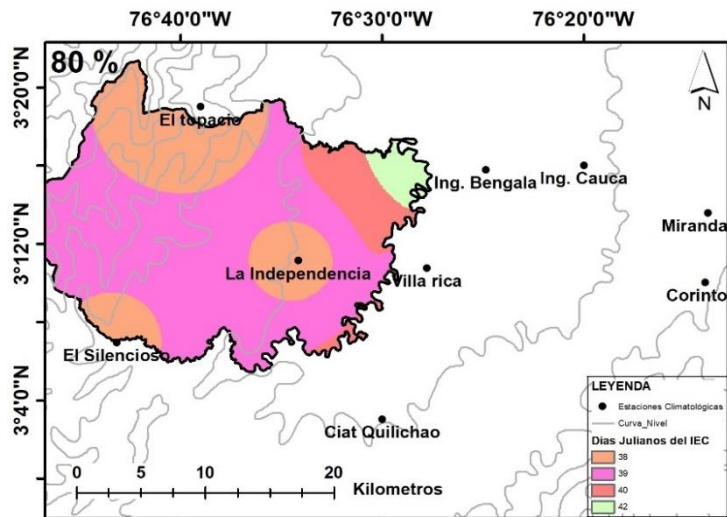


Figura 7.3. Distribución espacial del IEC del tercer criterio de la primera época del año

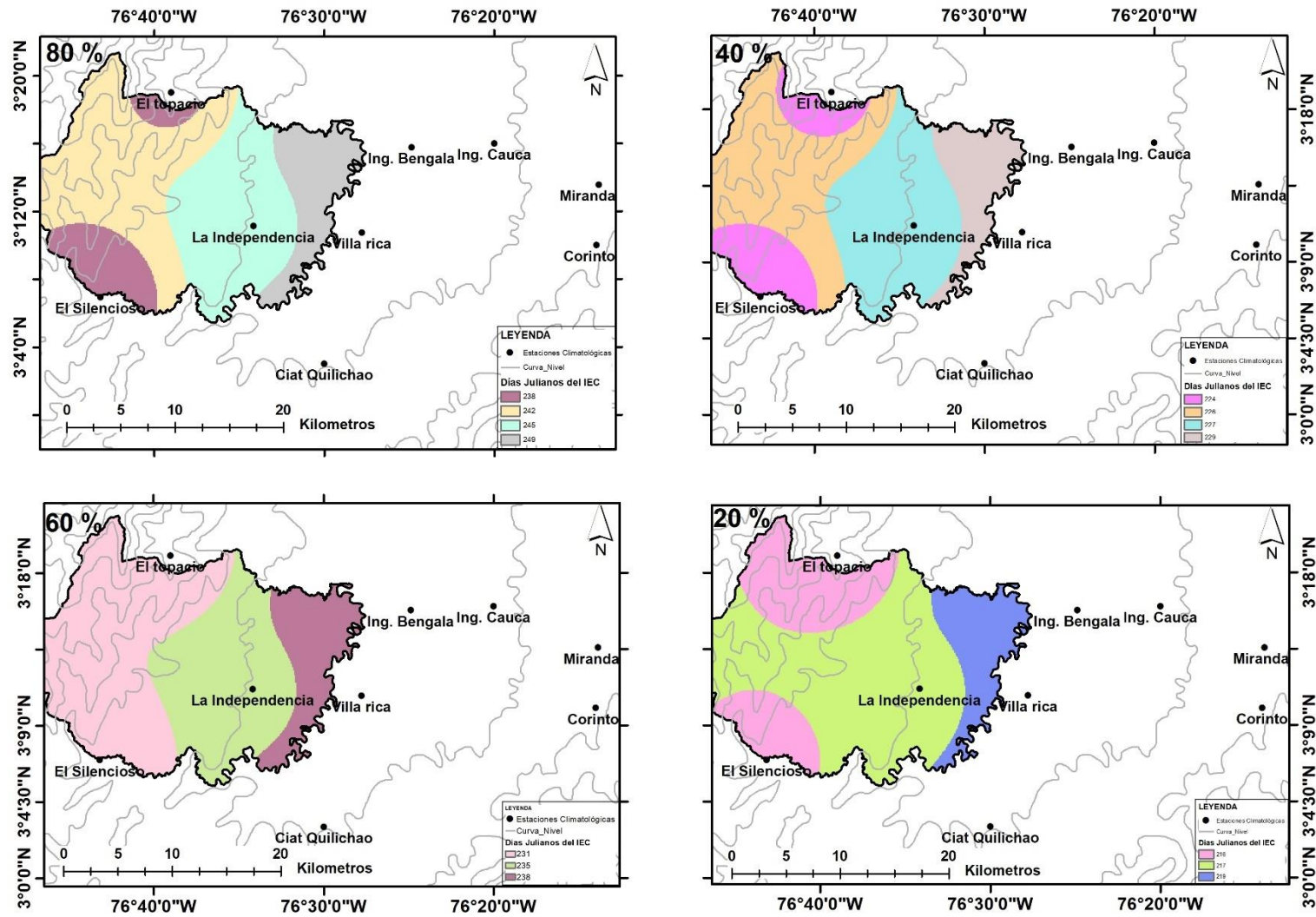


Figura 7.4. Distribución espacial del IEC del primer criterio de la segunda época del año

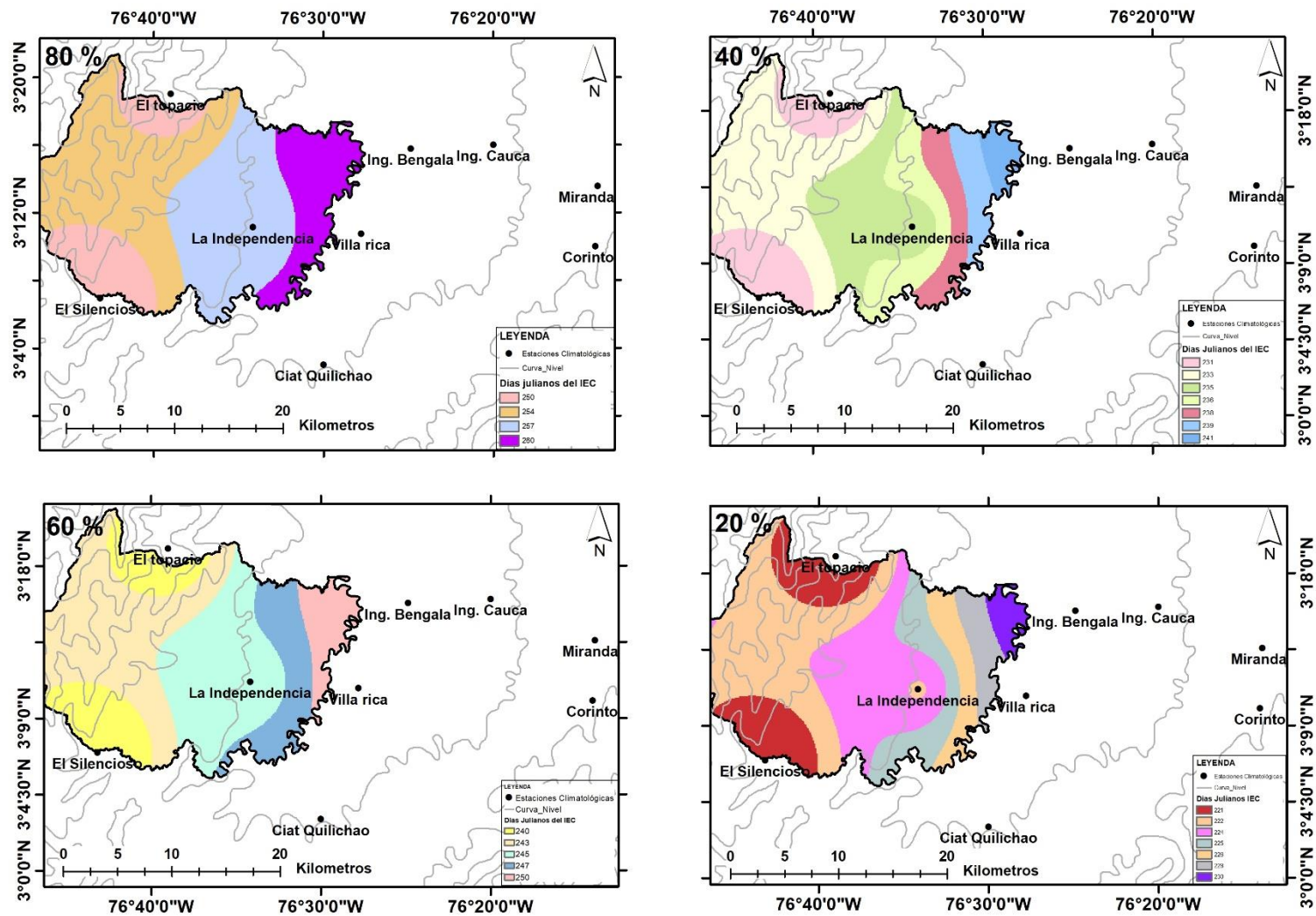


Figura 7.5. Distribución espacial del IEC del segundo criterio de la segunda época del año

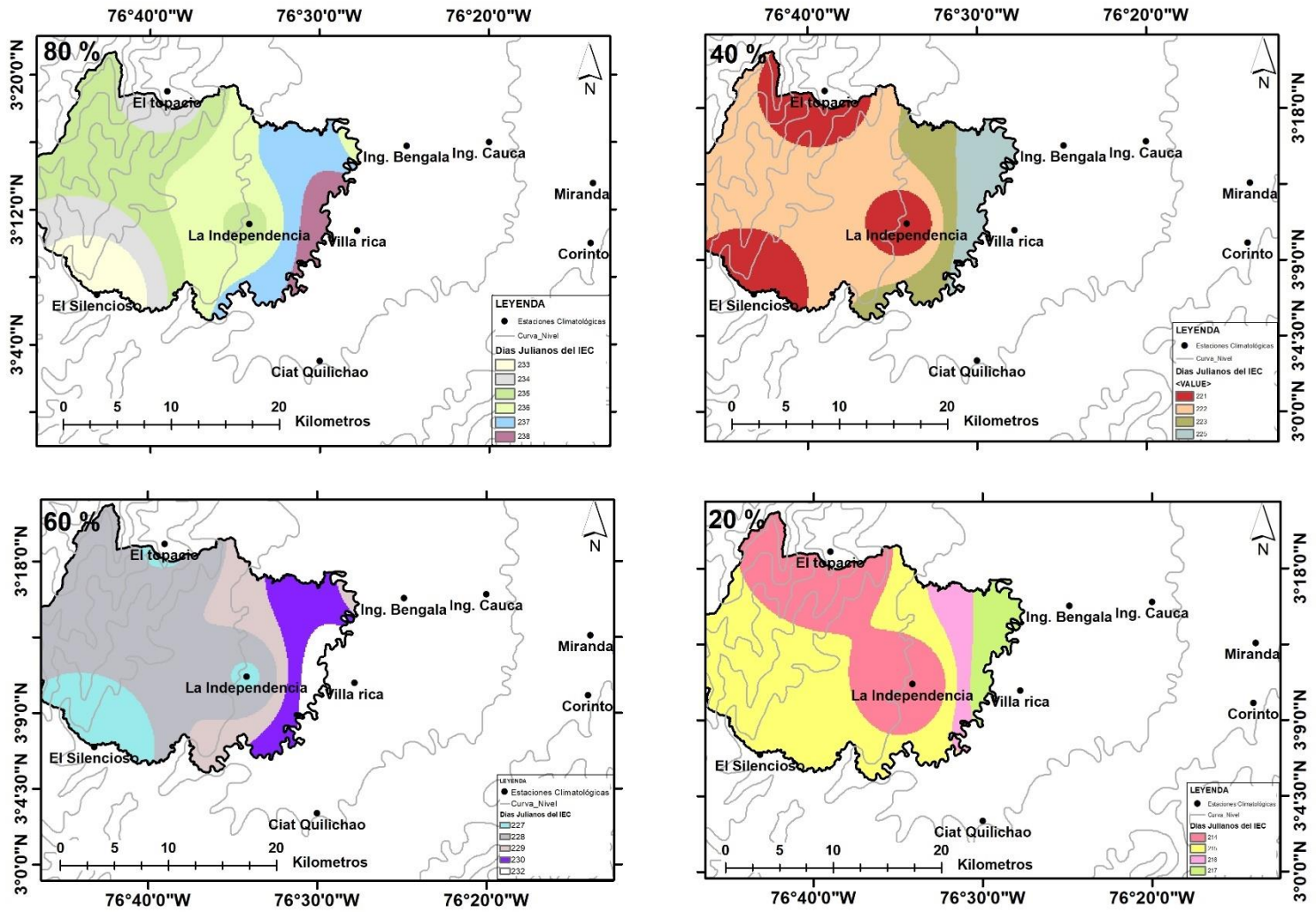


Figura 7.6. Distribución espacial del IEC del tercer criterio de la segunda época del año