



2014

**VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LA
SUSCEPTIBILIDAD A SEQUÍAS METEOROLÓGICAS
EN LA CUENCA DEL RÍO DAGUA, VALLE DEL
CAUCA**



Nathalia
González López



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LA
SUSCEPTIBILIDAD A SEQUÍAS METEOROLÓGICAS EN
LA CUENCA DEL RÍO DAGUA, VALLE DEL CAUCA**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título
de ingeniera agrícola

Autor:
NATHALIA GONZÁLEZ LÓPEZ

Director: **YESID CARVAJAL ESCOBAR, Ph.D.**

Codirector: **WILMAR LOAIZA CERÓN, M.Sc.**

**SANTIAGO DE CALI
DICIEMBRE DE 2014**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del evaluador 1

Firma del evaluador 2

A Dios...

Quien me ha dado la vida y me permitió llegar a este punto, me dio la fortaleza para continuar en momentos difíciles y puso en mi camino a las personas indicadas para que me apoyaran y las oportunidades que hoy me permitieron culminar una etapa más en mi vida.

A mi familia...

Mis padres por ser mi guía y fuentes de motivación, a mi madre Blanca Irene, por sus consejos, su ejemplo de perseverancia y constancia y su valor para salir adelante, a mi padre Gildardo, Por haberme apoyado en todo momento, por su comprensión y paciencia, a mi hermano Sebastián por su apoyo y compañía, pero más que nada a todos ellos por su amor incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la inteligencia, sabiduría, paciencia y la capacidad para culminar este proyecto.

A mis padres y hermano por estar siempre ahí para mí, por su apoyo y su amor, a mi sobrina por alegrarme con sus travesuras en momentos difíciles.

A mis tíos Freddy y Gloria por su constante apoyo y colaboración durante toda mi carrera universitaria.

Al profesor Yesid Carvajal por brindarme la oportunidad de trabajar con él, por confiar en mi trabajo y por el acompañamiento en la realización de esta investigación.

A Wilmar Loaiza por su tiempo, dedicación, asesoría y apoyo constante durante todo el trabajo, su orientación y paciencia permitieron culminar satisfactoriamente esta investigación.

Al grupo de investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos y Suelos - IREHISA, de la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR), por su apoyo técnico y personal, a todos los compañeros que me brindaron su colaboración y contribuyeron en mi formación profesional, principalmente a Alexander Gaviria.

A la Universidad del Valle y a todos los profesores que hicieron parte de mi carrera universitaria, principalmente a aquellos del plan de Ingeniería Agrícola que compartieron sus conocimientos y experiencias para brindarme una formación integral.

A mis amigos, compañeros y futuros colegas, principalmente Álvaro J. Ávila y Claudia P. Gutiérrez que me acompañaron en momentos importantes e hicieron de esta experiencia especial e inolvidable, agradezco también a todos aquellos que de una u otra manera contribuyeron a la culminación de esta etapa que representa un logro más en el objetivo de mis metas.

RESUMEN

La escasez de agua en cualquier país es siempre preocupante; pero en aquellos donde las actividades económicas tienen mayor dependencia del clima, produce consecuencias sociales, humanas y ambientales de especial gravedad. En esta investigación se analizó la susceptibilidad a sequías meteorológicas en la cuenca del río Dagua, la cual representa un papel importante en la inserción económica de Colombia y en ella se concentra la actividad agrícola de pequeños productores que constituyen parte de la oferta alimentaria del país y de la canasta familiar de la región.

La caracterización de la sequía se realizó con base en su intensidad, magnitud, duración y frecuencia obtenidas a partir del cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) para las agrupaciones semestral y anual. Los resultados indicaron que durante el período evaluado, todas las series registraron al menos un evento de sequía, siendo las zonas próximas al enclave subxerofítico las que presentaron mayor frecuencia a sequía extremadamente fuerte en los eventos seleccionados. Es importante resaltar que en la parte baja de la cuenca se calcularon intensidades menores a -2,00, pero no se podría asegurar que se trate de eventos de sequías extremas, dada a la oferta hídrica de la zona; pues es la más próxima al océano Pacífico y presenta un régimen monomodal de precipitaciones con un promedio anual multianual que supera los 6.000 mm; por tanto es necesario involucrar otras variables como temperatura, evapotranspiración y demanda del recurso hídrico para tener mayor certeza en este comportamiento.

Para el análisis de susceptibilidad se involucraron las variables de intensidad y frecuencia de sequías fuertes, el grado de pendiente, la proporción de unidades naturales, la conectividad de fragmentos, el grado de erosión y los conflictos por usos del suelo, las cuales se priorizaron de acuerdo al método multicriterio; los resultados indicaron que los factores relacionados directamente con el fenómeno son los de mayor importancia. En general el grado de susceptibilidad a sequías meteorológicas oscilo entre medio y bajo; aproximadamente el 55% de la cuenca presentó susceptibilidad media, el 40% baja y menos del 10% alta.

Palabras claves: cuenca del río Dagua, sequías meteorológicas, Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), susceptibilidad.

PRESENTACIÓN DEL TRABAJO

El trabajo está organizado en cinco partes principales:

1. Se presenta una introducción a la problemática de la Variabilidad Climática (VC), el Cambio Climático (CC) y el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS), resaltando la incidencia en el país y los impactos de las sequías. Se indica brevemente la importancia del estudio, para posteriormente definir los objetivos y el alcance de la investigación. Finalmente en esta sección se resaltan algunos de los principales trabajos realizados en torno a las sequías.
2. A esta sección pertenecen los marcos de referencia: teórico, contextual y conceptual, en los cuales se consigna información relevante para el desarrollo de la investigación. Involucra desde definiciones y problemáticas hasta reflexiones. Se describen los diferentes métodos empleados para cuantificar las sequías y las variables a partir de las cuales es posible caracterizarlas, lo cual permitió definir la metodología usada.
3. Se hace una breve descripción de la cuenca del río Dagua y se presenta la metodología usada. Ésta a su vez se dividió en cuatro fases: la primera, corresponde a estudios previos de la información, en la segunda se explica los métodos usados para evaluar las sequías meteorológicas, en la tercera se exponen los criterios usados para analizar la susceptibilidad a sequías y la última fase corresponde a la zonificación de las áreas susceptibles, con el fin de darle cumplimiento a los objetivos planteados.
4. Reúne los resultados encontrados y el análisis que se realizó; el orden de estos, responde a las fases en las que se dividió la metodología, por ello inicialmente se presenta el análisis exploratorio de datos, el confirmatorio y el de frecuencia; posteriormente se evaluó la sequía a partir de su intensidad, magnitud, duración, frecuencia de ocurrencia y se estimaron los umbrales de precipitación. Finalmente se realizó la zonificación de la susceptibilidad a sequías meteorológicas de eventos puntuales a partir de la información obtenida del SPI y del análisis multicriterio.
5. La parte final del documento está conformada por las conclusiones generales de la investigación, algunas recomendaciones y futuras líneas de trabajo; y finalmente, se cierra con la bibliografía utilizada en el estudio.

LISTADO DE SIGLAS

ACD.	Análisis confirmatorio de datos.
AED.	Análisis exploratorio de datos.
AF.	Análisis de frecuencia.
CC.	El Cambio Climático.
CCD.	Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la Desertificación y la Sequía.
CCG.	Coeficiente de Correlación de la probabilidad Graficada.
CCI.	Cámara Colombiana de la Infraestructura.
CENICAFE.	Centro Nacional de Investigaciones de Café.
CEPAL.	Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
CICH.	Comisión Interinstitucional de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá.
CIIFEN.	Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño.
CMI.	índice de Humedad del Cultivo, por sus siglas en inglés: Crop Moisture Index.
CMNUCC.	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
CONAGUA.	Comisión Nacional del Agua.
CORPOICA.	Corporación Colombiana De Investigación Agropecuaria.
COSUDE.	Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación.
CR.	Razón de Consistencia, por sus siglas en inglés: Consistency Ratio.
CVC.	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.
DF.	Datos Faltantes.
ECM.	Error Cuadrático Medio.
EEA.	Error Estándar de Ajuste.

ENOS.	El Niño-Oscilación del Sur.
FAO.	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, por sus siglas en inglés: Food and Agriculture Organization.
FDP.	Funciones de distribución de probabilidad.
FECYT.	Fundación Española para la Ciencia y Tecnología.
GIRH.	Gestión Integrada del Recurso Hídrico.
IDEAM.	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
IGAC.	Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
INETER.	Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales.
IPCC.	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, sus siglas en inglés: Intergovernmental Panel on Climate Change.
MDGIF.	Fondo para acelerar el logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, por sus siglas en inglés: Millennium Development Goals Achievement Fund.
MDGIF.	Fondo para acelerar el logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, por sus siglas en inglés: Millennium Development Goals Achievement Fund.
NADM.	Monitor Sequías en América del Norte, por sus siglas en inglés: North American Drought Monitor.
NOAA.	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, por sus siglas en inglés: National Oceanic and Atmospheric Administration.
OMM.	Organización Meteorológica Mundial.
OPS.	Organización Panamericana de la Salud.
PE.	Precipitación Efectiva.
PIB.	Producto Interno Bruto.
PNUD.	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
PNUMA.	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
PPN.	Índice Normalizado de Precipitación,

PSDI.	Índice de severidad de la sequía de Palmer, por sus siglas en inglés: Palmer Drought Severity Index.
RI.	Índice nacional de lluvia.
SAT.	Sistemas de Alerta Temprana.
SDDI.	Índice de sequía oferta-demanda.
SEMARNAT.	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
SEP.	Valor estandarizado de EP, por sus siglas en inglés: Standardized value of EP
SI.	Índice de sequedad.
SIG.	Sistemas de Información Geográfica.
SPEI.	Índice de precipitación evapotranspiración estandarizada.
SPI.	Índice estandarizado de precipitación, por sus siglas en inglés: Standardized Precipitation Index.
SUBDERE.	Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo.
UNESCO.	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, por sus siglas en inglés: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
USAID.	Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional.
VC.	Variabilidad Climática.
ZCIT.	Zona de Confluencia Intertropical.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	2
1. JUSTIFICACIÓN	5
2. OBJETIVOS	8
2.1 Objetivo General	8
2.2 Objetivos Específicos	8
3. ANTECEDENTES	9
4. MARCO TEÓRICO	14
4.1 Estado del recurso hídrico, Variabilidad Climática Y Cambio Climático	14
4.2 El Niño-Oscilación del Sur	15
4.3 La sequía	17
4.4 Métodos para caracterizar las Sequías	20
4.4.1 Cuantiles de precipitación (CP)	20
4.4.2 Porcentaje de la Precipitación Media (PPM)	21
4.4.3 Precipitación Efectiva (EP)	21
4.4.4 Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI)	21
4.4.5 Porcentaje Normalizado de Precipitación (PPN)	22
4.4.6 Índice nacional de lluvia (RI)	23
4.4.7 Índice de sequedad (SI)	23
4.4.8 Índice de precipitación evapotranspiración estandarizada (SPEI)	23
4.4.9 Índice de sequía oferta-demanda (SDDI)	23
4.4.10 Índice de Precipitación Estandarizada (SPI)	24
4.5 Sistemas de Información Geográfica	25
5. MARCO CONTEXTUAL	27
5.1 LATINOAMÉRICA	28
5.2 Colombia	29
5.3 Dagua	31

6. MARCO CONCEPTUAL	32
6.1 Sequía meteorológica	32
6.2 Grado de erosión del suelo	32
6.3 Grado de pendiente	33
6.4 Cobertura de suelo	33
6.5 Conflictos por el uso del suelo	34
6.6 Susceptibilidad	35
7. METODOLOGÍA	37
7.1 Caracterización de la zona de estudio	38
7.1.1 Descripción y localización de la cuenca de estudio	38
7.1.2 Selección y recopilación de la información necesaria	39
7.2 Estudios preliminares de la información	41
7.2.1 Análisis exploratorio y confirmatorio de datos de Precipitación	41
7.2.2 Análisis de frecuencia y probabilidad	42
7.3 Evaluación de la sequía Meteorológica	43
7.3.1 Selección del índice	43
7.3.2 Índice De Precipitación Estandarizado SPI	44
7.4 Evaluación multicriterio para analizar la susceptibilidad a sequías meteorológicas	48
7.5 Zonificación	50
7.5.1 Estandarización de variables	50
7.5.2 Mapa de susceptibilidad a sequías meteorológicas	51
8. RESULTADOS Y ANÁLISIS	53
8.1 Estudios preliminares de la información	53
8.1.1 AED y ACD de la precipitación mensual	54
8.1.2 AF para series de precipitación mínimas	57
8.2 Evaluación de la sequía meteorológica	59

8.2.1	Eventos de sequía, intensidades y magnitudes.....	59
8.2.2	Frecuencia de ocurrencia de eventos de sequía	61
8.2.3	Umbrales de precipitación (mm) que indican el inicio de sequía	70
8.2.4	Cobertura espacial de la sequía.....	72
8.3	Evaluación multicriterio	80
8.4	Susceptibilidad a sequías meteorológicas	81
9.	CONCLUSIONES	87
10.	RECOMENDACIONES	89
11.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	90
12.	BIBLIOGRAFÍA	91

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Clasificación del PDSI.	22
Tabla 2.	Clasificación de la sequía de acuerdo a valores del PPN.	22
Tabla 3.	Estaciones hidroclimatológicas de la zona de estudio.	40
Tabla 4.	Criterios decisorios de las pruebas de ajuste	42
Tabla 5.	Análisis multiobjetivo de los Índices de Sequía.	43
Tabla 6.	Clasificación del SPI.	46
Tabla 7.	Clasificación de las sequías de acuerdo a la magnitud del SPI.	47
Tabla 8.	Escala numérica para la valoración de importancia.	49
Tabla 9.	Escala de evaluación general.	50
Tabla 10.	Escala de evaluación de las variables.	51
Tabla 11.	Resultados del porcentaje de DF y del análisis descriptivo numérico.	55
Tabla 12.	Valores de intensidad promedio, mínima y máxima.....	59
Tabla 13.	Magnitud de los diez eventos máximos para la agrupación semestral.	62
Tabla 14.	Magnitud de los diez eventos máximos para la agrupación anual.	62
Tabla 15.	Resultados del análisis multicriterio para cada factor condicionante	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de geográfica de Colombia y sus regiones naturales. -----	15
Figura 2. Secuencia de sucesos de sequía y de sus efectos. -----	19
Figura 3. Esquema metodológico. Elaboración propia. -----	37
Figura 4. Localización de la cuenca del río Dagua. -----	39
Figura 5. Localización de las estaciones seleccionadas para el estudio. -----	53
Figura 6. Resultados del análisis gráfico - estación Bosque de Yotoco. -----	54
Figura 7. Distribución espacial de las precipitaciones mínimas semestrales. -----	57
Figura 8. Distribución espacial de las precipitaciones mínimas anuales. -----	58
Figura 9. Transcurso del SPI semestral de 1982 a 2011 en la estación Aguacatal. -----	60
Figura 10. Transcurso del SPI anual de 1982 a 2011 en la estación Teresita. -----	60
Figura 11. Ocurrencia (%) de eventos de sequía según su magnitud. -----	61
Figura 12. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía leve - semestral. -----	63
Figura 13. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía leve - anual. -----	64
Figura 14. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía poco fuerte- semestral. -----	65
Figura 15. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía poco fuerte - anual. -----	65
Figura 16. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía fuerte - semestral. -----	66
Figura 17. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía fuerte - anual. -----	67
Figura 18. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía muy fuerte - semestral. -----	68
Figura 19. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía muy fuerte - anual. -----	68
Figura 20. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía extremadamente fuerte - semestral. ---	69
Figura 21. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía extremadamente fuerte - anual. -----	70
Figura 22. Distribución de umbrales de precipitación (mm) semestral. -----	71
Figura 23. Distribución de umbrales de precipitación (mm) anual. -----	71
Figura 24. Porcentaje de localidad de sequía en el período evaluado - semestral. -----	72
Figura 25. Porcentaje de localidad de sequía en el período evaluado - anual. -----	73
Figura 26. SPI semestral en las agrupaciones seleccionadas de 1992. -----	75
Figura 27. SPI anual en las agrupaciones seleccionadas de 1992. -----	76
Figura 28. SPI semestral en las agrupaciones seleccionadas período 2009 - 2010. -----	78
Figura 29. SPI anual en las agrupaciones seleccionadas período 2009 - 2010. -----	79
Figura 30. Grado de susceptibilidad a sequías meteorológicas SPI semestral de 1992 -----	81
Figura 31. Grado de susceptibilidad a sequías meteorológicas SPI anual de 1992. -----	82
Figura 32. Grado de susceptibilidad a sequías meteorológicas SPI semestral 2009-2010. ---	83
Figura 33. Grado de susceptibilidad a sequías meteorológicas SPI anual 2009-2010. -----	84

LISTA DE ANEXOS

- Anexo 1. Análisis exploratorio y confirmatorio de datos.
- Anexo 2. Análisis de frecuencia de series de precipitación mínimas.
- Anexo 3. Evaluación multicriterio.
- Anexo 4. Guía para la clasificación numérica de los factores condicionantes.
- Anexo 5. Resultados del SPI. Documento de Excel.
- Anexo 6. Magnitudes máximas y transcurso del SPI.
- Anexo 7. Espacialización de la intensidad del SPI para los períodos seleccionados.
- Anexo 8. Cartografía de los factores condicionantes.

Donde haya un árbol que plantar,
plántalo tú.

Donde haya un error que enmendar,
enmiéndalo tú.

Donde haya un esfuerzo que todos
esquivan, hazlo tú.

Se tú el que aparta la piedra del
camino".

Gabriela Mistral



INTRODUCCIÓN

En los últimos 50 años la población mundial ha pasado de 3.000 millones de personas en 1959 a 7.000 millones en 2011. En los próximos 40 años se incrementará otro 50%, alcanzando una cifra cercana a los 9.100 millones de habitantes en 2050. Responder a la demanda de esta población triplicada supondrá una enorme presión sobre los sectores agrícola, forestal y pesquero para suministrar alimentos, forraje y fibra, además de ingresos, empleo y otros servicios esenciales del ecosistema. Ahora bien, todos estos sectores deben responder, a su vez, al reto del CC y soberanía alimentaria (Fondo para acelerar el logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (MDGIF), 2012). El clima como una manifestación media de los elementos meteorológicos es variable y está ligado a la ocurrencia de procesos naturales, y/o al forzamiento antrópico, siendo la precipitación el elemento más variable (Paredes, 2012). El CC y la VC representan uno de los grandes retos a los que se enfrenta la humanidad, ya que se encuentran asociados a diferentes eventos extremos que generan fuertes impactos en la dinámica socio-económica de una región. La VC puede generar condiciones lluviosas en algunas regiones y sequías en otras (Argeñal, 2010), estas alteraciones y las provocadas por el CC suelen evaluarse y pronosticarse a partir del análisis del fenómeno ENOS, en sus dos fases: El Niño y La Niña.

El CC podría aumentar las precipitaciones de lluvia intensas y el riesgo a inundaciones, generando problemas sociales, de infraestructura y calidad del agua; adicionalmente el aumento de las temperaturas afectaría también las propiedades físicas, químicas y biológicas de los lagos y ríos de agua dulce, impactando numerosas especies, lo que dificultaría un desarrollo sostenible (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2007). Esta situación aumenta el riesgo frente a fenómenos naturales que son considerados como “amenazas” debido a que son un conjunto de elementos y factores naturales que al interactuar entre sí, son “potencialmente peligrosos” cuando están asociados a una población y su a medio construido (Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE), 2011).

Existe una preocupación internacional debido al aumento alarmante en la frecuencia y severidad de desastres naturales. De acuerdo con Bass *et al.* (2008), un promedio de 240 millones de personas, se han visto afectadas por desastres naturales por año entre el 2000 y el 2005. Durante cada uno de estos seis años, estas catástrofes cobraron la vida de aproximadamente 80.000 personas y provocaron daños estimados cerca de 80 mil millones de dólares. Proyecciones realizadas por el IPCC (2007), esperan que en América Latina hasta mediados del siglo, los aumentos de temperatura y las correspondientes disminuciones de la humedad del suelo originen una sustitución gradual de los bosques tropicales por las sabanas en el Este de la Amazonía, la vegetación semiárida por vegetación de tierras áridas, y posibles pérdidas de diversidad biológica, con la consecuente extinción de especies en muchas áreas, disminución en la productividad de algunos cultivos y con ello la productividad pecuaria, afectando la soberanía alimentaria; adicionalmente los cambios en las tendencias de la precipitación y la desaparición de los glaciares, afectarían notablemente la disponibilidad de agua para el consumo humano, agrícola e hidroeléctrico.

Las condiciones topográficas de Colombia, su clima e hidrología lo hacen propenso a fenómenos de erosión, deslizamientos, avalanchas, desbordamientos, inundaciones, huracanes y tormentas (Quintero, Carvajal y Aldunce, 2012). Estudios realizados por Bedoya, Contreras y Ruiz (2010), indican que El Niño afecta significativamente la hidrología del país, provocando reducciones hasta del 40% en algunas zonas para el trimestre diciembre-enero-febrero. Adicionalmente la mayor parte de la población se encuentra en la parte alta de las cordilleras, donde se prevén problemas de escasez hídrica e inestabilidad de suelos. El país tiene una alta recurrencia de eventos extremos, con una gran y creciente incidencia de emergencias asociadas al clima; escenarios de CC muestran tendencias a un aumento de la temperatura media entre 2 y 4°C al 2070 y una modificación de las condiciones hidrológicas, con reducciones de la precipitación en algunas regiones hasta del 30% (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2010). La afectación del régimen de lluvias por El Niño no sigue un patrón común, por el contrario, es diferencial a lo largo y ancho del territorio nacional. Sin embargo, en términos generales, se ha podido identificar que, cuando se presenta, hay déficit en los volúmenes de precipitación en las regiones Andina, Caribe y en la parte norte de la región Pacífica (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2012).

La agricultura está ligada a los ciclos naturales de la radiación solar, lluvia y temperatura, los cuales pueden ser modificados por el cambio global, afectando la productividad, el desarrollo de los cultivos, las prácticas de manejo, el régimen de humedad de los suelos, la oferta y demanda de recursos hídricos de las zonas de riego. La región de América Latina y el Caribe es una de las más ricas y variadas del planeta, siendo mega-biodiversa. Se encuentra entre los océanos Atlántico y el Pacífico, cuenta con la mayor reserva hidrológica (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), 2006). Sin embargo alrededor de 3/4 partes de las tierras áridas, semiáridas y tropicales secas de América Latina han sufrido de una u otra forma procesos de desertificación. Se estima que en América del Sur la superficie afectada alcanza 250 millones de ha y en Centroamérica 63 millones de ha (Morales, C. 2005).

El CC está ampliamente aceptado como una realidad, que puede provocar un aumento general de las temperaturas y una acentuación de los períodos de sequía. Las evidencias de estos períodos cada vez más frecuentes, son directamente observables sobre las especies vegetales, que pueden sufrir un déficit hídrico (Domingo et al., 2008). Adicionalmente las sequías son las que tienen mayor impacto económico y pueden afectar al mayor número de personas; los terremotos y ciclones pueden tener un gran intensidad física pero son de duración corta y su impacto geográfico es limitado, el número de muertes ocasionadas por dichos desastres puede ser alto en áreas densamente pobladas. En contraste, las sequías afectan grandes extensiones geográficas, llegando a cubrir países enteros o regiones continentales, y pueden durar desde varios meses hasta años; impactando directa y significativamente la producción alimentaria y la economía en general (Morales, J., 2005).

La cuenca del río Dagua, ubicada en el departamento del Valle del Cauca, en la región andina, no es ajena a estos problemas, presenta corrientes de aire en dos direcciones, del océano hacia el continente, provenientes del océano Pacífico con dirección suroccidente y nororiente, por lo tanto los cambios en el clima provocados por el ENOS afectan esta zona, es por ello que el desarrollo del estudio: variabilidad espacio-temporal de la susceptibilidad a sequías meteorológicas en la cuenca del río Dagua, tuvo como objetivo analizar espacial y temporalmente las sequías meteorológicas asociadas a la fase cálida de ENOS, a partir de información meteorológica, cobertura de suelo, topografía, grado de erosión y conflictos por uso de suelo, para identificar las zonas de mayor susceptibilidad en la cuenca.

1. JUSTIFICACIÓN

Las fluctuaciones climáticas que se han observado en diversas regiones de la Tierra, han comenzado a ser objeto de interés, debido principalmente a su impacto directo en la producción agrícola y en la incidencia de desastres. Los impactos del CC sobre los recursos hídricos se sienten con mayor fuerza en los países en vía de desarrollo, pues a menudo son los más vulnerables, ya que suelen depender en mayor medida de actividades económicas que son sensibles a cambios en el clima, como la agricultura. Como resultado, el Producto Interno Bruto (PIB) de estas naciones puede verse afectado negativamente por una prolongada sequía o una inundación grave (Sánchez et al., 2009). La sequía puede llegar a convertirse en un desastre, en función de sus efectos sobre una población, su economía y el medio ambiente y, de la capacidad de éstos para hacer frente al fenómeno (Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2006). Según Poch (2011) se podría afectar hasta el 70% de los suelos del planeta en 2025 si los países no implementan políticas para detener la desertificación; no habrá seguridad global, si no hay soberanía alimentaria.

En la mayoría de las regiones agrícolas, este fenómeno ocasiona catástrofes en la población. El rendimiento de cultivos disminuye entre el 20 y 30%, y a veces hasta el 50% (Morales, J., 2005). Adicionalmente se debe prestar atención especial a los incendios forestales por la magnitud de pérdidas económicas y ecológicas que acarrearán, aunque los incendios controlados pueden mantener la salud de los bosques, los que se salen de control pueden terminar con áreas extensas, produciendo un cambio en la flora y la fauna del lugar, lo que a su vez repercutirá en el ciclo hidrológico regional y global (Montero et al., 2007). Hay un incremento en la erosión de suelo, lo que genera un aumento en la deposición de sedimentos y por tanto la turbiedad de los ríos; las capas de suelo se reducen disminuyendo la capacidad de crecimiento de las plantas.

Uno de los efectos más perjudiciales y peligrosos de la sequía se refleja en el medio ambiente, en los recursos naturales, hábitats y ecosistemas. Pero también afecta otros sectores como la ganadería, los animales sufren por continuas temperaturas altas y falta de agua; la cantidad y calidad de los alimentos disminuye, los forrajes secos son más difíciles de digerir y las plantas tóxicas incrementan su toxicidad. Por otra parte, los cultivos

estresados por condiciones de sequía tienden a debilitarse, incrementando su vulnerabilidad a ser atacados por organismos, como hongos (Morales, J., 2005 y Montero et al., 2007).

La reducción de la producción de las materias primas básicas causada por la sequía afecta el comercio, especialmente en las relaciones de exportación e importación. Por lo general, el mundo financiero responde con una subida de precios a las pérdidas de producción de los productos agrícolas, de los procesos alimentarios, del intercambio de mercancías y del consumo de energía, lo cual acelera la inflación y estimula procesos y tendencias poco convenientes. La pérdida de ingresos conduce al desempleo, los precios de los alimentos, la energía, y otros productos se incrementan, conforme los suministros se reducen. La disminución de los niveles de los ríos imposibilita la navegabilidad y conlleva al incremento de costos de transporte. La producción hidroeléctrica también puede verse afectada (Morales, J., 2005 y González, Peña y Salas, 2012). Adicionalmente se pueden incrementar las enfermedades cardiovasculares, alergias e infecciones respiratorias; por la contaminación del aire, causada por el polvo procedente de una mayor erosión eólica. La sequía produce un efecto de disminución de la capacidad de soporte socioeconómico de una zona y puede ser motivo de inestabilidad política (Morales, J., 2005). Por tanto, la prevención y capacitación en el tema debe tomar importancia para cualquier país, y para cualquier gobierno.

Colombia, es el cuarto país más grande de Suramérica y el único con zonas marinas tanto en el Pacífico como en el mar Caribe. En el territorio continental se identifican cinco regiones naturales: Caribe, Andina, Pacífica, Orinoquía y Amazonía. Estas presentan una gran diversidad biogeográfica y ecológica (IDEAM, 2001); adicionalmente es una potencia hídrica mundial y, a pesar de los problemas actuales relacionados con el agua, cuenta con al menos 737.000 cuerpos de agua y un aporte promedio de 3.400 Km³/año (IDEAM, 2010a). Sin embargo el aumento de sequías ha intensificado los procesos de degradación de suelos al interior de áreas actuales en desertificación. Estudios realizados por el IDEAM (2010b) pronostican que alrededor del 16% del territorio será más cálido y seco hacia finales de siglo, y parte de los territorios clasificados (1971 a 2000) como superhúmedo (13%) y húmedo (5%) se reducirán al 5% y 4% respectivamente, para dar paso a climas semihúmedos, semiáridos y áridos. El país cuenta con un sistema de monitoreo hidrológico que ha venido fortaleciéndose. Durante el siglo XX existieron en el país al menos 2.450 estaciones

hidrológicas, en la actualidad están funcionando aproximadamente 1.500, de la cuales el 52% son manejadas por el IDEAM (IDEAM, 2008).

En el país la ocurrencia del ENOS se ha relacionado con picos de paludismo. En 1998 cuando ocurrió este fenómeno, hubo un incremento inusitado de casos de paludismo del 42%, explicable por varias circunstancias, entre ellas, que el fenómeno ocasionó un aumento de la temperatura en todo el territorio nacional con la disminución subsecuente de la precipitación en algunos sectores de la Costa Pacífica colombiana, lo que aceleró el ciclo biológico del vector (Sánchez et al., 2009). En las tres últimas décadas, más de 15 millones y medio de colombianos se han visto afectados por los desastres de origen natural, más de 38.000 personas han muerto en el país a consecuencia de este tipo de eventos y en la actualidad, cerca de 15 millones de personas, el 35% de la población, está expuesta a un alto nivel de riesgo y otros 20 millones a un riesgo intermedio (IDEAM, 2010b).

La cuenca del río Dagua no es ajena a esta problemática, estudios realizados por Gutiérrez (2013), Gutiérrez, Carvajal, y Ávila (2013), indican que el fenómeno ENOS afecta la oferta hídrica. En la fase El Niño se presentan reducciones significativas de la precipitación de hasta un 39% y el caudal disminuye hasta un 31% respecto a la media, valores que podrían generar eventos de sequía. La cuenca representa un papel importante en la inserción económica, mueve alrededor del 60% del comercio del país; sin embargo presenta un deterioro progresivo que afecta la economía, la sociedad y los recursos naturales, ocasionados por la desestabilización de la oferta ambiental, ampliación de la frontera agrícola, manejo inadecuado de los sistemas agrícolas, degradación de suelos, pérdida de la calidad de agua, contaminación, y problemas sociales relacionados con la tenencia de la tierra, la eliminación del predio familiar, la concentración de los recursos y de la producción, entre otros (Cardona y Cardona, 2012; Daza, et al., 2012 y Cardona et al., 2013). La falta de claridad en torno a las responsabilidades de las instituciones, el gobierno y las comunidades y la debilidad institucional de los entes responsables, dificulta la implementación de acciones para corregir una situación que cada vez es más preocupante y costosa para el departamento y la nación. Por lo que el enfoque para responder al enorme reto de recuperación de la cuenca del Dagua debe ser sistémico e integral, enfatizando los esfuerzos hacia la prevención (Cámara Colombiana de la Infraestructura (CCI), 2008).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar espacial y temporalmente las sequías meteorológicas en la cuenca del río Dagua, asociadas a la fase cálida de El Niño Oscilación del Sur– ENOS, para identificar las zonas de mayor susceptibilidad a éstas, partir de información meteorológica, cobertura de suelo, topografía, grado de erosión y conflictos por uso de suelo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Seleccionar y aplicar el índice que mejor se ajuste a la evaluación, cuantificación y análisis de las sequías meteorológicas asociadas a la fase cálida del ENOS en la cuenca del río Dagua.
2. Evaluar la información meteorológica, cobertura de suelo, topografía, grado de erosión y conflictos por uso de suelo, para determinar su influencia en la susceptibilidad a sequías meteorológicas en la cuenca del río Dagua.
3. Zonificar la susceptibilidad a sequías meteorológicas con base en las variables evaluadas para identificar las áreas más críticas.

3. ANTECEDENTES

El principal estudio antecedente lo constituye el trabajo realizado por Loaiza (2014), titulado: “Evaluación de sequías meteorológicas asociadas al fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y su impacto sobre los sistemas productivos agrícolas de la cuenca del río Dagua, Valle del Cauca”, en el cual empleó el índice estandarizado de precipitación trimestral para caracterizar las sequías meteorológicas y espacializar eventos específicos: Jun-Ago del 82, Dic del 90 a Feb del 91, Dic del 97 a Feb del 98; recomendando de realizar el análisis para agrupaciones más amplias donde es posible identificar mejor los impactos y comportamiento de la sequía meteorológica.

Sin embargo su estudio sistemático se puede remontar a la década de 1960. Palmer (1965) uno de los pioneros en este campo, consideró la sequía como un fenómeno estrictamente meteorológico, caracterizado por anomalías climáticas que crean deficiencias de humedad anormalmente prolongadas, y desarrolló el índice de severidad de sequía de Palmer (PSDI, por sus siglas en inglés: Palmer Drought Severity Index), el cual se basa en un balance mensual de humedad serial usando registros de precipitación, temperatura y capacidad de almacenamiento hídrica del suelo. Posteriormente en 1968, formuló otro índice denominado índice de Humedad del Cultivo (CMI, por sus siglas en inglés: Crop Moisture Index) para estimar semanalmente las condiciones de humedad en regiones de cultivos, empleando la precipitación y la temperatura media para caracterizar eventos secos de rápida ocurrencia.

Steila (1972), formuló un índice de sequía para Arizona (Estados Unidos), basado en un balance de humedad del suelo que incluyó la precipitación, la evapotranspiración, el cambio y el exceso de humedad. Éste monitorea la diferencia de almacenamiento de humedad del suelo, en un momento dado, respecto al promedio del almacenamiento de la humedad del suelo durante ese mes. Años más tarde McKee, Doesken y Kleist (1993), desarrollaron el índice estandarizado de precipitación (SPI, por sus siglas en inglés: Standardized Precipitation Index), para caracterizar las sequías meteorológicas, usando solamente los registros de precipitación mensual, los cuales se agrupan en trimestres, semestres o años y se ajustan a una función de distribución de probabilidad. En 1999 Byun y Wilhite introdujeron el concepto de Precipitación Efectiva (PE, por sus siglas en inglés: Effective precipitation) en la creación de un índice alternativo para cuantificar en forma objetiva la severidad y duración

de las sequías, la cual resulta de la sumatoria de la precipitación diaria afectada por una función de reducción dependiente del tiempo; este índice fue aplicado inicialmente en los altiplanos de Estados Unidos.

En el año 2002, EEUU, México y Canadá establecieron un programa conjunto que engloba el Centro Nacional de Datos Climáticos de La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), Centro Nacional de Mitigación de Sequías y Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América; Comisión Nacional del Agua de México; Ministerio del Medio Ambiente y, Agricultura y Agroalimentación de Canadá. Los productos del programa tienen una periodicidad mensual y opera como un sistema de vigilancia de Monitor Sequías en América del Norte (NADM por sus siglas en inglés) (Paredes, 2012). Por su parte Sudamérica y el Caribe han realizado importantes avances en materia de Sistemas de Alerta Temprana (SAT). Cuba posee un sistema de monitoreo nacional de sequía basado en una serie de índices, entre los que destacan, SPI, percentiles, rachas y déficit-exceso, a partir de los cuales, genera mapas temáticos que difunden en boletines, páginas web, entre otros medios y el Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIIFEN), con sede en Guayaquil (Ecuador), genera un pronóstico estacional para el oeste de Sudamérica en conjunto con los servicios meteorológicos e hidrológicos de Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Chile y Argentina. El IDEAM publica periódicamente un informe que muestra una predicción de la intensidad y recurrencia de las precipitaciones.

Adicionalmente, diversos autores han enfocado sus estudios en la aplicación de índices propuestos como parte de los programas de prevención de desastres y con el fin de generar bases científicas que puedan ser usadas en la gestión del riesgo y mitigación de los impactos del CC y la VC. Dentro de los que se pueden mencionar a Colotti, Cedeño y Montañez (2013) que estudiaron la sequía meteorológica y la variación de la superficie agrícola en la isla de Margarita (Estado nueva Esparta, Venezuela), para el período 1972-2004 usando el SPI y el Índice de Dinámica Agrícola para determinar el aumento o disminución de la superficie agrícola, encontrando que la relación de aumento o disminución entre ambas variables, no es directamente proporcional; siendo más favorable la ubicación de áreas agrícolas en zonas donde la sequía tiene menor influencia.

Paredes (2012) propuso un modelo probabilístico para la predicción estacional de sequías meteorológicas en Venezuela, contrastando el SPI y cuatro índices macro—climáticos, con el

fin de generar un sistema para alerta temprana en el país. En ese mismo año Fernández (2012) realizó una caracterización de sequías hidrológicas en la cuenca del río San Juan (República Argentina), identificando los eventos de sequía, su duración, intensidad y magnitud y los períodos de retorno asociados a sequías de distinta duración, mediante la evaluación de los caudales, la oferta y la demanda.

Zuluaga (2009), realizó un análisis de la variabilidad espacio-temporal de la sequía en Colombia, calculado el SPI para series de precipitación de 576 estaciones de 1976 a 2005, identificando patrones de variabilidad, número de eventos, duración y magnitud media y máxima de la sequía. Lana et al. (2009) realizaron una revisión de los análisis estadísticos de las precipitaciones diarias y mensuales en Cataluña, España, para cuantificar aspectos como los de la irregularidad de las cantidades mensuales y la distribución espacial del SPI, a partir de estadísticas como valor extremo, la variabilidad de la cantidad de precipitación media, desviación estándar, distribución por cantidad y tiempo, y tendencias temporales.

Para el 2008 se resaltan los estudios de Vidal (2008) quien caracterizó las sequías en Paraguay, a partir del SPI, calculado en el software SPI_SL_6 para 3, 12 y 24 meses analizando dos modelos de tendencia, lineal y polinomial, que ajusten estos datos, además realizó pruebas de validación estadística como la prueba de significación y cálculo del coeficiente de determinación; así identificó la frecuencia, duración y magnitud de los eventos secos; y el de Paredes, Millano y Guevara (2008) que realizaron un análisis espacial de las sequías meteorológicas en la región de los llanos de Venezuela durante el período 1961-1996, usando el SPI, para determinar la dispersión espacial, frecuencia, espaciamiento temporal, duración y extensión de los períodos secos interanuales.

García et al. (2007) realizaron una aproximación al problema de la alerta temprana frente a sequías, considerando indicadores obtenidos con teledetección y datos meteorológicos, a partir del estudio de la cuenca del río Segura (España), una de las más secas de Europa; encontrando, que los índices probabilísticos, basados solo en precipitación, no exhiben el comportamiento espacio-temporal observado desde imágenes satelitales. Crespo (2005) realizó un análisis de las bondades de diagnóstico del PSDI y del SPI como métodos de cuantificación de sequía, para estudiar este fenómeno en doce reservas de la biosfera mexicana para el período de 1960 a 1990; en ese mismo año, Morales, J. analizó el efecto

de la longitud de registro en el cálculo del SPI para agrupaciones de 3, 6, 9, 12, 24 y 36 meses, a partir de las series de precipitación de cinco estaciones de la ciudad de Morelia, Michoacán, México, encontrando que las diferentes longitudes utilizadas para el cálculo del SPI resultan en una evaluación diferente del grado de severidad de la sequía. La diferencia entre los valores del SPI derivados a partir de registros de diferente longitud se aumenta cuando la escala de tiempo elegida es grande y la sequía es intensa.

En el 2004 Nyabeze realizó una clasificación de las zonas de más alto impacto de las sequías en una cuenca de Zimbabwe, país situado al sur del continente africano, mediante la evaluación distribuida de un índice de sequía hidrológico calculado a partir de series de caudal y sistemas de información geográfica. Gómez (2003) realizó un estudio para identificar los niveles y áreas con mayor grado de vulnerabilidad a sequía y el impacto de la misma en Costa Rica, empleando diferentes programas informático como AGROCLIM (análisis de datos agroclimáticos) y PLUVIO; encontrando que los indicadores biofísicos que tienen mayor importancia para la vulnerabilidad son la intensidad de uso de la tierra, el comportamiento de la precipitación y la presencia de cuerpos de agua, y algunos de naturaleza socioeconómica como densidad poblacional, ingresos económicos, capacitación a la población y la implementación de tecnologías de conservación.

Hurtado y Cadena (2002) realizaron una comparación de índices basados en lluvia y en el concepto del balance hídrico del suelo, para estudiar las sequías en Colombia. Concluyendo que los índices de balance hídrico en general reflejan mejor lo que sucede con el abastecimiento de agua, y dentro de estos, el índice de anomalía hídrica – Z, es el que mejor refleja el comportamiento de la sequía. Sin embargo, el índice estandarizado de lluvia muestra una estrecha correlación con el índice Z y es de utilización más sencilla y práctica. Por tanto, se recomienda la utilización de este índice para aplicaciones operativas.

“La Tierra proporciona lo
suficiente para satisfacer las
necesidades de cada hombre,
pero no su codicia.”

Mahatma Gandhi



4. MARCO TEÓRICO

4.1 ESTADO DEL RECURSO HÍDRICO, VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y CAMBIO CLIMÁTICO

El agua es esencial para la existencia de los seres vivos y para el desarrollo de diferentes actividades sociales y productivas del hombre, es el elemento más frecuente en la tierra, pero únicamente el 2,53% es agua dulce, de los cuales aproximadamente dos terceras partes, se encuentran inmovilizadas en glaciares; sin embargo la demanda de ésta aumenta cada vez más, el ser humano extrae un 8% del total anual de agua dulce renovable (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), 2003). Sumado a lo anterior la disponibilidad del agua y su calidad está fuertemente afectada por las variaciones del clima, siendo necesario que la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) se maneje dentro de los impactos y estrategias de adaptación a VC y CC.

El CC según IPCC (2007) es un fenómeno que produce variaciones importantes en el estado del tiempo, clima, originadas por una modificación en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades durante un período prolongado, debidas a la variabilidad natural o como consecuencia de las actividades antrópicas. Por otra parte la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), define el CC como una variación estadística del estado del tiempo, atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial, distinguiéndose de la VC, en que se atribuye a causas naturales y cuyas fluctuaciones se dan en escalas de tiempo relativamente cortas. Establecer la frontera entre los conceptos de VC y CC es especialmente difícil en regiones en las que se presenta una fuerte influencia de la primera en las condiciones corrientes del clima (Organización Meteorológica Mundial - OMM, 2009).

Colombia al localizarse en la franja ecuatorial está bajo la influencia de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), que afecta la distribución espacio-temporal de la precipitación, la nubosidad y otras variables climatológicas. Adicionalmente, por encontrarse al noroccidente de Suramérica se ve influenciado por los procesos que ocurren en los

océanos Atlántico Tropical, el mar Caribe y el Pacífico tropical, y por la dinámica de las cuencas del Amazonas y el Orinoco (ver Figura 1). Por lo anterior, se presentan regímenes de precipitación y de VC significativos a lo largo y ancho del país, al sur la estacionalidad entre lluvia y menos lluvia está invertida respecto a la del centro del país, en la región Andina, los regímenes de precipitación tienen una tendencia bimodal, mientras que en la región Caribe la tendencia es unimodal; por lo tanto los efectos de las alteraciones climáticas no se perciben de manera homogénea en el territorio (IDEAM, 2010b; García et al., 2012).

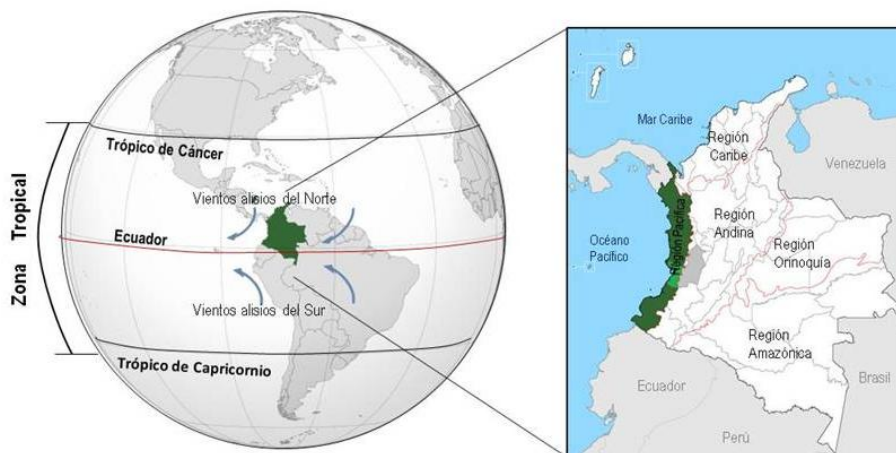


Figura 1. Ubicación geográfica de Colombia y sus regiones naturales. Modificado de <http://mundocartografico.carpetapedagogica.com/2014/10/mapa-de-colombia.html>

El daño potencial que pueden causar los fenómenos climáticos se puede obtener al analizar el impacto del ENOS. Los sistemas de agua dulce (ríos, lagos, reservorios y humedales) son potencialmente sensibles al CC, y vulnerables a las fluctuaciones de corto tiempo del clima, como aquellas asociadas a dicho fenómeno (SEMARNAT y PNUMA, 2006).

4.2 EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR

Fenómeno oceánico-atmosférico, que consiste en la interacción de las aguas superficiales del océano Pacífico tropical con la atmósfera circundante y se relaciona con alteraciones climáticas en muchas partes del mundo. Según las temperaturas superficiales y sub-superficiales del océano Pacífico tropical, este fenómeno presenta en su componente oceánico dos eventos importantes, El Niño y La Niña; en su componente atmosférico, existe un factor conocido como el índice de oscilación del sur, que representa cuantitativamente el

Variabilidad espacio-temporal de la susceptibilidad a sequías meteorológicas en la Cuenca del Río
Dagua, Valle del Cauca

cambio de la presión atmosférica a nivel del mar en la región occidental, en Darwin y central-oriental, en la isla de Tahití del Océano Pacífico tropical (Solano y Stolz, s.f.). Éste fenómeno es el conjunto más poderoso de variaciones atmosféricas y oceánicas en la región del océano Pacífico ecuatorial. Puede favorecer e intensificar el desarrollo de precipitaciones, produciendo inundaciones, tormentas y ciclones tropicales, así como disminución de las lluvias ocasionando sequías en algunas regiones (Puertas y Carvajal, 2008).

La magnitud de los cambios en los balances de agua, ocasiona fuertes perturbaciones hidro-climáticas, particularmente en los cinturones tropicales y sub-tropicales de la tierra, con amplias repercusiones sociales, ambientales, ecológicas y económicas (Poveda, 2004). A través del efecto climático, El Niño tiene un gran impacto socioeconómico en diferentes países. El pasado ha dejado ejemplos claros de esta influencia, como los problemas ocasionados por los eventos 1972-1973 y 1982-1983 a la pesca del Perú y a los recursos hidro-energéticos de Colombia en 1991-1992. El efecto climático de este fenómeno no se limita a la región de América tropical, sino que se extiende a otras latitudes y regiones del planeta, siendo responsable de sequías en el norte de Australia, de oleadas de calor o de inundaciones en Norteamérica y Europa entre otros (Montealegre y Pabon, 2000).

Por su localización geográfica, Colombia recibe la influencia directa de los procesos que se suscitan en el sistema acoplado océano-atmósfera del Pacífico tropical, asociados al ciclo ENOS, y se ha podido establecer claramente, que la intensidad de los fenómenos "El Niño", fase cálida y "La Niña", fase fría están en relación directa con la magnitud de las anomalías registradas en la temperatura superficial y subsuperficial del océano y con el área que cubren esas anomalías (Montealegre, 2012). La fase cálida, está asociada con la disminución de la precipitación y los caudales de los ríos del país, con variaciones espaciales en cuanto a duración e intensidad, de donde se derivan períodos de estiaje (Zuluaga, 2009).

Colombia presentó un déficit pluviométrico, asociado al ENOS en el período 1997-1998, que tuvo un impacto significativo en la actividad agropecuaria, principalmente en la producción de café, la producción ganadera y la industria lechera. Adicionalmente, el fuerte déficit pluviométrico impuesto por El Niño causó una drástica disminución de los caudales, al punto de que el río Magdalena dejó de ser navegable en algunos tramos, y la condición ambiental favoreció la propagación de incendios forestales (Organización Panamericana de la Salud

(OPS), 2000). Las principales afectaciones frente al fenómeno de El Niño se presentan en la cuenca del río Magdalena-Cauca, con una reducción promedio del 26% en los caudales; en la cuenca media del río Cauca con reducciones del 38%, en los ríos Sogamoso y Suárez con valores de hasta un 30%; en el Sumapaz las reducciones pueden llegar hasta un 40%; en el Urabá antioqueño con disminuciones de caudal de entre 30% y 40%, en el río Catatumbo y el río Pamplonita con reducciones de hasta el 30%. Ante el fenómeno de La Niña, el aumento de caudales se presenta principalmente en la zona Andina. Bajo estas condiciones, los caudales en la cuenca media del río Cauca llegan a superar el 60% de su nivel normal, en el río Chinchiná alcanzan el 70% y en el río Patía hasta el 60% (García et al. 2012).

4.3 LA SEQUÍA

La definición de sequía ha sido objeto de numerosos estudios, pero la diversidad de tipología climáticas existentes impide definir un mismo umbral de déficit pluviométrico para catalogar una sequía en dos lugares diferentes (Valiente, 2001). Sin embargo, en términos generales se puede definir como un fenómeno temporal que, resulta de la escasez o de una mala distribución prolongada de la precipitación, la cual se encuentra ligada con las anomalías Océano Atmosféricas que se manifiestan en el Océano Pacífico Ecuatorial Central (como el fenómeno ENOS) y con el comportamiento irregular de los anticiclones marítimos y continentales, es decir, con los cambios de la presión atmosférica y alteraciones en la circulación general de la atmósfera (Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales (INETER) y Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), 2005).

El concepto de sequía también se encuentra estrechamente relacionado con patrones culturales, al referirse a la percepción que una sociedad puede tener acerca de la ausencia o escasez de precipitación en un momento determinado. En los desiertos de Botswana, los pueblos bosquimanos piensan que hay sequía cuando deja de llover cinco o seis años; mientras que algunos países europeos, como Francia o Alemania, basta con que haya un mes sin lluvias (Anton y Díaz, 2000). Para considerar como sequía a una reducción del agua y humedad disponibles; Morales, J. (2005) señala que se debe cumplir: I) Que la reducción sea temporal, II) Que la reducción sea significativa respecto a la cantidad normal o esperada para un período dado. III) Que la reducción se defina con respecto a una “norma”. (Técnica, cultural) y IV) Que el período empleado como base para la “norma” esté especificado.

El rango de escalas espaciales y temporales que involucra este fenómeno es amplio, con eventos que persisten durante meses y años, afectando vastas áreas, y con ello la dinámica socio-económica de una región (Zuluaga, 2009). De acuerdo a las características y a sus impactos, este fenómeno suele agruparse en diferentes tipos de sequía: meteorológica, hidrológica y agrícola; incluso algunos autores se refieren a sequía socioeconómica; los dos primeros describen fenómenos netamente físicos, mientras que el resto describen el impacto de los dos primeros en la producción agrícola o en otros indicadores económicos. En la Figura 2 se muestra la secuencia de los tipos de sequía y de sus efectos.

Sequía Meteorológica. Hace referencia al déficit de precipitación por un período extendido de tiempo, respecto a las condiciones climáticas normales de una zona determinada. Los umbrales dependerán del sitio y/o región de estudio, ya que las particularidades del clima producen definiciones sumamente variables de un lugar a otro, por lo que además se debe tener cuidado cuando se aplican estas definiciones para caracterizar y comparar las sequías en distintas regiones (Bedoya, Contreras y Ruiz, 2010; Hisda y Tallaksen, 2000).

Sequía Agrícola. Déficit marcado y permanente de lluvia que reduce significativamente la disponibilidad de agua en el suelo para satisfacer las necesidades de un cultivo. Este tipo de sequía se centra en la escasez de la precipitación, las diferencias entre la evapotranspiración actual y la potencial, el déficit del agua en el suelo, la reducción del agua subterránea o reducción de los niveles en los lagos y lagunas; además contempla la susceptibilidad del suelo en las diferentes etapas de desarrollo de las cosechas y sus propiedades físicas y biológicas. El déficit de humedad puede obstaculizar la germinación de las plantas, reduciendo la producción final (Montero et al., 2007).

Sequía Hidrológica. Hace referencia a los efectos de períodos de precipitación relativamente cortos, es decir a los escurrimientos a nivel de superficie y subsuelo, su impacto se ve reflejado en la recarga de acuíferos, lagos, presas y su impacto es de largo plazo, es decir, en tanto la sequía agrícola presenta un efecto inmediato en los cultivos, la sequía hidrológica puede afectar la producción agrícola de varios años, la producción hidroeléctrica o la extracción de agua del subsuelo (Crespo, 2005).

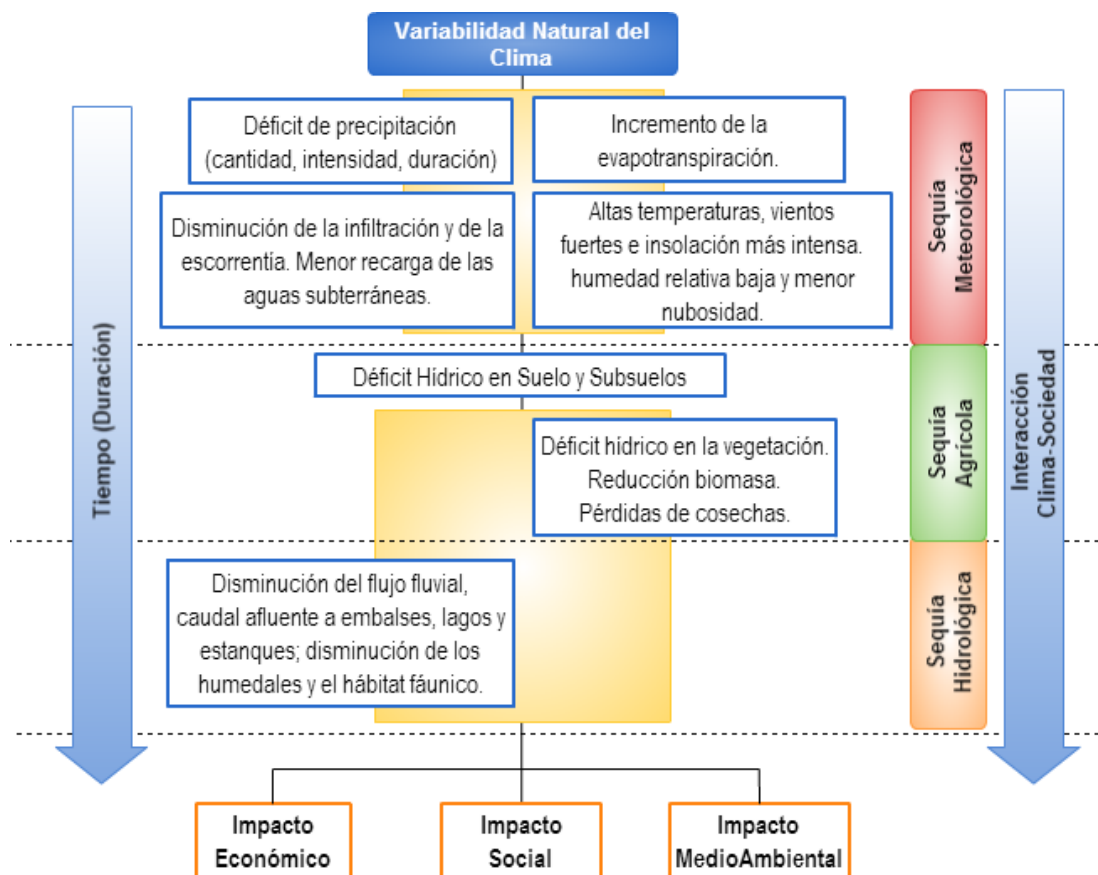


Figura 2. Secuencia de sucesos de sequía y de sus efectos para tipos de sequías comúnmente aceptados.
Fuente: Adaptado de OMM, 2006 y Valiente, 2001.

Las diferentes sequías son consecuencia de un déficit de precipitación, sequía meteorológica, la cual es causada principalmente por la variabilidad natural del clima. Por lo cual, es importante monitorear este tipo de sequía a través de diferentes índices, y así poder detectar zonas vulnerables e implementar medidas de acción para reducir sus posibles impactos (Ortega, 2012; Confederación Hidrológica del Duero, 2007). La severidad de una sequía depende no solamente del grado de reducción de la lluvia, de su duración o de su extensión geográfica, sino también de las demandas del recurso hídrico para la permanencia de los sistemas naturales y para el desarrollo de las actividades humanas, por la cual es posible expresar el grado de severidad en términos de sus impactos sociales y económicos (Morales, J. 2005).

4.4 MÉTODOS PARA CARACTERIZAR LAS SEQUÍAS

Para caracterizar los eventos extremos y determinar si es un riesgo natural, es necesario establecer algunos parámetros. Existen siete parámetros para caracterizar la sequía meteorológica e hidrológica como (Valiente, 2001):

Magnitud. Representa el déficit medio de precipitación o caudal durante el período determinado por un evento seco, se mide en porcentaje o en valor absoluto.

Duración. Parámetro que refleja el tiempo en días, meses o años consecutivos durante el cual la precipitación o caudal total registrado es inferior al dato medio del período evaluado.

Frecuencia. Número de casos durante un período determinado; puede medirse a través de la probabilidad empírica de que la precipitación o caudal sean inferiores a la media.

Velocidad de Implantación. Tiempo transcurrido entre el momento de inicio del déficit de precipitación o caudal y el momento en que alcanza su máximo valor.

Espaciamiento Temporal. Permite tener una aproximación a la previsibilidad, representa el tiempo transcurrido entre diversos períodos secos, proporcionando una medida de la regularidad o aleatoriedad del fenómeno.

Extensión. Es la superficie total que presenta déficit hídrico.

Dispersión Espacial. Mide el grado de concentración de la anomalía.

En el ámbito mundial se han desarrollado diversos sistemas de monitoreo de la sequía, con distintos niveles de detalle. Los índices utilizados identificar una sequía meteorológica calcular su intensidad, duración, frecuencia y distribución geográfica, se fundamentan en un análisis estadístico de información meteorológica, Algunos de los métodos existentes son:

4.4.1 Cuantiles de precipitación (CP)

Medida de posición, que divide una distribución de ocurrencias pluviométricas durante un período temporal suficientemente largo, en diferentes intervalos con el mismo número de datos. Generalmente se usan quintiles, para cada 20%, deciles para cada 10% o percentiles

para cada 1% de la distribución. Los dos últimos tienen mejor precisión en los umbrales por presentar mas intervalos; los primeros dividen la serie en diez partes y permiten clasificar los periodos en: sequía muy fuerte (extrema), sequía fuerte (severa), sequía moderada, sequía leve, sequía incipiente, humedad incipiente, humedad leve, humedad moderada, humedad fuerte y humedad muy fuerte (Valiente, 2001; Aristizabal y Jaramillo, 2013).

4.4.2 Porcentaje de la Precipitación Media (PPM)

Expresa la anomalía pluviométrica de un período determinado, mensual, trimestral, semestral, anual etc. como porcentaje respecto a la precipitación media del mismo período de referencia. Se recomienda tener un período de al menos 30 años; es un método simple pero presenta algunos inconvenientes: la precipitación media es un número abstracto que no tiene que ser equivalente a la mediana, que sí representa el valor o intervalo de mayor frecuencia de la serie y dificulta la determinación de los límites para indicar una sequía y su severidad, puesto que el porcentaje de desviación varia de un lugar a otro (Valiente, 2001).

4.4.3 Precipitación Efectiva (EP)

Calcula la duración y severidad de la sequía a partir de la EP, que es la sumatoria de precipitación diaria para un período determinado, modificado por una función de reducción dependiente del tiempo. Una vez calculada, se determina su media, su desviación y finalmente el valor estandarizado (SEP, por sus siglas en inglés: Standardized value of EP) que es el valor normalizado respecto a la desviación estándar. Valores negativos corresponden a períodos secos y positivos a húmedos, este parámetro permite identificar el inicio, final, duración y severidad del evento (Valiente, 2001; Vilchis et al. 2012).

4.4.4 Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI)

Este índice fue desarrollado por Palmer en 1965, mide los aportes de humedad al suelo a partir del balance hídrico. Considera la evapotranspiración, la recarga de humedad del suelo, la escorrentía o la pérdida de humedad de la capa superficial del suelo y requiere registros de al menos 30 años, de precipitación mensual promedio, temperatura media mensual y una estimación de la capacidad de campo de los suelos de la zona (García, 2006). Es uno de los más utilizados, debido a que estima razonablemente la condición de humedad de suelo,

variable fundamental para la producción agropecuaria. Su valor oscila de +6 a -6, aunque rara vez alcanza valores extremos, lo habitual es que se encuentre entre +4 y -4. Los valores positivos indican mayor contenido de humedad y los negativos menor contenido de humedad que los valores normales o medios ver Tabla 1 (Brizuela, 2009 y García, 2006).

Tabla 1. Clasificación del PDSI.

Valor PDSI	Categoría	Valor PDSI	Categoría
> 4,00	Extremadamente Húmedo	0,50 < -0,99	Incipiente Periodo Seco
3,00 < 3,99	Muy Húmedo	1,00 < -1,99	Sequía Suave
2,00 < 2,99	Moderadamente Húmedo	2,00 < -2,99	Sequía Moderada
1,00 < 1,99	Ligeramente Húmedo	3,00 < -3,99	Sequía Severa
0,50 < 0,99	Incipiente Periodo Húmedo	< -4,00	Sequía Extrema
0,49 < -0,49	Cercano a la Normalidad		

Fuente: Adaptado de García (2006).

4.4.5 Porcentaje Normalizado de Precipitación (PPN)

Se refiere a la relación porcentual existente entre la precipitación acumulada en un período de tiempo determinado y la precipitación media anual para una región. La precipitación media anual histórica se conoce como precipitación normal y se obtiene a partir del valor promedio de las precipitaciones anuales ocurridas en un período mayor o igual a 30 años. Los valores porcentuales negativos estimados para cada año indican el déficit y los positivos, el excedente en la precipitación anual ocurrida, la clasificación se muestra en la Tabla 2 (Ortega et al., 2008; CONAGUA, 1997).

Tabla 2. Clasificación de la sequía de acuerdo a valores del PPN.

Categoría de sequía	Rango de valores porcentuales (%)
Ligera	20 a 30
Moderada	31 a 40
Fuerte	41 a 50
Aguda	50 a 59
Intensa	Más de 60

Fuente: Adaptado de CONAGUA, 1997.

4.4.6 Índice nacional de lluvia (RI)

Considera la precipitación media anual del territorio según el peso de las medias a largo plazo de cada estación. El RI se relaciona con la producción agrícola, puesto que al recaer el peso en la precipitación anual, las estaciones en áreas más húmedas de un país tienen mayor influencia sobre el índice que las estaciones de áreas secas. No se afecta por anomalías pluviométricas localizadas, permitiendo calcular el índice incluso sin disponer de datos de todas las estaciones. Sin embargo, no se ajusta a una escala espacial de detalle, dado que los resultados surgen en el ámbito nacional, Gomme y Petrassi (1994).

4.4.7 Índice de sequedad (SI)

Creado por Ped (1975), refleja la diferencia entre el cociente de las anomalías y la desviación típica de las anomalías de precipitación y temperatura.

4.4.8 Índice de precipitación evapotranspiración estandarizada (SPEI)

Incorpora datos de precipitación y temperatura, lo que hace previsible importantes repercusiones en las condiciones de sequías al aumentar los procesos de evapotranspiración (Serrano, Beguería y López, 2010). Se obtiene calculando la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración. Esto representa un balance hídrico climático que se calcula para diferentes escalas de tiempo (Hernández et al. 2012).

4.4.9 Índice de sequía oferta-demanda (SDDI)

Creado por Rind et al. (1990) con una concepción similar a la del PDSI, pero sin involucrar los valores de recarga hídrica, escorrentía y pérdida de humedad del suelo. El SDDI se calcula individualmente en cada lugar del planeta sin importar su tipología climática, impidiendo que se puedan comparar con los de otras zonas y los valores del mismo pueden ser más extremos en una región húmeda que en el ámbito desértico. Se distinguen tres intervalos de sequía: moderada entre -0,90 y -3,29, fuerte entre -3,30 y -6,29, y extrema para resultados iguales o inferiores a -6,30 (Valiente, 2001).

4.4.10 Índice de Precipitación Estandarizada (SPI)

Índice que permite cuantificar el déficit o exceso de precipitación por medio de su intensidad y/o duración (McKee, Doesken y Kleist, 1993). Dentro de las ventajas que presenta es que su estimación es simple y puede aplicarse en diferentes escalas de tiempo, lo que lo hace apto para estudiar sequías de diferentes duraciones, desde un mes, relevantes para la agricultura, hasta varios meses, relevantes para evaluar la disponibilidad de agua subterránea, la esorrentía y los niveles de lagos o reservorios de agua (Hernández, 2008).

Para su cálculo, se debe contar con un conjunto de datos de precipitación mensual, de al menos 30 años, agrupados en escalas de tiempo, que pueden variar de 3 a 48 meses, dependiendo de la sequía que se desee evaluar; éstos se ajustan a una distribución, normalmente Gamma, para definir la relación de la probabilidad de precipitaciones. Posteriormente la función de densidad se transforma en una distribución normal estandarizada, con media cero y desviación estándar igual a uno, siendo el SPI el valor resultante de esta transformación (McKee, Doesken y Kleist, 1993; Núñez et al. 2005). Valores negativos representan sequías y, valores positivos indican que la precipitación ocurrida ha sido superior al promedio histórico. Por lo tanto un evento de sequía inicia cuando el SPI es menor o igual a $-1,0$, y finaliza cuando se hace mayor a $-1,0$. En la Tabla 6 se muestra la clasificación propuesta por Lloyd y Saunders (2002):

Conocer la situación ambiental actual, sus tendencias y el papel del hombre como parte del entorno natural y como su principal agente modificador, es fundamental debido a la creciente degradación del ambiente y sus consecuencias sobre la calidad de vida de la población. Mediante el estudio de los riesgos naturales se valora cualitativa y/o cuantitativamente el daño potencial a los grupos humanos generado por un evento o fenómeno de origen natural (Palacio, 2004). Una rápida detección y caracterización de las sequías contribuye en la generación de estrategias de mitigación de sus impactos (García et al. 2007).

4.5 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Método o técnica para el manejo y análisis de información geográfica. Permite combinar eficazmente información básica para obtener información derivada; es utilizado en diferentes campos, como el socioeconómico y medioambiental, en este último se destaca el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la gestión de riesgos, usos del suelo y control de la contaminación. Facilita la generación de mapas (Domínguez, 2000), visualización, generación de modelos en 3D y 4D, dinamismo y análisis.

Desde el 78 los SIG han sido usados en la zonificación de fenómenos como los deslizamientos, involucrando factores como la topografía, pendientes y precipitaciones. Generalmente, con información de eventos naturales, investigación científica y cartografía de peligros, es posible evaluar el estado de los peligros naturales y orientar las actividades de planificación. Por ejemplo, los datos climáticos son particularmente útiles combinados con las características de escurrimiento de los estudios de suelos, para producir información sobre inundaciones y erosión; y los mapas de zonas de vida son útiles para evaluar los peligros de desertificación (GEOSIG, 2001 y Abril, 2011).

La susceptibilidad forma parte de la evaluación para la zonificación de riesgos naturales y se integra a la valoración cualitativa y/o cuantitativa del daño potencial que un fenómeno de origen natural pueda ocasionar a los grupos humanos. Igualmente forma parte del estudio científico del comportamiento de la amenaza natural y sus efectos destructivos sobre el socio-sistema. Identificar zonas susceptibilidades, permite señalar las áreas que están potencialmente dispuestas a modificarse ante eventuales circunstancias naturales o antrópicas (GEOSIG, 2001). Dado que el análisis de susceptibilidad requiere del manejo simultáneo de diferente información y puede llegar a ser complejo, el uso de los SIG es de utilidad para zonificar las amenazas (Abril, 2011), algunos de los métodos son:

Métodos Cualitativos. Dependen básicamente de la geomorfología del sector y de la experiencia del analista, por tanto son métodos subjetivos. Pueden emplear la combinación cualitativa de mapas, que mediante sistemas empíricos asignan valores ponderados a las diferentes clases existentes en una serie de mapas, según el conocimiento del experto de los factores causantes y de la zona de estudio (Abril, 2011).

Métodos cuantitativos. Se basan en expresiones matemáticas que correlacionan los factores causantes del fenómeno; se distinguen básicamente dos tipos: determinísticos o estadísticos; el primero expresa el grado de amenaza por medio de un factor de seguridad y requiere información específica sobre las condiciones del terreno, que generalmente es difícil de conseguir. Los métodos estadísticos, como el análisis bivariado, multivariado, regresión logística y lógica difusa, clasifican los factores mediante puntajes ponderados y se combinan con ecuaciones matemáticas que determinan la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.

Metodos semi-cuantitativos. Emplean procedimientos de ponderación y clasificación, se distinguen: el proceso analítico jerárquico, la combinación lineal ponderada y el método multicriterio. Para la cartografía del orden de 1:25.000 y 1:50.000, frecuentemente no se dispone de suficientes datos que permitan el uso de métodos determinísticos, además son poco apropiados para tales escalas y los estadísticos aunque son adecuados, requieren de gran cantidad de información histórica o de un evento específico, lo que dificulta su aplicación. Por otra parte, los métodos de evaluación directa e indirecta de la susceptibilidad mediante el uso de índices, implica generalmente una gran subjetividad, por lo que los criterios de evaluación son difícilmente extrapolables a otras zonas.

Una aplicación más adecuada de los métodos de evaluación indirecta requiere de procedimientos que disminuyan la subjetividad en la asignación de pesos, o que normalice analíticamente el criterio con el que éstos se asignan a los factores condicionantes seleccionados (Hervás, Barredo, y Lomoschitz, 2002). El método multicriterio es uno de ellos, y se explicará en la metodología del trabajo.

5. MARCO CONTEXTUAL

En el mundo, la sequía ha sido ampliamente estudiada por diversos autores como McKee, Doesken y Kleist, (1993), Wilhite (1999), Hurtado y Cadena (2002), Gómez (2003), Morales, C. (2005), Morales, J. (2005), García et al. (2007), Vidal (2008), Zuluaga (2009), Paredes (2012), Fernández (2012), y Loaiza (2014) entre otros; con análisis de diversos enfoques, desde la búsqueda de una definición, hasta la concepción de metodologías para la cuantificación de sus efectos y su caracterización en términos de su duración, magnitud e intensidad, a partir de índices relacionados con el déficit hídrico del suelo, estrés hídrico de la vegetación, datos meteorológicos y técnicas de teledetección. Donald Wilhite, reconocido como el principal experto mundial en diseño de políticas y gestión de la sequía, trabaja en un proyecto piloto del Banco Mundial que esboza el primer sistema nacional de monitoreo constante de la sequía, que funcionará en Ceará, uno de los estados más secos del Nordeste Brasil. Este fenómeno es uno de los peligros naturales más devastadores, paraliza la producción de alimentos, agota los pastizales, perturba los mercados y, en los casos más extremos, causa la muerte generalizada de personas y animales.

Más de 2.000 millones de personas han sufrido por las sequías en el último siglo y 11 millones han perdido la vida como consecuencia de ellas. Los agricultores de maíz de Estados Unidos sufrieron en 2012 la sequía más severa de los últimos 50 años, en Sudamérica los sembradíos brasileños y argentinos de soja y maíz padecieron una aridez particular que diezmó los cultivos, la mitad de la demanda mundial del grano. Sequías recientes provocaron un aumento en los precios de los alimentos en todo el mundo y llevaron, por ejemplo, a México a considerar mecanismos como una bolsa agrícola propia, con el fin de hacer frente a las fluctuaciones en el mercado del maíz. Desde el decenio de 1970 la superficie de las tierras afectadas por la sequía se ha duplicado. En el último siglo más de 2.000 millones de personas han sufrido por a causa de ella y 11 millones han perdido la vida como consecuencia de sus efectos (Kaipper, 2013). En la actualidad 168 países alegan estar afectados por la desertificación, un proceso de degradación de las tierras en las zonas áridas que afecta a la producción alimentaria y se ve exacerbado por la sequía (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2013).

La evolución sigilosa de la sequía puede manifestarse en poco tiempo o tardar meses, reduciendo inicialmente el agua en los suelos, por lo que la agricultura suele ser el primer sector afectado. Abarca áreas geográficas más extensas que las afectadas por otros fenómenos como crecidas, tempestades tropicales o seísmos (OMM, 2006). En la Conferencia sobre el Desarrollo Sostenible "Río+20", en Brasil, los dirigentes calificaron la desertificación, degradación de las tierras y la sequía como desafíos mundiales y expresaron su compromiso para lograr un mundo con una degradación neutra de las tierras, donde se evite la degradación de nuevas zonas y se compense la inevitable mediante la restauración de la misma cantidad de tierras en el mismo momento y ecosistema (FAO, 2013).

Los países más vulnerables son los de las zonas áridas del planeta, donde las comunidades más pobres de África y de algunas partes de Asia occidental están particularmente expuestas. Últimamente las sequías han afectado al Gran Cuerno de África y la región del Sahel, los Estados Unidos de América, México, nordeste del Brasil, partes de China e India, Rusia y sureste de Europa. Algunos de los desastres humanitarios de mayor gravedad en los últimos años provocados por las sequías, fueron las crisis de las regiones del Cuerno de África en el 2011 y la de Sahel en el 2012, que amenazaron las vidas y los medios de vida de millones de personas. En el pasado, las sequías no eran tan catastróficas y solían formar parte del sistema climático ordinario; sin embargo, la mayor frecuencia de estos eventos y el carácter más errático de las precipitaciones, junto con la vulnerabilidad económica, social y ambiental subyacente, han hecho que tengan un impacto cada vez más destructivo en las poblaciones (FAO, s.f.). Según Below, Grover-Kopec y Dilley, (2007), las sequías causaron más del 50% del total de muertes debidas a desastres naturales entre 1900 y 2004, representaron el 35% de la población afectada por desastres y el 7% de las pérdidas económicas, después de las inundaciones y los terremotos. Sin embargo, el impacto económico de éstas puede ser mayor, debido a que se presume que los impactos indirectos son mayores y generalmente son más complejos de evaluar.

5.1 LATINOAMÉRICA

En América Latina y El Caribe, en especial en sus zonas áridas y semiáridas, las sequías son, sin duda alguna, uno de los eventos hidroclimáticos que causan mayor impacto, tanto por su complejidad a la hora de determinar su inicio y término, así como por su duración y su

extensión geográfica (UNESCO, 2010). América Latina es una de las regiones más afectadas por el aumento inusitado de la temperatura, trayendo consigo sequías prolongadas. En lo que va del siglo XXI se registraron 13 de los 14 años más cálidos, y que cada una de las tres últimas décadas fue más calurosa que la anterior (TeleSUR, 2014). Sumado a lo anterior los analistas también deben enfrentar los problemas relacionados con la disponibilidad de información meteorológica, la cual frecuentemente es escasa, debido a la ausencia de una red densa de estaciones de monitoreo y, especialmente, la ausencia de registros de una longitud adecuada que permita realizar estimaciones de frecuencia con cierto grado de confiabilidad (UNESCO, 2010).

La Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la Desertificación y la Sequía (CCD) debe preparar y ejecutar planes de acción nacionales, destinados a prevenir la degradación de las tierras, luchar contra la desertificación y mitigar los efectos de la sequía, especialmente en las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas. En Argentina, México y Paraguay, más de la mitad del territorio se encuentra afectado por problemas vinculados a la degradación y desertificación. La región del nordeste de Brasil, donde vive una parte significativa de su población, también presenta estos problemas. Se estima que entre un 27% y 43% del territorio de Chile, Ecuador y Perú, sufre problemas de desertificación. El caso más grave es el de Bolivia, donde el 77% de la población del país, viven en áreas afectadas por estos problemas. En Uruguay, se estima que más del 80% de la superficie agrícola del país sufre diversos grados de erosión, y en Colombia el 48% de su territorio se encuentra afectado (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2005).

5.2 COLOMBIA

Los impactos del CC ya son realidad en Colombia a través de alteraciones climáticas cada vez más fuertes. Su diversidad biológica, sus características geográficas, la desigualdad y la pobreza persistentes hacen altamente vulnerable al país, siendo necesario tomar medidas inmediatas para adaptarse a estos impactos negativos. Los retos son complejos y por esto el fenómeno no debe ser tratado como un tema solamente ambiental, el CC afecta el ámbito social, ambiental y económico. Como consecuencia, está considerado como un tema transversal dentro del Sistema de las Naciones Unidas (Fondo para acelerar el logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (MDGIF) 2012). Los eventos de El Niño, desarrollados

durante 1991-1992, 1997-1998 y en 2009-2010, están presentes por sus impactos sobre el funcionamiento normal de diversos sectores del país que dependen del recurso hídrico. La estimación de la oferta hídrica durante este fenómeno está afectada por el déficit en la magnitud del ciclo anual de lluvias y el aumento consistente de las temperaturas; ocasiona reducciones significativas, hasta del 40%, en la oferta durante el trimestre diciembre-enero-febrero para algunas zonas del país (Bedoya, Contreras y Ruiz, 2010).

Estudios realizados por el IDEAM (2012), Naranjo (2012), Jovel (2001) y la información de DesInventar (2013), indican que El Niño presentado en los años 1982, 1983, 1986, 1987, 1992, 1997, 1998, 2001 y 2002 dejó cuantiosas pérdidas económicas, disminución de las lluvias y la humedad del suelo generando sequías, incendios forestales, racionamientos de energía, reducción de la evapotranspiración y menor disponibilidad hídrica para la convección atmosférica que produce la precipitación. En una entrevista realizada, por Vélez (2012) del periódico El Colombiano, a Yesid Carvajal, profesor de la facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle y experto en el tema menciona que en Colombia se han presentado 13 fenómenos El Niño en los últimos 60 años, advirtiendo que con el paso del tiempo podrán ser más las temporadas secas comparadas con La Niña que se ha presentado 17 veces en el mismo período de tiempo.

La base de datos de DesInventar (2013) registra los años 1983, 1992, 1995, 1997, 1998, 2001 y 2002 como años de sequías. A causa del fenómeno El Niño en 1992, durante el gobierno del presidente, César Gaviria, se presentó uno de los desastres que marcaron al País, la 'Crisis energética', entre el 2 de marzo de 1992 y el 1 de abril de 1993 se ordenó racionamientos de energía y como segunda medida, cambió la hora de Colombia adoptando la que para entonces era la que usaba Venezuela.

Un informe de la Cruz Roja (2011), establece que en Colombia las consecuencias de las sequías se han presentado con mayor fuerza en: la agricultura, por la falta de agua de manera prolongada, lo que provoca la falta de desarrollo de los cultivos; los bosques, que a causa del estrés hídrico, presentan daños en el crecimiento vegetal y son más susceptibles a incendios forestales; la ganadería, también se ve afectada por la deshidratación de los animales y la falta de alimento. Adicionalmente la falta de garantía en los suministros de agua para los distintos usos, afecta la industria, el turismo y la economía.

5.3 DAGUA

La cuenca no presenta un registro claro sobre eventos de sequía, los efectos de ésta, ni estudios detallados. Sin embargo el trabajo realizado por Loaiza (2014) permitió identificar por medio de un diálogo de saberes, que los efectos percibidos durante los eventos de sequía en la cuenca, están clasificados en tres tipos: económicos, relacionados con pérdidas en la inversión de la siembra, en las cosechas y la consecuente disminución de la producción agrícola; sociales, con un aumento de enfermedades como la gripa y la fiebre, en ocasiones pérdida o falta de empleo; desequilibrios en la cotidianidad de los hogares, conflictos vecinales por escasez del agua y otros productos de sustento diario y aparición de enfermedades dermatológicas como los nuches y la proliferación de hongos; también se han presentado efectos ambientales, referidos a los cambios del uso del suelo alternativos a la agricultura, proliferación de peste en animales, zancudos, cucarachas y moscas, así como el aumento en el uso de fertilizantes para "proteger" los cultivos.

Gutiérrez (2013), Gutiérrez, Carvajal, y Ávila (2013), han realizado estudios en la cuenca encontrando que El Niño reduce significativamente la oferta hídrica. Generando desabastecimiento de agua y pérdida de cultivos, que se reflejan en pérdidas económicas e incendios forestales, siendo más intenso en la zona del enclave subxerofítico, ubicado en la parte media de la cuenca. Según la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), 2012, ésta cuenca está categorizada como vulnerable a incendios forestales, tomando como base la ocurrencia de El Niño, donde se presentaron varios incendios forestales, tales como el ocurrido en cercanías del corregimiento de Atuncela, donde se encuentra el enclave subxerofítico. En el mes de agosto de 2014 se presentaron 33 incendios forestales según estadísticas del cuerpo de bomberos de los corregimientos de Kilómetro 30 y Queremal; igualmente en la cabecera municipal de Dagua (CVC, 2014a). Adicionalmente las altas temperaturas y el déficit de lluvias en la cordillera Occidental, en la vertiente del Pacífico, han originado que los niveles del río Dagua disminuyan aproximadamente en un 50% en los meses de junio, julio y agosto (CVC, 2014b).

6. MARCO CONCEPTUAL

6.1 SEQUÍA METEOROLÓGICA

Está referida al grado de desviación de la precipitación en comparación a un comportamiento normal de una serie de tiempo pre-establecida. Sin embargo, la magnitud de la desviación y del tiempo no son fijos, dependen de la forma como regionalmente evalúan el fenómeno (Crespo, 2005). Las sequías se manifiestan lentamente y pueden durar varios años. Es difícil determinar el número real de víctimas mortales que éstas cobran, debido a su duración y su interacción con los procesos de desarrollo; la muerte no es consecuencia directa, sino producto de una compleja interacción entre la sequía y la vulnerabilidad arraigada en la economía de los hogares (Ángel y Martelo, 2008). La OMM (2006) define la sequía como:

“...fenómeno perjudicial y subrepticio que se produce a raíz de niveles de precipitación inferiores a lo esperado o a lo normal y que, cuando se prolonga durante una estación o durante periodos más largos, hace que las precipitaciones sean insuficientes para responder a las demandas de la sociedad y del medio ambiente. La sequía es una aberración transitoria y en ello se diferencia de la aridez, que es una característica permanente del clima...”

6.2 GRADO DE EROSIÓN DEL SUELO

La erosión es un proceso físico de desgaste que ocurre en la superficie de la tierra y modifica constantemente el paisaje y el grado hace un estimativo del estado degradacional sufrido. Es la principal causa de la desertificación, se origina principalmente por la acción de factores físicos adversos y se acelera por la intervención inadecuada del hombre. Paradójicamente, la falta de lluvias, que son las que provocan la erosión, puede agravar aún más este problema. El 68% de la superficie total de América del Sur se ve afectada por la erosión y en Centroamérica se eleva al 88%. En Uruguay, se estima que más del 80% de la superficie agrícola sufre diversos grados de erosión y en Colombia es del 48% (Morales, C. 2005). Este problema es el de mayor importancia en las zonas de ladera, afectando la producción agrícola. En la erosión avanzada hay una pérdida total o casi total del horizonte orgánico y se forman cárcavas profundas por la acción de las aguas de escorrentía; se estima que cerca del 18% de las áreas del país sufre erosión avanzada (Salazar e Hincapié, 2006).

6.3 GRADO DE PENDIENTE

El declive o desnivel entre alturas diferentes de un terreno se denomina pendiente, y conjuntamente con otras propiedades físicas, químicas y mecánicas del suelo influyen en el uso que se le pueda dar a este último y así adelantar diferentes actividades socioeconómicas Zúñiga (2010). El grado de pendiente es importante porque influye sobre la velocidad y la cantidad de la corriente de agua en superficie, sobre la cantidad e intensidad de luz solar que recibe un determinado sitio e influye en el grado de erosión del suelo y sus características. Así, cerca de la parte superior de una colina, los suelos tienden a ser menos profundos, de textura más gruesa y, por tanto, son relativamente más profundos y de textura más fina al pie de una pendiente. La desecación es menos severa en áreas que dan cara al sol con menor frecuencia y están, por lo tanto, mayormente en la sombra. La desecación también es menor en áreas con posiciones a sotavento, protegidas por los terrenos interpuestos de mayor elevación esas elevaciones son suficientemente altas y abruptas, se podría establecer un efecto de lluvia-sombra que causaría la disminución de la precipitación total (Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), 1993).

6.4 COBERTURA DE SUELO

Hace referencia al aspecto morfológico y tangible del suelo, comprende los aspectos que hacen parte del recubrimiento de la superficie terrestre, de origen natural o cultural, que sean observados y permitan ser medidos con fotografías aéreas, imágenes de satélite u otros sensores remotos. El uso hace referencia a las funciones que se desarrollan sobre aquellas cubiertas, es la calificación de todas las actividades realizadas sobre la cobertura del suelo, de forma parcial o permanente, con la intención de cambiarla o preservarla, para obtener productos y beneficios. Por ejemplo: la minería, la agricultura, la pesca, etc. En consecuencia una misma cubierta puede soportar diferentes usos (recolección, silvicultura y caza sobre cubiertas forestales) y un mismo uso puede desarrollarse sobre diferentes cubiertas (excursionismo sobre cubiertas agrícolas, forestales o urbanas) (GeoCVC s.f.).

La cobertura vegetal del suelo está representada por la cobertura natural, comprendiendo una amplia gama de biomas con diferentes características, desde pastizales hasta bosques; también incluye las coberturas vegetales inducidas por el hombre, tales como las áreas de

cultivos (Comisión Interinstitucional de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá (CICH), 2007). La sustitución de la vegetación natural a cultivos, puede producir cambios en los ciclos del carbono y nitrógeno, en la biodiversidad y en la provisión de bienes y servicios ecosistémicos, convirtiéndose en uno de los principales determinantes del fenómeno conocido como “cambio global” (Baeza, 2009). El 83% de la superficie terrestre está influenciada por la acción del hombre (Sanderson et al. 2002) y se destinan alrededor de 4 millones de ha/año de vegetación natural a la agricultura (Baeza, 2009).

El cambio de cobertura vegetal y uso de suelo además de afectar las propiedades del suelo, incide también al ciclo hidrológico, la falta de cobertura en el suelo disminuye su capacidad de infiltración incrementando la escorrentía superficial, lo que a su vez provoca una mayor erosión; la recarga de mantos acuíferos subterráneos tampoco se puede llevar a cabo, debido a la falta de las raíces de la vegetación que favorecen la infiltración del agua (Marcial, 2011). Los estudios sobre los procesos dinámicos de los cambios en la cobertura del suelo y la deforestación son importantes y necesarios porque proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada (Velázquez, Mas y Palacio, 2002).

6.5 CONFLICTOS POR EL USO DEL SUELO

El uso del suelo para distintas actividades humanas, ya sean productivas, vivienda o infraestructura de desarrollo, es uno de los factores condicionantes de las características estructurales y funcionales de los ecosistemas terrestres, modificando los procesos ecológicos y los patrones de biodiversidad (Alperín, Borges y Sarandón, 2002). Los conflictos de uso de la tierra son el resultado de la discrepancia entre el uso que el hombre hace actualmente del medio natural y aquel que debería tener de acuerdo con la oferta ambiental.

En Colombia el 32,7% del área parcial e intensamente transformada presenta conflictos por sobreutilización, lo cual equivale a 19.652.641 ha. En estas áreas el uso actual no se ajusta a las limitaciones impuestas por la naturaleza. Las regiones naturales del país donde se presentan las mayores extensiones de tierras sobre-utilizadas son: Andina (61%), Amazonia (12%) y Caribe (10%). Mientras que el 37,7% no presenta conflictos de uso, (IGAC y CORPOICA, 2002). Es importante resaltar que el país tiene perspectiva para el desarrollo de

sistemas agroforestales. El 19,28 % del territorio nacional es de vocación agroforestal, lo que contribuye a resolver los conflictos de uso del suelo a través de algunas funciones productivas y de servicios, tales como un efecto positivo en la productividad de los cultivos, reducción de la erosión y mejoramiento de las propiedades físicas y químicas de los suelos, así como buen desempeño en la captura de dióxido de carbono (León, 2007).

El conocimiento del uso de las tierras en el país, en especial aquellas que han sido explotadas durante largo tiempo por el hombre, sirve como indicador directo de la relación actual sociedad medio ambiente, siendo posible definir criterios que apoyan la planificación futura del desarrollo sostenible brindando herramientas para la gestión del riesgo de eventos extremos, como la sequía.

6.6 SUSCEPTIBILIDAD

Desde el punto de vista geomorfológico, los estudios referidos a los riesgos tienen por finalidad la mitigación del desastre, a partir de los conceptos de susceptibilidad del terreno y de la vulnerabilidad de la sociedad. Siendo la susceptibilidad, la probabilidad de ocurrencia espacial de un evento dadas unas ciertas condiciones geo-ambientales; consiste en la valoración de lo que ha pasado. En contraste, la evaluación de riesgo consiste en la predicción de lo que pasará (Soldano, 2008). Las sequías son la principal amenaza para la agricultura, representa una de las causas más importantes de malnutrición y pobreza rural, y sus efectos pueden ser minimizados si se conocen las zonas más susceptibles.

La susceptibilidad expresa la facilidad con la que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las realidades locales del terreno. El estudio de Loaiza (2014) involucró las variables de grado de pendiente, grado de erosión, conflicto por usos del suelo, conectividad de hábitats, proporción de unidades naturales y los resultados la intensidad y la magnitud de las sequías del SPI trimestral para generar mapas de susceptibilidad; encontrando que 50,2% de la cuenca presentó susceptibilidad media a las sequías, principalmente en la zona baja de la cuenca y en el flanco occidental de la cordillera Occidental, el 32,1% de la zona de estudio presenta susceptibilidad alta y solo 4,3%, muy alta, principalmente en la parte alta de la cuenca, cubriendo gran parte del bosque subxerofítico del río Dagua.

“Primero, fue necesario civilizar al
hombre en su relación con el
hombre. Ahora, es necesario
civilizar al hombre en su relación
con la naturaleza y los animales.”

Víctor Hugo



7. METODOLOGÍA

La metodología empleada se dividió en cuatro fases: la primera corresponde a estudios previos, en la que se realizó una caracterización de la zona de estudio y el análisis de la información. En la segunda fase se seleccionó el índice de sequía y se calcularon algunos parámetros de ésta, posteriormente se aplicó el método multicriterio para determinar el grado de importancia de cada factor condicionante y finalmente se realizaron los mapas de zonificación de susceptibilidad. La Figura 3 muestra el esquema metodológico.

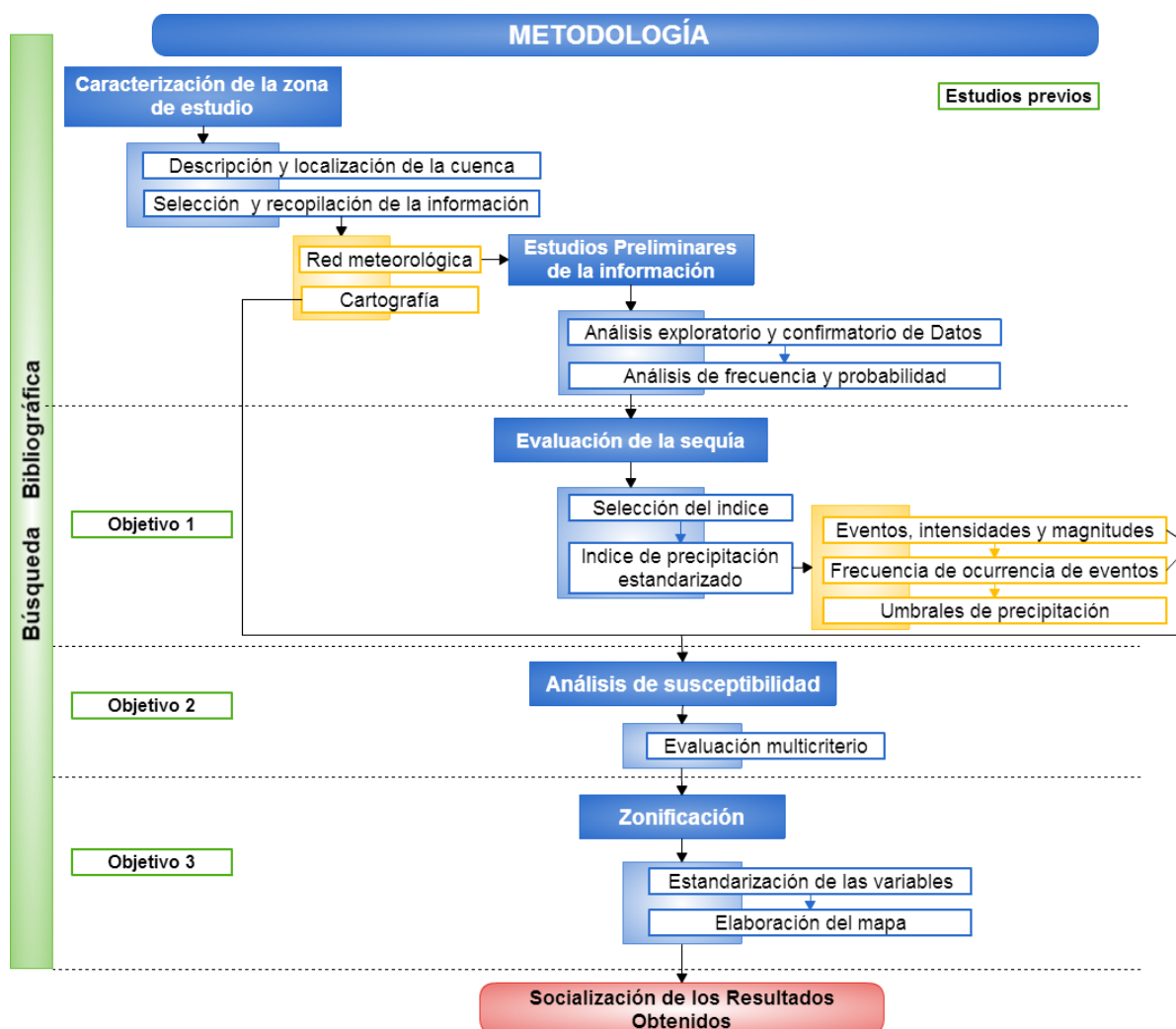


Figura 3. Esquema metodológico. Elaboración propia.

7.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

7.1.1 Descripción y localización de la cuenca de estudio

La cuenca del río Dagua se encuentra localizada en el pacífico vallecaucano en la vertiente oriental de la cordillera occidental, en jurisdicción de los municipios de Restrepo, La Cumbre, Dagua, Buenaventura, Yotoco y Vijes (CVC, 2007). Cuenta con una extensión de 1422 Km² de las cuales el 98,2% del área corresponde a la zona de ladera y el 1,8% a la planicie marina (CVC, 2008). Al norte limita con la cuenca del río Calima, al sur con la cuenca del río Anchicayá y la cuenca del río Cali, al occidente con el océano Pacífico y por el oriente con las cuencas de los ríos Yotoco, Vijes, Arroyohondo y la quebrada (CVC, 2007). En la Figura 4 se muestra la ubicación de la cuenca.

La cuenca juega un papel importante, entre otros aspectos por la conectividad que representa para el país con el principal puerto sobre la costa pacífica, el puerto de Buenaventura y, por lo tanto, para la competitividad de la industria. Sin embargo se ve afectada por la difícil transitabilidad que en ocasiones afecta la carretera Buga - Buenaventura, por derrumbes, deslizamientos y por el alto costo de dragado del canal de acceso debido al volumen de sedimentación (alrededor de 255.000 toneladas de lodo y sedimento por año, se depositan en el río Dagua y sus afluentes en la Bahía). Adicionalmente la poca cobertura vegetal en la parte alta de la cuenca y la erosión que ha avanzado en un 89%, la contaminación del recurso hídrico y la inestabilidad geológica de la capa vegetal existente, se combinan con la alta pluviosidad de la zona para hacer de ésta una cuenca hidrográfica altamente vulnerable (CCI, 2008).

Sumado a lo anterior, presenta otros problemas como: la incorporación paulatina de nuevas áreas de producción dentro de zonas de reserva, el manejo inadecuado de los sistemas agrícolas y pecuarios, restricciones sobre el uso del agua, degradación de suelos, problemas sociales de eliminación del predio familiar, alquiler de la tierra, concentración de recursos y de la producción (Daza et al., 2012).

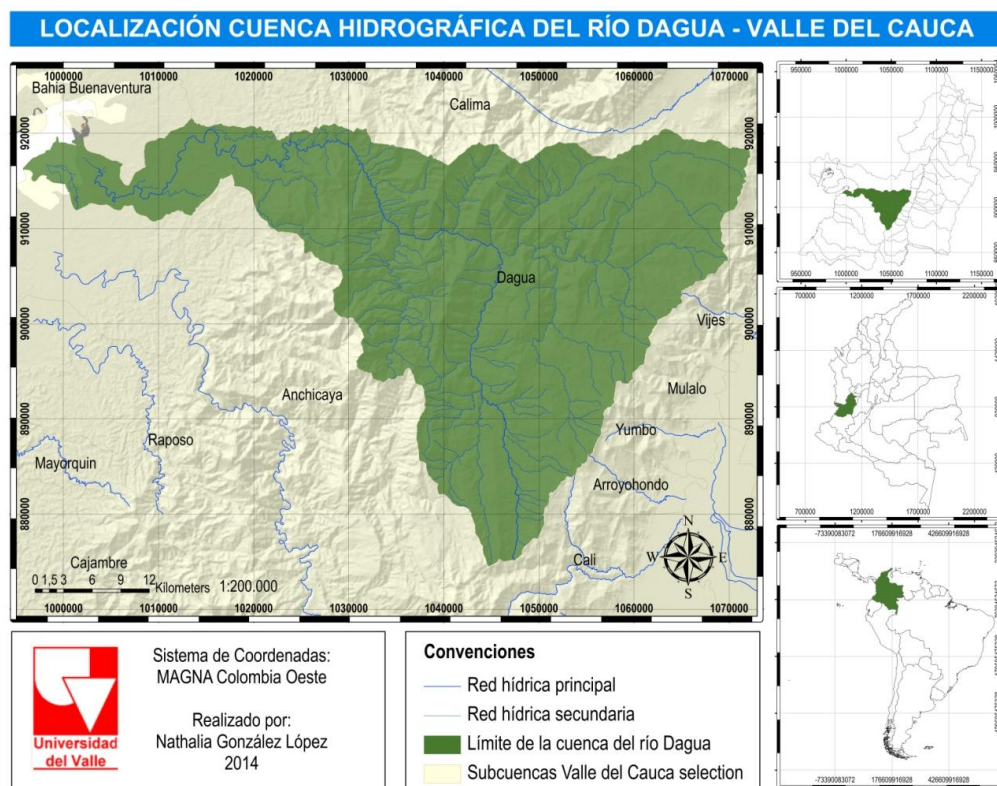


Figura 4. Localización de la cuenca del río Dagua.

Una de las actividades más importantes es la agricultura, predominando el cultivo de café combinado con plátano (5,6%), aunque en algunos sitios han sido reemplazados por pastizales para ganadería extensiva. También se encuentran cultivos como maíz, hortalizas y caña papelera, aunque están en pequeñas extensiones ejercen un impacto importante, el caso más preocupante es el cultivo de piña, ya que se hace en terrenos con pendiente fuerte y con prácticas poco conservadoras provocando una degradación acelerada y por tanto un gran aporte de sedimentos a los drenajes naturales (CVC, 2008).

7.1.2 Selección y recopilación de la información necesaria

Se realizó una búsqueda de la información meteorológica y cartográfica disponible en la zona, recopilando bases de datos de las estaciones pluviográficas (PG), pluviométricas (PM) y climatológicas (CO) representativas de la cuenca y áreas aledañas, pertenecientes a diferentes instituciones como la CVC, el IDEAM y centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFE) y mapas disponibles en la cartografía de la CVC.

7.1.2.1 Selección de la red climatológica

Los criterios para la selección de la red climatológica fueron: ubicación, tiempo de registro, vigencia de funcionamiento, porcentaje de datos faltantes inferiores al 10% entre otros. Se estableció un período común de registro de al menos 25 años, para garantizar que el análisis de los datos sea estadísticamente significativo, seleccionando un total de 19 estaciones de las cuales 11 son pluviométricas, 5 pluviográficas y 3 climatológicas. Las estaciones seleccionadas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Estaciones hidroclimatológicas de la zona de estudio.

Nº	Estación	Categoría	Cuenca	Altitud (m.s.n.m.)	Norte	Este
1	Aeropuerto Buenaventura	CO	Dagua	32,31	917170	1012690
2	Bosque Yotoco		Yotoco	1590,33	920360	1071253
3	Julio Fernández		Dagua	1385,05	912993	1060452
4	Alto Anchicayá	PG	Anchicayá	404,30	887851	1022979
5	Aguacatal		Aguacatal	1824,67	876636	1051588
6	Brasilía		Cali	2020,18	872949	1049738
7	La Teresita		Cali	2112,75	872947	1046033
8	Santa Inés		Yumbo	1668,66	892656	1058935
9	Buenos Aires	PM	Yotoco	1566,48	916465	1071894
10	Dagua		Dagua	895,96	895662	1043320
11	Dapa		Arroyohondo	1722,83	885455	1058155
12	El Tigre		Anchicayá	38,01	900595	1007118
13	La Cumbre		Dagua	1601,48	895151	1056788
14	Loboguerrero	PM	Dagua	654,34	907727	1045940
15	Ocache		Vijes	1541,01	900855	1063237
16	Providencia		Dagua	1268,25	893231	1042302
17	San Pablo		Aguacatal	1774,95	880322	1051586
18	Triana		Dagua	198,90	918241	1030148
19	Villa María		Vijes	1693,06	902960	1066431

CO: Climatológica, PG: Pluviográfica, PM: Pluviométrica.

7.1.2.2 Selección de la cartografía

La información espacial seleccionada corresponde a mapas de grado de pendiente, grado de erosión y conflicto por usos del suelo, pertenecientes a la cartografía de la CVC en una escala de 1:25.000. Adicionalmente se trabajó con mapas de proporción de unidades naturales y conectividad de hábitats, obtenidos a partir del análisis de integridad ecológica, utilizando dos indicadores de software libre FRAGSTAT. El primer indicador, relacionado con la proporción (PLAND), determinó el porcentaje de la unidad espacial natural respecto a la extensión del área; y el segundo, el Euclidean Nearest-Neighbor Distance (ENN), evaluó el nivel de conectividad, es decir, la distancia de entre los parches de la unidad espacial natural de la misma clase; permitiendo conocer que tan alejados están los fragmentos y así evaluar que tan vulnerable se encuentra (Zambrano, Pardo y Naranjo, 2007).

7.2 ESTUDIOS PRELIMINARES DE LA INFORMACIÓN

7.2.1 Análisis exploratorio y confirmatorio de datos de Precipitación

Se realizó el Análisis Exploratorio de Datos (AED) y el Análisis Confirmatorio de Datos (ACD) de las series de precipitación mensual para identificar cambios o tendencias en las series hidrológicas y así determinar la calidad de la información y entender el comportamiento de los datos (Castro y Carvajal, 2010).

Este procedimiento se dividió en seis fases: 1) detección y estimación de los datos faltantes, empleado el método de proporciones normales, 2) análisis gráfico, a través de histogramas, que permitieron observar la forma, el número de picos y los cambios o tendencias en la series y diagramas de cajas para determinar el comportamiento de los datos y hallar posibles valores atípicos, 3) análisis descriptivo numérico, por medio de medidas de tendencia central como la media y la mediana, medidas de dispersión como desviación estándar, varianza, coeficiente de kurtosis y coeficiente de variación. 4) detección de datos atípicos, 5) prueba de normalidad y finalmente 6) el análisis confirmatorio, usando la prueba de U Mann Whitney que es una de las pruebas no paramétricas más utilizadas. La metodología detallada se presenta en el Anexo 1 (los cuales se presentan en el CD adjunto al documento).

7.2.2 Análisis de frecuencia y probabilidad

Se realizaron gráficas de los valores mínimos semestrales y anuales, seleccionados a partir de una suma móvil, la cual consistió en realizar la suma de seis y doce meses consecutivos, seleccionando el menor valor para cada año del período entre 1982 y 2011. El análisis de frecuencia (AF) se realizó para eventos mínimos de precipitación semestral y anual, para períodos de retorno de 5, 10, 20, 30, 50 y 100 años. Las funciones de distribución de probabilidad (FDP) estudiadas fueron Gumbel, Log-Normal y Log-Pearson III. Castro y Hoyos (2004) recomiendan el uso de las distribuciones y el método de ajuste y probabilidad empírica de acuerdo al número de datos. Las series usadas presentan un registro de 29 años, por lo que se utilizó Weibull como probabilidad empírica.

Los métodos para evaluar la calidad de ajuste fueron: el Coeficiente de Correlación de la probabilidad Graficada (CCG), el Error Estándar de Ajuste (EEA) y el Error Cuadrático Medio (ECM). El primero permite determinar visualmente si los datos se ajustan a la distribución teórica, el EEA representa la dispersión de los registros de precipitación estimados respecto a los dados y puede ser valorado como porcentaje con relación a la media de la muestra, y el ECM mide el promedio del cuadrado del error, siendo el error el valor en la que el estimador difiere de la cantidad estimada. En la Tabla 4 se muestra el criterio para determinar la prueba de mejor ajuste, la mejor distribución será aquella que represente mejor los datos.

Tabla 4. Criterios decisorios de las pruebas de ajuste

Prueba de ajuste	Criterio
CCG	El valor del CCG de la serie analizada se encuentra cercano a uno (1)
EEA	El valor de EEA con respecto a la media muestral no debe ser mayor a 15%
ECM	El valor de ECM es el de menor magnitud de las distribuciones analizadas

El proceso de cálculo se automatizó en Excel por medio de una serie de macros, la metodología detallada se muestra en el anexo 2. Tradicionalmente AF se ha utilizado para el análisis de máximas y excedencias de precipitación, sin embargo también permite evaluar la probabilidad de no excedencia asociada a mínimos de precipitación, ordenando los datos de menor a mayor, y teniendo en cuenta que, el mínimo de precipitación tendrá asociada la mayor probabilidad de no excedencia.

7.3 EVALUACIÓN DE LA SEQUÍA METEOROLÓGICA

7.3.1 Selección del índice

Existen un gran número de índices con diferentes grados de complejidad desde los que evalúan solo una variable, la precipitación, hasta los que involucran varios parámetros y se basan en el desarrollo del balance hídrico, como el PSDI (Hurtado y Cadena, 2002; Crespo, 2006). Teniendo en cuenta los requerimientos de los diferentes índices nombrados en el marco teórico se procedió a identificar la información disponible y el tipo de análisis que permitían realizar, a través de una matriz multi-objetivo, que se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Análisis multiobjetivo de los Índices de Sequía.

Características	Índices considerados							
Siglas	PPM	CP	RI	SI	SPEI	PDSI	SDDI	SPI
Requerimientos de Información								
Precipitación	+	+	+	+	+	+	+	+
Temperatura	-	-	-	+	+	+	-	-
Evapotranspiración	-	-	-	-	+	+	+	-
Capacidad de campo de suelo	-	-	-	-	-	+	-	-
Parámetros que Evalúa								
Magnitud/Severidad	+	+	+	+	+	+	+	+
Duración	-	-	-	-	+	+	+	+
Frecuencia	-	-	-	-	+	-	-	+
Velocidad de implantación	-	-	-	-	+	-	-	+
Espaciamiento temporal	-	-	-	-	+	+	-	+
Extensión	+	+	+	+	+	+	+	+
Dispersión espacial	-	+	+	+	+	+	+	+
Resultados								
Calidad de resultados para la zona	B	M	B	B	A	B	B	A
Resultados Comparables	-	-	+	+	+	-	-	+
Nivel de detalle	L - R	L - R	N	x	L-R-N-Mn	R- N	L- R	L-R- N-Mn
Escala temporal de aplicación	Mt	Mt	6-12	x	Mt	U	Mt	Mt
Convenciones	+	Afirmativo	B	Bajo	L	Local	Mn	Mundial
	-	Negativo	M	Medio	R	Regional	Mt	Multescalar
	x	Sin información	A	Alto	N	Nacional	U	Uniescañar

Fuente: Adaptado de Loaiza (2014).

En comparación con otros índices, el SPI presenta ventajas notables, solo requiere de valores de precipitación, lo que facilita su uso en zonas con poca información como la cuenca del río Dagua; permite evaluar una sequía por medio de diferentes parámetros, la calidad de los resultados es alta y permite trabajar diferentes niveles de detalle. Lo anterior del SPI el más apropiado para el análisis de susceptibilidad a sequías en la cuenca.

7.3.2 Índice De Precipitación Estandarizado SPI

Los datos de precipitación mensual fueron agrupados en escalas de tiempo de 6 y 12 meses. Se seleccionaron estas agrupaciones porque los SPI de series mensuales y trimestrales presentan alta sensibilidad, esto se debe, según Velasco et al. (2007), a que cada registro mensual ejerce un efecto significativo en el total de lluvia acumulada, ya que representa el 100% para el acumulado mensual y, en promedio, el 33,3% del trimestral. Mientras que en series semestrales, los SPI se estabilizan y definen con mayor claridad el déficit de la lluvia, ya que cada registro mensual sólo representa el 16,6% del total de lluvia acumulada en el semestre. Los eventos de sequía identificados en escalas trimestrales son de alta frecuencia e Intensidad muy variable, mientras que los identificados en 6 y 12 meses son de menor frecuencia y con valores de intensidad más estables. Una vez definidas las agrupaciones se calculó el SPI, ajustando la distribución de frecuencia de la precipitación a la función la Gamma que de acuerdo a Thom, (1966); Young, (1992), González y Sanz, (2000), Lloyd y Saunders, 2002, es la más apropiada, ésta se expresa en la ecuación 1.

Ecuación 1.

$$g(x) = \frac{x^{\beta-1} e^{-x/\alpha}}{\Gamma(\beta)} \text{ Para } x > 0$$

Donde: α = parámetro de escala ($x > 0$), β = parámetro de forma ($\beta > 0$), x = precipitación acumulada ($x > 0$). Y

Ecuación 2.

$$\Gamma(\beta) = \int_0^{\infty} y^{\beta-1} e^{-y} dy$$

Donde: $\Gamma(\beta)$ = función Gamma completa.

Los parámetros por máxima verosimilitud están dados por las ecuaciones 3 y 4:

Ecuación 3

$$\hat{\alpha} = x_m / \beta$$

Ecuación 4

$$\hat{\beta} = 1/4A [1 + (1 + 4A/3)^{1/2}]$$

Donde: $A = \ln(x) - [\sum \ln(x)]/n$, n =número de datos, x_m = media.

Puesto que la función Gamma no está definida para valores de $X = 0$ y una distribución de la precipitación puede tener ceros, con mayor frecuencia en regiones áridas y semiáridas, la probabilidad acumulada se convierte en:

Ecuación 5

$$H(x) = q + (1 - q)G(x)$$

Donde: Q = probabilidad asociada al número de ceros, $q = m/n$; donde m = número de ceros en la serie y n = total de valores registrados. Y $(1 - q)$ es la probabilidad de que no ocurra un cero.

La ecuación anterior se resuelve mediante tablas de función Gamma incompleta o por medio de un esquema numérico (en este caso la aproximación se hizo a través de las herramientas de Excel). La probabilidad acumulada $H(x)$, se transforma en la variable Z (con media cero y varianza uno); que representa el valor del SPI. Transformación de equiprobabilidad propuesta por Panofsky y Brier (1958), citado por Mckee, Doesken y Kleist (1993), quienes establecieron que la característica esencial de la transformación de una variable aleatoria con distribución preestablecida, en este caso normal estándar, radica en la similitud del comportamiento de la probabilidad de tener un valor dado, igual o menor que la variable aleatoria, tanto en la distribución Gamma como en la transformada. Los valores de Z pueden ser calculados mediante una aproximación, que utiliza las siguientes fórmulas.

Ecuación 6

$$Z = \text{SPI} = -[v - (b_0 + b_1v + b_2v^2)/(1 + b_3v + b_4v^2 + b_5v^3)]$$

Para $0 < H(x) \leq 0,5$

Ecuación 7

$$Z = \text{SPI} = v - (b_0 + b_1v + b_2v^2)/(1 + b_3v + b_4v^2 + b_5v^3)$$

Para $0,5 < H(x) \leq 1$

Donde:

$$v = \sqrt{\ln \left[1 / (H(x))^2 \right]} \quad \text{Para } 0 < H(x) \leq 0,5$$

$$v = \sqrt{\ln \left[1 / (1 - H(x))^2 \right]} \quad \text{Para } 0,5 < H(x) \leq 1$$

$$b_0 = 2,515517 \quad b_3 = 1,432788$$

$$b_1 = 0,802853 \quad b_4 = 0,189269$$

$$b_2 = 0,010328 \quad b_5 = 0,001308$$

El SPI representa el número de desviaciones estándar que cada dato de precipitación se desvía del promedio histórico, así los valores positivos indican condiciones húmedas y los negativos sequías. El SPI calculado para este estudio compara la precipitación acumulada de 6 y 12 meses de un año particular con la precipitación acumulada promedio del registro histórico, el nombre de las agrupaciones corresponde al del último mes; por ejemplo, el SPI semestral de junio (SPIs-Junio), indica la desviación de la lluvia acumulada en el período de enero a junio y el SPI anual de junio (SPI_A-Junio) represente el mes de junio y los 11 meses anteriores. De acuerdo con Zuluaga (2009) y Mckee, Doesken y Kleist (1993) una vez estandarizados los valores de las anomalías son clasificados según los valores de la Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación del SPI.

IPE	Categoría	Gama de colores
Mayor a 2,0	Humedad extrema	
2,0 a 1,5	Humedad severa	
1,5 a 1,0	Humedad moderada	
1,0 a -1,0	Cerca de lo normal	
-1,0 a -1,5	Sequía suave	
-1,5 a -2,0	Sequía severa	
Menor a -2,0	Sequía extrema	

Fuente: Adaptado de Lloyd y Saunders (2002).

7.3.2.1 Eventos de sequía, intensidades y magnitudes

Una vez calculado el SPI, se determinaron los eventos de sequía de acuerdo a la Tabla 6, en la que se indica que una sequía inicia cuando el índice es menor o igual a -1,0, y finaliza cuando se hace mayor a -1. La intensidad es el valor que alcanza el SPI para cada agrupación. En este estudio se determinó el valor promedio de las intensidades de las

agrupaciones semestrales y anuales para cada estación, y con apoyo del ArcGis se elaboró el mapa de distribución espacial de la intensidad media de la sequía en Dagua. Posteriormente se estimó la magnitud de los diferentes eventos de sequía encontrados, a partir de la sumatoria de los valores consecutivos del SPI negativos, es decir aquellos que indicaban un evento de sequía. Este parámetro está definido por la Ecuación 8:

Ecuación 8

$$MS = - \left(\sum_{j=1}^n SPI_{ij} \right)$$

Donde: j : primera agrupación con sequía, n : agrupación en la que termina la sequía.

7.3.2.2 Frecuencia de ocurrencia de eventos de sequía

Dado que las magnitudes de los eventos de sequía pueden tomar diversos valores, se decidió analizar el riesgo de ocurrencia de sequías de diferentes magnitudes para la agrupación semestral y anual. Ángel y Martelo (2008), proponen una clasificación para la agrupación trimestral: Leve (1 a 2), Poco fuerte (2 a 3), Fuerte (3 a 4), Muy fuerte (4 a 5) y Extremadamente fuerte (≥ 5), sin embargo como se manejan agrupaciones más largas, esta clasificación no representaría adecuadamente los eventos de sequía analizados, ya que las magnitudes son mayores, y se podría incurrir en el error de catalogar un porcentaje elevado de eventos como extremadamente fuerte. Por tanto se elaboró una nueva clasificación, con las mismas 5 clases pero con nuevos rangos, de acuerdo al comportamiento de los datos, la cual se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Clasificación de las sequías de acuerdo a la magnitud del SPI.

Sequía	Semestral	Anual
Leve	$1 \leq M < 5$	$1 \leq M < 10$
Poco Fuerte	$5 \leq M < 10$	$10 \leq M < 20$
Fuerte	$10 \leq M < 15$	$20 \leq M < 30$
Muy fuerte	$15 \leq M < 20$	$30 \leq M < 40$
Extremadamente fuerte	> 20	> 40

Posteriormente se calculó el porcentaje de ocurrencia de los tipos de sequías y se elaboraron mapas de distribución espacial, que constituyen un elemento para la planificación.

7.3.2.3 Umbrales de precipitación que indican el inicio de sequía

Para encontrar la lámina de lluvia (mm) que corresponde al límite mínimo para que ocurra una sequía, se retrotrajeron los valores del SPI= -1 de las series de cada estación de análisis, esto es, determinar la ecuación característica de los valores del SPI (x) asociados al valor de la precipitación acumulada para cada agrupación (y), y calcular la lámina de lluvia correspondiente y, por tanto, el valor umbral de precipitación para el inicio de la sequía, cuando SPI es -1. Si en una agrupación "x" no logra acumularse esa cantidad de lluvia, en dicha agrupación temporal ocurriría una sequía (Hernández, 2008).

7.3.2.4 Cobertura espacial de la sequía

Para delimitar el análisis de la información obtenida del cálculo del SPI semestral y anual se determinó la cobertura espacial de la sequía, en el cual se calculó el porcentaje de estaciones afectadas por valores de $SPI \leq -1,0$ en cada una de las agrupaciones (semestrales y anuales) en los años de registro. Con base a esta información, se seleccionó un grupo de años que presentaron sequía en una alta proporción de estaciones, y dentro de esos años, se seleccionaron eventos específicos para realizar el análisis de susceptibilidad.

Objetivo 2

7.4 EVALUACIÓN MULTICRITERIO PARA ANALIZAR LA SUSCEPTIBILIDAD A SEQUÍAS METEOROLÓGICAS

Para evaluar la susceptibilidad a sequías meteorológicas, se analizó la cobertura del suelo, el grado de erosión y de pendiente, los conflictos por uso de suelo en la cuenca, la conectividad de hábitats, la proporción de unidades naturales, la intensidad del SPI para períodos seleccionados y la frecuencia de ocurrencia de sequías fuertes. Cada una de las variables, que constituyen indicadores de estudio, se evaluaron de acuerdo a la incidencia positiva o negativa que tienen en la susceptibilidad a sequías; para ello, se aplicó el método de ponderación: evaluación multicriterio, que permite evaluar que factor presenta una mayor o menor importancia en términos de susceptibilidad a sequías meteorológicas.

Inicialmente se creó una base de datos mediante la selección y cartografiado de los factores condicionantes del fenómeno, luego se homogenizaron en escala y formato gráfico para integrarlos al SIG. Se determinó analíticamente el peso relativo de cada factor con respecto a los demás por medio de una matriz cuadrada, en la que el número de filas y de columnas se definió por el número de factores seleccionados, y se les asignó un valor que representa la importancia relativa del factor de su fila respecto al de su columna en cuanto a una posible sequía. Saaty (1980) propone una escala de preferencias (ver Tabla 8) formada por 9 juicios de valor, del 1 al 9, los números 2, 4, 6, y 8 establecen juicios intermedios y el rating recíproco (1/9, 1/7, 1/5,...) indica que el factor situado en la columna es preferido al de la fila. El autovector principal de la matriz, representa el orden de prioridad de los factores y determina los pesos de éstos, mientras que a partir del autovalor máximo se puede obtener una medida cuantitativa de la consistencia de los valores asignados en la comparación entre pares de factores, como es la razón de consistencia (CR, por sus siglas en inglés: Consistency Ratio). Valores de CR inferiores a 0,10 indican que los valores asignados son satisfactorios, por el contrario si son superiores, éstos deberán ser evaluados nuevamente. La metodología detallada de este método de ponderación, que a su vez constituye una guía para la el cálculo de los pesos usando la evaluación multicriterio se explica en el anexo 3 y en el anexo 4 constituye el documento proporcionado al panel de expertos.

Tabla 8. Escala numérica para la valoración de importancia.

Calificación Numérica	Escala Verbal de la Preferencia	Definición
1	Igual	Ambos elementos son de igual importancia.
2	Igual-Moderada	Importancia entre igual y moderada de un elemento sobre otro
3	Moderada	Moderada importancia de un elemento sobre otro.
4	Moderada-Fuerte	Importancia entre moderada y fuerte de un elemento sobre otro.
5	Fuerte	Importancia fuerte de un elemento sobre otro.
6	Fuerte-Muy Fuerte	Importancia entre fuerte y muy fuerte de un elemento sobre otro.
7	Muy Fuerte	Importancia demostrada de un elemento sobre otro.
8	Muy Fuerte-Extrema	Importancia entre muy fuerte y extrema.
9	Extrema	Importancia absoluta de un elemento sobre otro.

Fuente: Adaptado de Saaty (1980).

7.5 ZONIFICACIÓN

Para realizar la zonificación de la cuenca de las áreas más susceptibles a sequías meteorológicas, se hizo uso de uno los SIG, el software ArcGis 9.3 el cual permiten entrar, almacenar, recuperar, manipular y analizar los datos geográficos para producir información interpretable que incluye desde datos estadísticos y otro tipo de datos necesarios en un estudio, hasta imágenes de computador y mapas impresos. Este sistema permite evaluar y monitorear los cambios que fenómenos como la VC y CC pueden ocasionar, identificando su alcance e impacto, convirtiéndose en una herramienta fundamental para integrar los parámetros seleccionados y evaluar espacialmente la sequía meteorológica en la cuenca.

7.5.1 Estandarización de variables

Las sequías y los procesos asociados a degradación del suelo impactan negativamente el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas. Una sequía prolongada puede hacer retroceder el desarrollo económico, provocar pérdida de vidas humanas y de la biodiversidad en una región y hasta en países completos. Actualmente el proceso de degradación de suelos en la región Andina avanza a ritmo de unas 2.000 ha/año; a pesar de tratarse de un proceso físico, tiene repercusiones económicas y sociales, ya que, afecta la productividad, la disponibilidad de alimentos y la oferta de la calidad y cantidad de agua (MAVDT, 2005). Bajo este contexto, se desarrolló la escala de evaluación para las características de las variables condicionantes seleccionadas, de acuerdo a la Tabla 9, en la que se presentan valores numéricos del uno al cinco, asociados al nivel de susceptibilidad que representan para una sequía. En la Tabla 10 se presenta la clasificación de cada variable en el rango establecido.

Tabla 9. Escala de evaluación general.

Escala	Nivel de susceptibilidad	Gama de colores
1	Muy baja	
2	Baja	
3	Media	
4	Alta	
5	Muy alta	

Tabla 10. Escala de evaluación de las variables.

Nivel de susceptibilidad	Intensidad de eventos de sequía	Frecuencia de ocurrencia de sequía	Grado de pendiente	Grado de erosión
1 - Muy Baja	> 1	< 20	< 12	Natural
2 - Baja	1 a -1	20 – 40	12 - 25	Ligera
3 - Media	-1,0 a -1,5	40 – 60	25 - 50	Moderada
4 - Alta	-1,5 a -2	60 – 80	50 - 75	Severa
5 - Muy alta	-2 o menos	> 80	> 75	Muy severa

Nivel de susceptibilidad	Proporción de unidades naturales	Conectividad de fragmentos	Conflictos por usos del suelo
1 - Muy Baja	Alta	Alta	Sin conflicto
3 - Media	Media	Moderada	Moderado
5 - Muy alta	Baja	Baja	Alto

7.5.2 Mapa de susceptibilidad a sequías meteorológicas

Una vez obtenida la estandarización de las variables, se realizó un dissolve de todas las coberturas en el software ArcGis 9.3., herramienta que permitió extraer la información pertinente de la capa más robusta, en este caso la clasificación de 1 a 5, con el fin de acotar las columnas de información. Posteriormente, se ejecutó la unión de las siete coberturas de información o variables reclasificadas mediante la herramienta algebra de mapas, la cual permitió realizar una suma lineal ponderada de pesos empleando la Ecuación 9, obteniendo un mapa previo de zonificación, el cual se reclasificó según los rangos propuestos en la Tabla 9, para generar el mapa de zonificación de áreas susceptibles a sequías meteorológicas debido a factores intrínsecos del terreno y a los resultados del SPI.

Ecuación 9

$$I = \sum_{j=1}^n W_j \times X_{ij}$$

Dónde: I= índice de susceptibilidad, W= peso del factor j, X_{ij}= peso de la clase i del factor j (valores normalizados de cada mapa), n= Número de factores.

***“Agua para todos, pero no
para todo... Optimizar este
recurso natural y evitar el
derroche será la única solución
para las necesidades del 2030.”***

José Luis Gallego



8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Estudios previos

8.1 ESTUDIOS PRELIMINARES DE LA INFORMACIÓN

Se seleccionaron estaciones ubicadas en la cuenca del río Dagua y cercanas a ésta, identificando el año de inicio y el último año de registro. Se estableció como período común de registro el comprendido entre 1982 y 2011, descartando 11 estaciones de 30 que se tenían inicialmente por tener un registro menor, a las restantes se les realizó el AED y ACD. La ubicación de las estaciones seleccionadas se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Localización de las estaciones seleccionadas para el estudio.

8.1.1 AED y ACD de la precipitación mensual

Este procedimiento se dividió en seis fases, detección de datos faltantes, análisis gráfico, análisis descriptivo numérico, detección de datos atípicos, prueba de normalidad y finalmente el análisis confirmatorio. Para ello se utilizaron los programas Microsoft Excel, Minitab 16, y SPSS 11.5. Los resultados en extenso se muestran en el anexo 1.

Datos faltantes (DF). Antes de iniciar el cálculo, se determinó el porcentaje de DF de cada serie, para garantizar que estos no superaran el 10%. En la Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos, ninguna de las estaciones presentó un registro con más del 10% de DF por lo tanto de acuerdo a este criterio no se descartó ninguna estación

Análisis gráfico. Se realizaron histogramas que permitieron observar la forma, el número de picos y los cambios o tendencias en la serie y diagramas de cajas para determinar el comportamiento de los datos y hallar posibles valores atípicos. A manera de ejemplo se muestran en la Figura 6 los resultados de la estación Bosque de Yotoco, las gráficas de las demás estaciones se encuentran en el anexo 1.

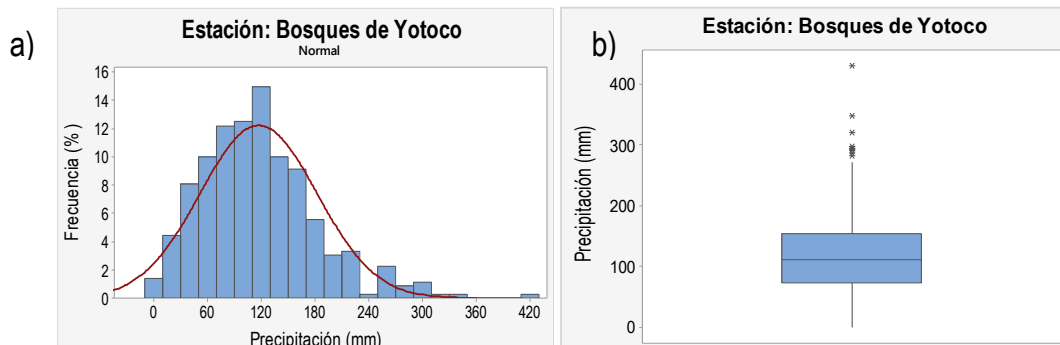


Figura 6. Resultados del análisis gráfico de la serie de precipitación registrada en la estación Bosque de Yotoco. a) Histograma, b) Diagrama de cajas.

Los histogramas de las series de precipitación presentaron un comportamiento normal, la concentración de los datos se encuentra alrededor de la media y los valores extremos tienen una menor frecuencia. En general el 60% de los datos de las estaciones se encuentran alrededor de los 300 mm; sin embargo las estaciones Aeropuerto Buenaventura, Alto Anchicaya, Triana y El Tigre registran valores de precipitaciones más altos en relación a las

demás, pero con frecuencias bajas; cabe resaltar que estas estaciones se encuentran en la parte baja de la cuenca próximas al Pacífico donde los valores de precipitación son más altos. Los diagramas de cajas presentaron una distribución simétrica, siendo posible inferir que la media y la mediana coinciden o presentan valores próximos. La estación Aeropuerto de Buenaventura fue la única que no presentó valores atípicos por fuera de su cerco. El recorrido intercuartílico de aproximadamente el 84% de las estaciones se concentra por debajo de los 400 mm y el mayor recorrido se presentó en las estaciones Aeropuerto de Buenaventura, El Tigre y Triana, lo que podría suponer una mayor dispersión de sus datos.

Análisis descriptivo numérico. Los resultados de la Tabla 11 indican que las estaciones Aeropuerto de Buenaventura, El Tigre y Triana registraron los valores de precipitación promedio más altos y las estaciones Loboguerrero, Dagua, Providencia, Julio Fernández, Ocache y La Cumbre los valores de media más bajos, comportamiento relacionado la localización de éstas en el enclave subxerofítico del cañón del río Dagua. Los valores de la media y la mediana son próximos entre ellos, siendo un poco menor la mediana que la media, comportamiento propio en series con asimetría positiva.

La parte alta y media de la cuenca presenta un comportamiento bimodal de las precipitaciones, es decir, dos períodos de lluvia (entre marzo-mayo y septiembre-noviembre) y dos períodos secos (entre diciembre-febrero y junio-agosto), mientras que la parte baja es monomodal, donde se presentan precipitaciones durante todo el año.

Tabla 11. Resultados del porcentaje de DF y del análisis descriptivo numérico.

Estación	DF (%)	Media	Mediana	Desv. estándar	Coefficiente Variación (%)	Kurtosis
Aeropuerto Buenaventura	3,61	571	557	217	38	-0,32
Aguacatal	0,28	99	94	59	60	1,51
Alto Anchicaya	2,22	272	257	127	47	0,99
Bosque de Yotoco	5,83	117	111	65	56	1,66
Brasilia	0,00	122	111	68	56	0,46
Buenos Aires	1,39	124	114	72	59	0,38
Dagua	4,72	95	91	55	58	2,22
Dapa	0,83	109	97	70	65	1,14
El Tigre	3,61	550	510	320	58	0,23
Julio Fernández	3,33	96	90	48	51	-0,04

Estación	DF (%)	Media	Mediana	Desv. estándar	Coefficiente Variación (%)	Kurtosis
La Cumbre	3,33	103	94	65	63	1,1
La Teresita	0,83	145	138	78	54	0,19
Loboguerrero	2,22	70	58	52	75	1,39
Ocache	6,11	102	95	58	57	1,01
Providencia	3,33	96	86	63	66	5,96
San Pablo	0,28	132	121	87	66	2,52
Santa Inés	0,28	97	90	62	64	0,2
Triana	3,61	578	536	223	39	0,74
Villa María	0,28	96	88	58	60	1,13

La desviación estándar se encuentra entre 48 y 320 mm, siendo mayor en las estaciones El Tigre, Triana y Aeropuerto Buenaventura, resultados que corroboran las observaciones realizadas en el diagrama de caja. El coeficiente de variación oscila entre 38 y 75%, siendo la estación Loboguerrero la más variable y coeficiente de Kurtosis, indica que las estaciones Aeropuerto Buenaventura y Julio Fernández presentaron una distribución platicúrtica, las demás presentaron una distribución leptocúrtica, indicando una mayor concentración de los datos alrededor de la media.

Datos atípicos. Se analizaron los cinco valores máximos de cada una de las series y se compararon con el Valor Máximo Teórico (VMT), aquellos que se encuentran por encima de éste son considerados como valores extremos estadísticamente (ver los valores en anexo 1). Sin embargo después de realizar una detallada revisión de los datos se decidió dejarlos ya que presentaron similitud con los datos de la estación y estaciones cercanas.

Prueba de normalidad y análisis confirmatorio. Se realizó la prueba de normalidad de Shapiro Wilk encontrando que las series no tienen una distribución normal, por lo cual se aplicó la prueba no paramétrica de U Mann Whitney, para comparar las series de cada una de las estaciones entre ellas. Se realizaron en total 190 comparaciones de las cuales 42 cumplieron con la hipótesis nula. Mientras que el 22% del total de las comparaciones realizadas la rechazaron. Estos resultados permiten identificar que estaciones se pueden relacionar para completar datos faltantes, contrastar valores atípicos o redistribuir los datos de precipitación que no fueron tomados en el tiempo requerido (ver anexo 1).

8.1.2 AF para series de precipitación mínimas

La función de distribución de probabilidad que presentó mejor ajuste según los criterios de CCG, EEA y ECM para las series semestrales fue Log-Pearson III para todos los casos mientras que para la anual el 84% se ajustó mejor a Log-Pearson III y el 16% restante a log-Normal, en el anexo 2 se muestran detalladamente los resultados. Una vez que se seleccionó la distribución de mejor ajuste para cada serie se estimaron los valores mínimos de precipitación esperados para los Tr seleccionados, a medida que éste incrementaba el valor mínimo de precipitación se hacía más pequeño. Se seleccionaron tres Tr (5, 30 y 100) para realizaron mapas de distribución espacial de las precipitaciones mínimas semestrales y anuales en la cuenca del río Dagua.

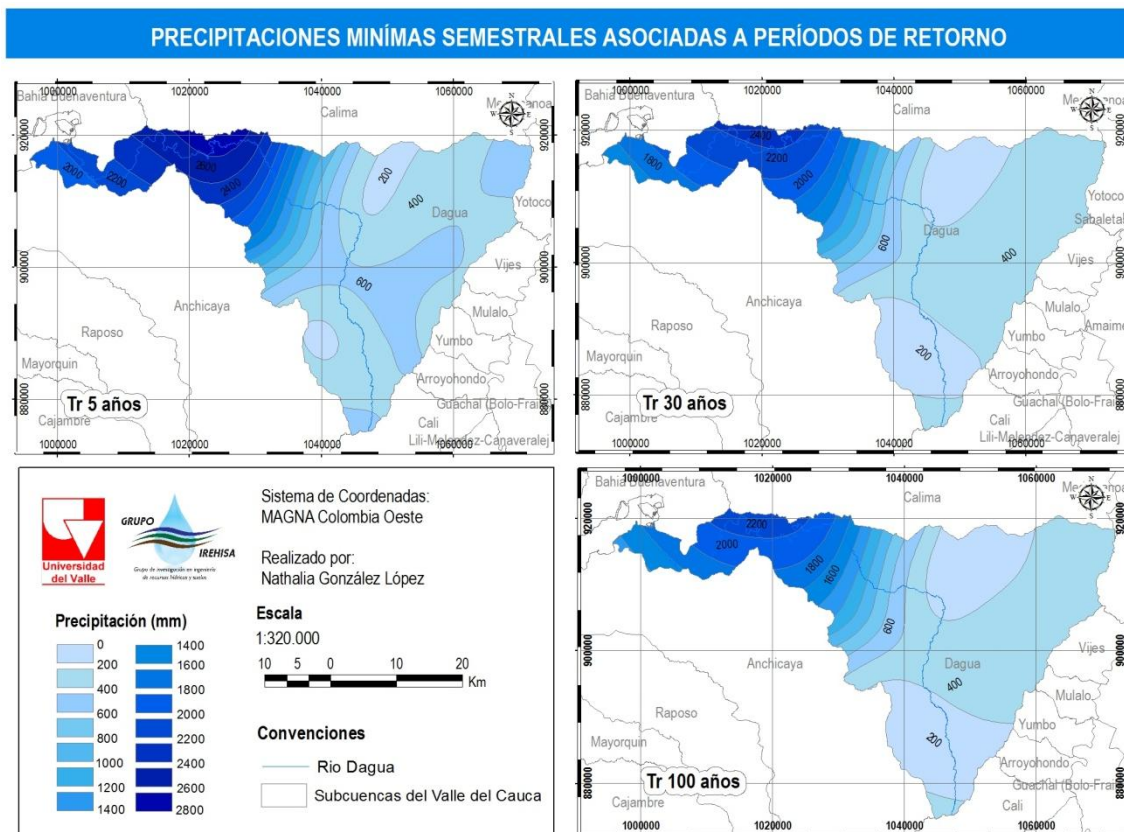


Figura 7. Distribución espacial de las precipitaciones mínimas semestrales.

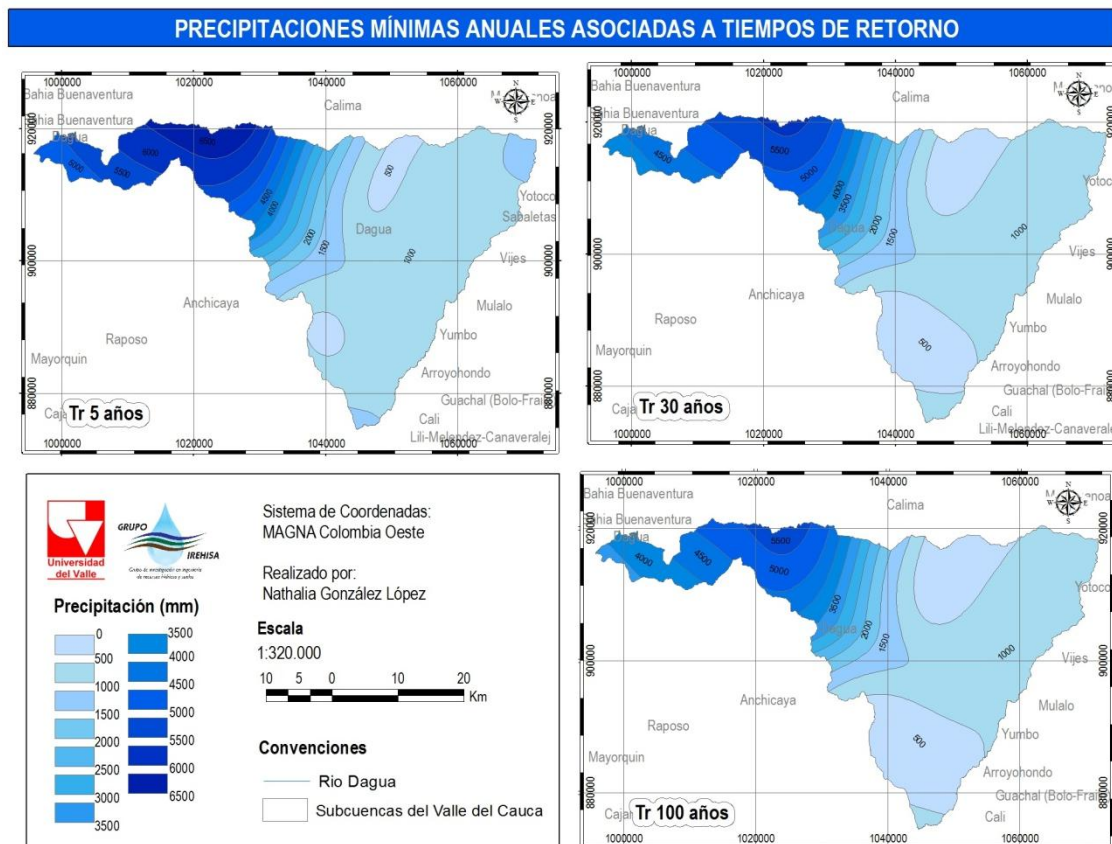


Figura 8. Distribución espacial de las precipitaciones mínimas anuales.

La Figura 7 y la Figura 8 muestran los resultados obtenidos; se encontró que en ambos casos, la parte baja de la cuenca es la que presenta los mayores valores de precipitación estimada, mientras que en la zona alta se esperan valores más bajos, de 0 a 600 mm para las agrupaciones semestrales y de 0 a 1500 mm para las anuales, en más de la mitad de la cuenca; las menores precipitaciones se esperan principalmente en las zonas aledañas a los corregimientos de Loboguerrero y Atuncela donde se encuentra el enclave. La baja precipitación es atribuida a los fuertes vientos enfocados por el cañon del río Dagua en sentido Occidente-Oriente los cuales arrastran la humedad a zonas más altas, generando el fenómeno conocido como sombra de lluvia (CVC, 2008). Por lo anterior, la ocurrencia de un evento de sequía podría tener un mayor efecto sobre la disponibilidad del recurso en esta parte de la cuenca, para las diferentes actividades que ahí se realizan, especialmente aquellas relacionadas con la agricultura, que constituyen la principal actividad económica.

8.2 EVALUACIÓN DE LA SEQUÍA METEOROLÓGICA

8.2.1 Eventos de sequía, intensidades y magnitudes

La intensidad corresponde al valor calculado del SPI, para este estudio se consideró solo los valores negativos inferiores a -1,00 que son los que indican sequía, en el anexo 5 se muestra los valores del SPI. Los resultados de la Tabla 12 indican que en todas las estaciones se reportó al menos un evento de sequía; no hay una tendencia espacial clara sobre las intensidades de éstas, se presentaron desde sequías leves a extremadamente fuertes en cada una de las series analizadas.

Tabla 12. Valores de intensidad promedio, mínima y máxima.

Estación	Intensidad Semestral			Intensidad Anual		
	promedio	mínima	máxima	promedio	mínima	máxima
Aeropuerto Buenaventura	-1,40	-1,01	-2,35	-1,81	-1,00	-2,86
Aguacatal	-1,77	-1,01	-3,35	-1,89	-1,02	-3,17
Alto Anchicaya	-1,66	-1,03	-3,36	-1,48	-1,01	-2,34
Bosque de Yotoco	-1,51	-1,00	-2,46	-1,57	-1,01	-3,16
Brasilia	-1,60	-1,01	-2,78	-1,75	-1,02	-3,02
Buenos Aires	-1,53	-1,01	-2,70	-1,54	-1,00	-3,11
Dagua	-1,48	-1,01	-2,80	-1,51	-1,01	-2,70
Dapa	-1,59	-1,01	-3,85	-1,43	-1,00	-2,00
El Tigre	-1,38	-1,00	-2,51	-1,31	-1,00	-1,85
Julio Fernández	-1,67	-1,00	-3,21	-1,58	-1,01	-3,21
La Cumbre	-1,51	-1,01	-2,03	-1,56	-1,01	-2,29
La Teresita	-1,61	-1,00	-2,46	-1,68	-1,00	-2,59
Loboguerrero	-1,56	-1,06	-2,76	-1,68	-1,02	-3,01
Ocache	-1,47	-1,00	-2,82	-1,59	-1,01	-2,84
Providencia	-1,47	-1,01	-2,18	-1,47	-1,01	-2,10
San Pablo	-1,76	-1,07	-3,30	-1,67	-1,00	-3,27
Santa Inés	-1,57	-1,04	-3,03	-1,61	-1,00	-2,96
Triana	-1,60	-1,01	-3,03	-1,53	-1,01	-2,66
Villa María	-1,47	-1,00	-2,35	-1,47	-1,01	-2,58

La Figura 9 muestra un ejemplo del comportamiento de la intensidad del SPI en la estación Aguacatal para el período 1982 - 2011, que presentó la mayor magnitud de sequía de 37,94, desde octubre de 1991 hasta marzo de 1993, con un pico de intensidad de -2,70 en marzo de 1992. Para la agrupación anual, la misma estación reportó una magnitud de 55,04 que abarcó desde febrero de 1991 hasta abril de 1993, con un pico de -3,17 en noviembre de 1992, alcanzando la segunda magnitud más alta, antecedida por la serie de La Teresita (ver Figura 10) en la que se calculó una magnitud de 73,64 desde noviembre de 1989 hasta abril de 1993, con un pico de -2,59 en junio de 1992. Es posible identificar además, que varios de los eventos de sequía coinciden con años en los que según la NOAA se presentó El Niño. La magnitud máxima de cada serie y las gráficas del SPI se muestran en el anexo 6.

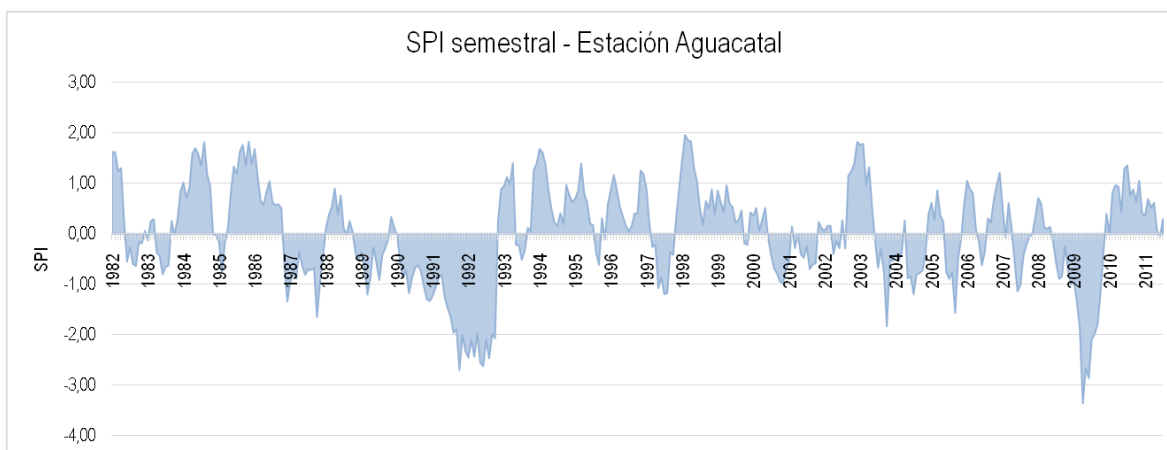


Figura 9. Transcurso del SPI semestral de 1982 a 2011 en la estación Aguacatal.

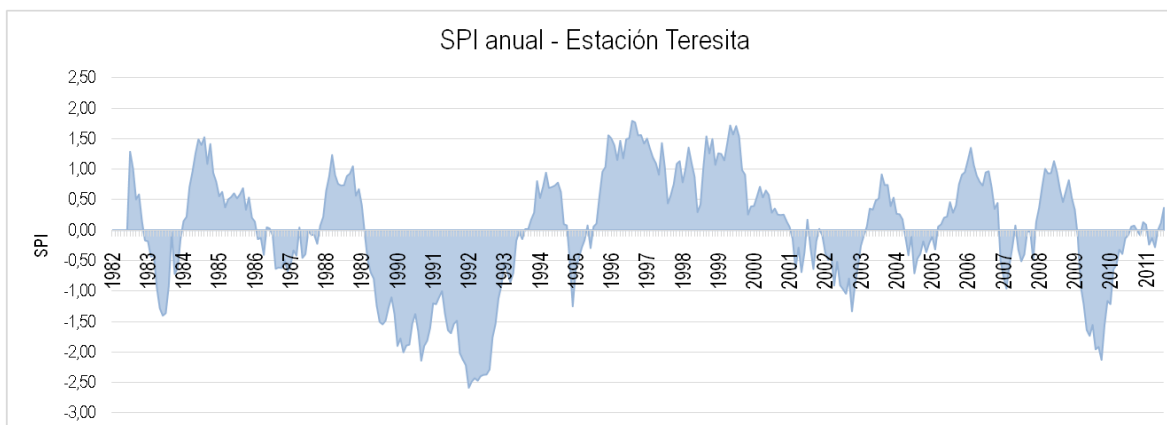


Figura 10. Transcurso del SPI anual de 1982 a 2011 en la estación Teresita.

El análisis se realizó para las 19 estaciones desde 1982 hasta 2011, calculando 6.745 valores del SPI para la agrupación semestral y 6.631 para la anual, de estos solo 1.043 para indicaron sequía (15%) para la primera agrupación y para la anual se estimaron 1.030 eventos (16%). Al determinar el número de eventos por décadas (1982 a 1991, 1992 a 2001 y 2002 a 2011), no se encontró una tendencia al aumento o disminución, en promedio tuvieron un comportamiento similar, estos resultados relativamente bajos podrían suponer que las sequías no han afectado significativamente la zona de estudio, sin embargo es importante recordar que se trata de agrupaciones de 6 y 12 meses y en la zona predomina la agricultura de secano de cultivos como arveja, frijol, maíz, habichuela, pimentón, cilantro, tomate cuyos períodos vegetativos oscilan entre 30 y 150 días (Carvajal et al., 2013), por tanto esta reducción afectaría la producción agrícola impactando en la oferta alimentaria. Adicionalmente se debe considerar la duración de las agrupaciones continuas que estuvieron por debajo del promedio y que constituyen un evento de sequía.

8.2.2 Frecuencia de ocurrencia de eventos de sequía

En la agrupación semestral se reportaron 304 eventos en el período analizado, de sequía los cuales el 4,6%, es decir 14 eventos fueron clasificados como sequía extremadamente fuerte. Para la agrupación anual se reportaron 171 eventos y solo 4 fueron extremadamente fuertes. La Figura 11 muestra el porcentaje de ocurrencia de los diferentes tipos de sequía según su magnitud, para ambas agrupaciones se evidencia que la mayor ocurrencia la tiene la sequía leve y a medida que aumenta su magnitud sus frecuencias son menores.

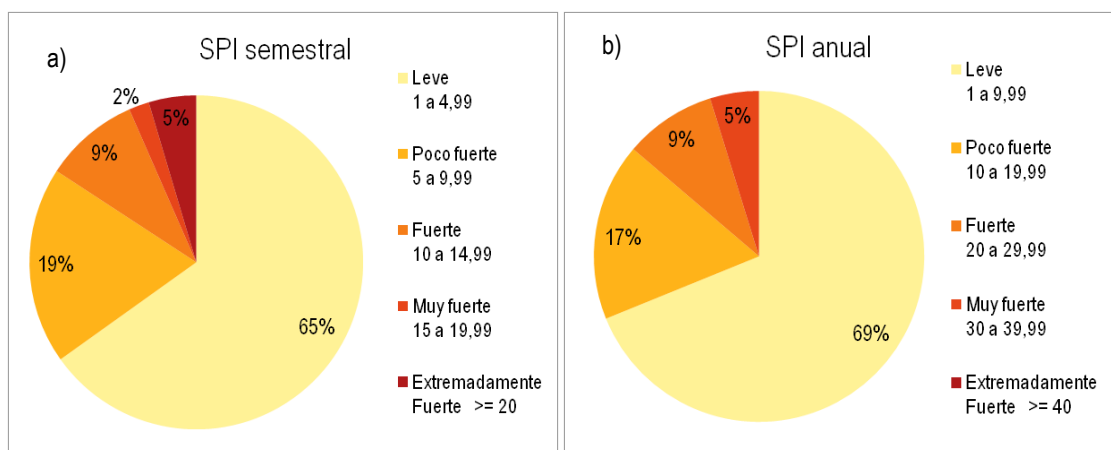


Figura 11. Ocurrencia (%) de eventos de sequía según su magnitud. a) SPI semestral, b) SPI anual.

Las mayores magnitudes no necesariamente presentan las duraciones más largas; la intensidad alcanzada influye también en la magnitud final, por ejemplo la estación Brasilia presentó una magnitud de 29,79 en 16 agrupaciones semestrales, mientras que la estación San Pablo alcanzó una magnitud de 37,71 en solo 15 semestres continuos. En la Tabla 13 y en la Tabla 14 se muestran los diez eventos con las magnitudes máximas para la agrupación semestral y anual respectivamente, se indica la fecha de inicio y finalización del evento, así como la máxima intensidad. Si bien el número de eventos se reduce en las agrupaciones anuales respecto a las semestrales, la magnitud y duración de estos eventos son mayores.

Tabla 13. Magnitud de los diez eventos máximos para la agrupación semestral.

Agrupación semestral - máximos de toda la serie					
No	Estación	Magnitud	Inicio	Final	Intensidad máx.
1	Aguacatal	37,94	Octubre 1991	Marzo 1993	2,70
2	San Pablo	37,71	Abril 1987	Junio 1988	3,30
3	Brasilia	29,72	Octubre 1991	Enero 1993	2,78
4	La Teresita	28,88	Octubre 1991	Enero 1993	2,37
5	San Pablo	26,19	Marzo 1991	Agosto 1992	2,06
6	Providencia	23,80	Diciembre 1991	Enero 1993	2,12
7	Providencia	23,09	Mayo 1987	Julio 1988	1,87
8	La Cumbre	22,80	Noviembre 1982	Diciembre 1983	2,00
9	Ocache	22,61	Agosto 2009	Junio 2010	2,82
10	Loboguerrero	21,84	Septiembre 1997	Junio 1998	2,76

Tabla 14. Magnitud de los diez eventos máximos para la agrupación anual.

Agrupación anual - máximos de toda la Serie					
No	estación	magnitud	inicio	final	Intensidad máx.
1	La Teresita	73,64	Noviembre 1989	Abril 1993	2,49
2	Aguacatal	55,04	Febrero 1991	Abril 1993	3,17
3	El Tigre	48,25	Diciembre 2000	Diciembre 2003	1,85
4	Santa Inés	46,17	Abril 2009	Febrero 2011	2,96
5	Brasilia	37,41	Octubre 1991	Marzo 1993	3,02
6	Bosque de Yotoco	35,89	Febrero 1991	Agosto 1992	3,16
7	Aeropuerto Buenaventura	35,84	Mayo 1983	Septiembre 1984	2,86
8	San Pablo	35,41	Junio 1987	Septiembre 1988	3,27
9	Dapa	32,59	Enero 1991	Septiembre 1992	1,95
10	San Pablo	32,18	Marzo 1991	Noviembre 1992	1,87

Para identificar el comportamiento de las diferentes magnitudes de sequía, se presentan en las figuras 12 hasta la 21 las interpolaciones espaciales que reflejan la frecuencia de ocurrencia de cada tipo de sequía. Si bien es necesaria información socioeconómica para estimar el grado de vulnerabilidad de la zona frente a este fenómeno, y determinar el riesgo que presenta, estos mapas proporcionan información importante sobre el comportamiento de la reducción de la precipitación y por tanto constituyen una herramienta básica para el desarrollo de una planificación estratégica y toma de decisiones referentes a las sequías.

Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía leve

Este tipo de sequías fueron las que presentaron con mayor frecuencia, superando el 50% de ocurrencia en más de la mitad de la cuenca. Para la agrupación semestral se presentaron 198 sequías leves, afectando principalmente la parte central, donde se alcanzó frecuencias entre 90 y 100% en la zona aledaña a los corregimientos de Cisneros y Juntas; la cabecera municipal de Dagua presenta una frecuencia de ocurrencia entre el 70 y 80%, reduciéndose hacia la parte sur de la cuenca; Restrepo se encuentra entre el 30 y 40% (ver Figura 12).

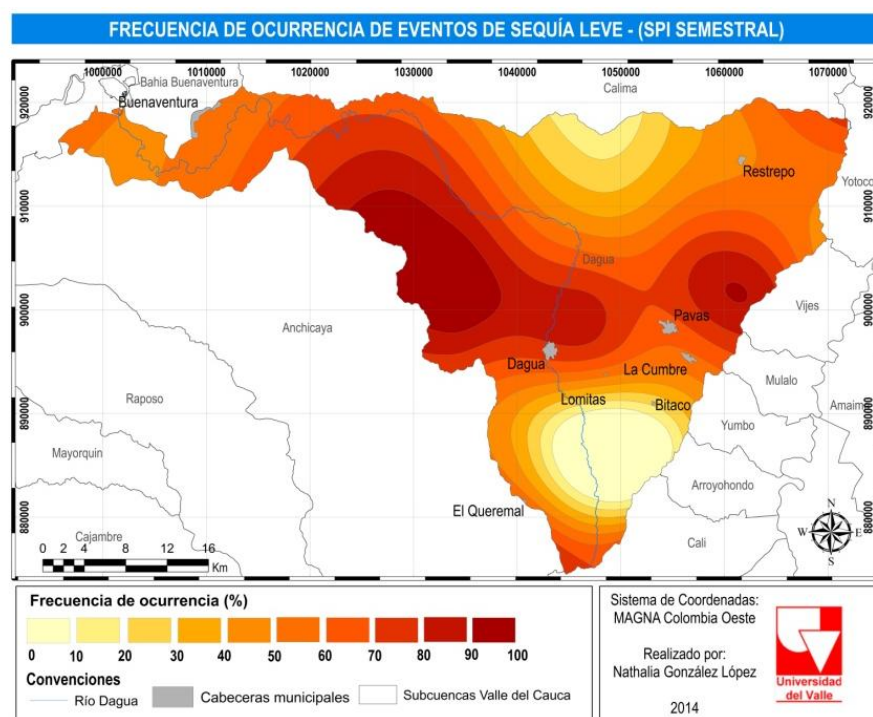


Figura 12. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía leve - agrupación semestral.

Con el SPI anual se determinaron 115 eventos leves, con una distribución similar a la agrupación semestral, salvo en la parte sur de la cuenca en la que el porcentaje aumento considerablemente pasando de frecuencias entre 0 y 10% en áreas cercanas a El Carmen a valores entre el 80 y 100%, tal como se puede ver en la Figura 13. Este tipo de sequías se encuentran asociadas a intensidades moderadas a bajas de corta duración.

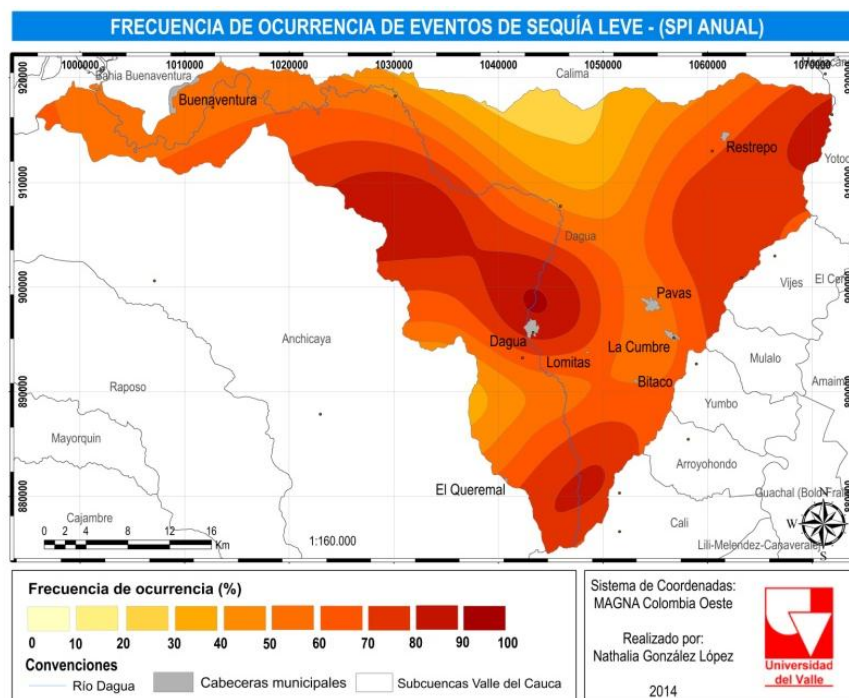


Figura 13. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía leve - agrupación anual.

Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía poco fuerte

La ocurrencia de estas sequías no supera para ninguna de las dos agrupaciones el 60%. Para el SPI semestral se registraron 58 sequías poco fuertes y para el anual 29, con un comportamiento contrario a las sequías leves; Los principales centros poblados presentan frecuencias bajas entre el 0 y 20% (ver Figura 14 para la agrupación semestral). La parte media de la cuenca que se encontraba con una frecuencia de ocurrencia alta de sequías leves, se pudo ver en la Figura 15 que se reducen a un porcentaje entre el 0 y 10%. Estas sequías generalmente corresponden a intensidades moderadas que se presentan en varias agrupaciones temporales consecutivas, es decir que presentan una mayor duración que las sequías leves.

Variabilidad espacio-temporal de la susceptibilidad a sequías meteorológicas en la Cuenca del Río Dagua, Valle del Cauca

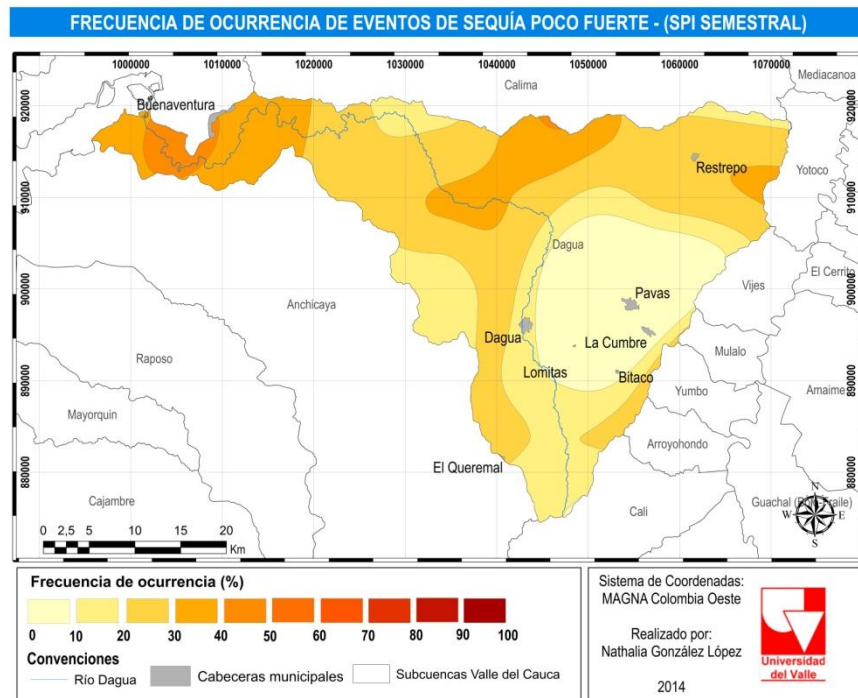


Figura 14. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía poco fuerte- agrupación semestral.

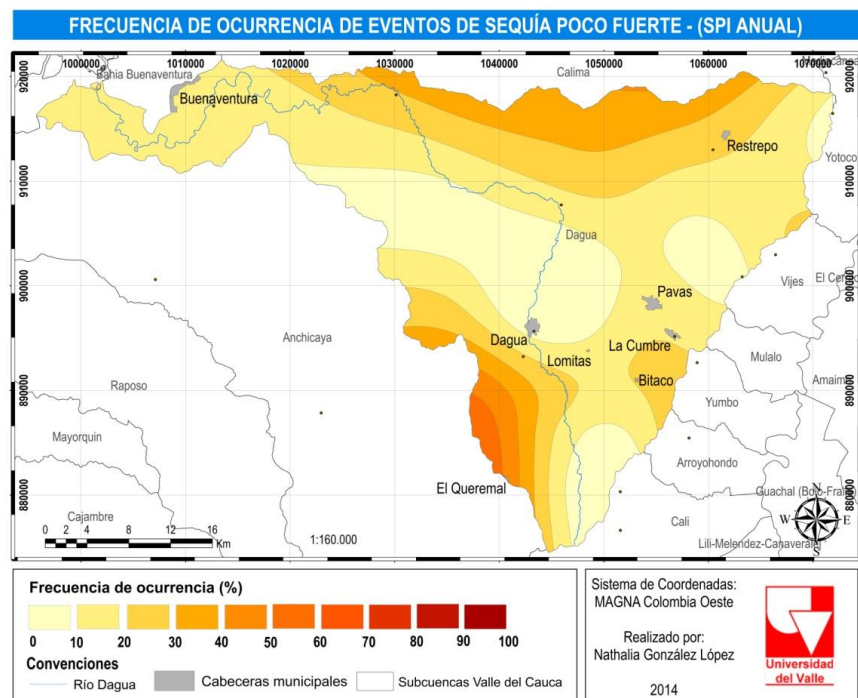


Figura 15. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía poco fuerte - agrupación anual.

Variabilidad espacio-temporal de la susceptibilidad a sequías meteorológicas en la Cuenca del Río Dagua, Valle del Cauca

Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía fuerte

El SPI semestral permitió determinar 28 eventos de sequía fuerte en la zona de estudio, su distribución espacial se muestra en la Figura 16, aunque la frecuencia de estos eventos es baja, entre 0 y 10% para más de la mitad de la cuenca, es importante resaltar que su ocurrencia aumenta hacia la parte Sur-Oriente de la cuenca sobre La Cumbre, Pavas, y El Carmen sin embargo no supera el 50% de frecuencia de ocurrencia en ninguna zona. En la agrupación anual se clasificaron como sequías Fuertes 15 eventos, la ocurrencia de estas sequías es baja, con frecuencias menores al 40% (ver Figura 17).

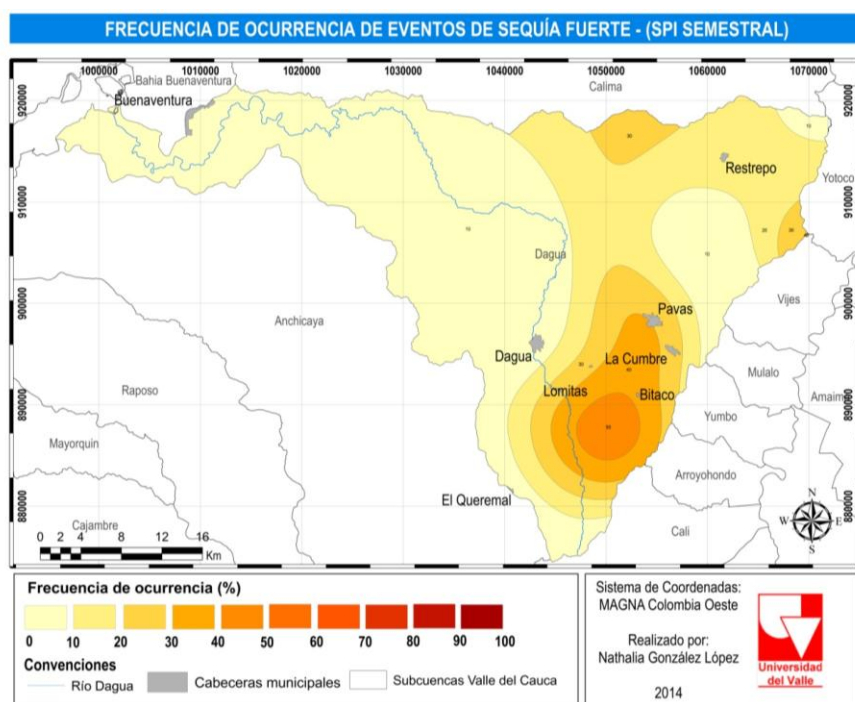


Figura 16. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía fuerte para la agrupación semestral.

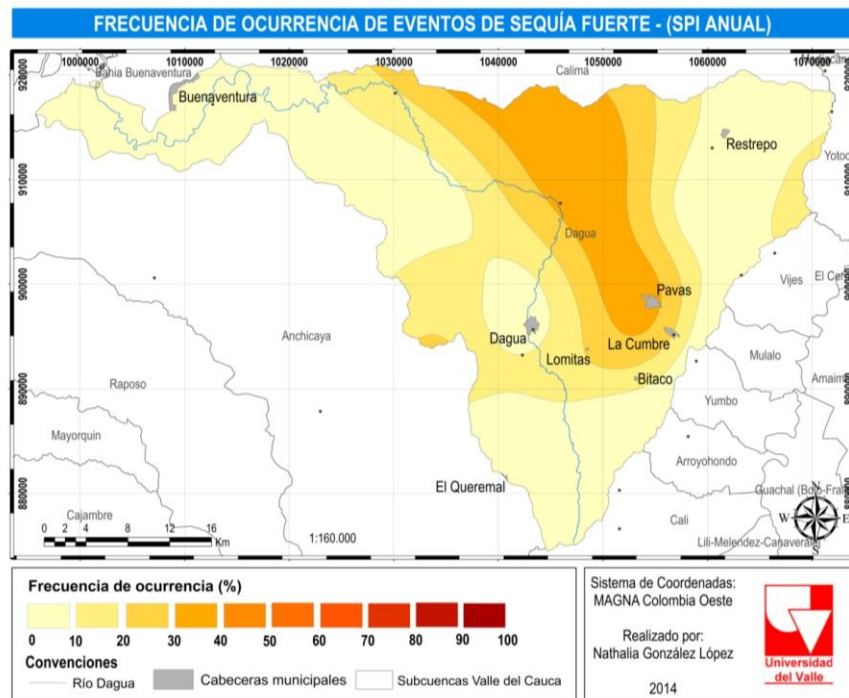


Figura 17. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía fuerte para la agrupación anual.

Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía muy fuerte

Las sequías muy fuertes fueron las que menor frecuencia tuvieron en la agrupación semestral, solo se clasificaron 6 eventos en este tipo de sequías, la Figura 18 muestra que su distribución en la cuenca no supera el 20% y en la agrupación anual se determinaron 8 eventos muy fuertes, igualmente sus frecuencias son bajas en relación a las demás sequías, siendo posible observar que según su distribución en la Figura 19 se presentan con mayor frecuencia en la parte sur de la cuenca hacia la margen derecha del río Dagua y la parte baja de cuenca alcanza valores hasta del 30%. Estas sequías se asocian a intensidades severas y de larga duración.

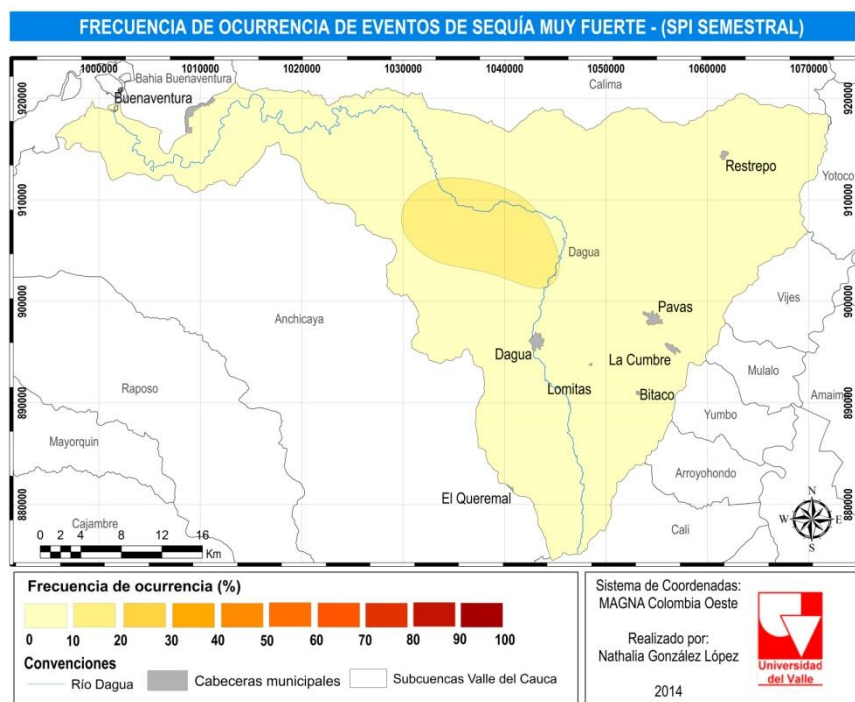


Figura 18. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía muy fuerte - agrupación semestral.

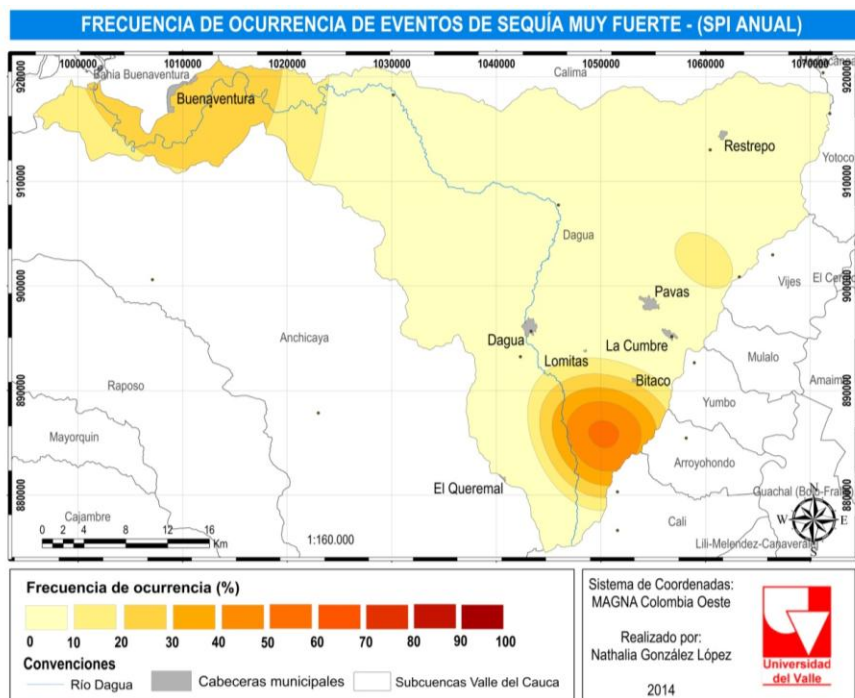


Figura 19. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía muy fuerte - agrupación anual.

Variabilidad espacio-temporal de la susceptibilidad a sequías meteorológicas en la Cuenca del Río Dagua, Valle del Cauca

Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía extremadamente fuerte

En total se determinaron 14 eventos extremos en la agrupación semestral, siendo importante destacar el incremento de frecuencia de ocurrencia de estas sequías en la zona sur de la cuenca, donde se alcanzaron valores hasta del 70% (ver Figura 20), comportamiento totalmente opuesto al observado para las sequías leves donde esta zona presentó frecuencias de ocurrencia de alrededor del 10%. En la parte media donde se encuentra el bosque seco, se obtuvo una frecuencia hasta del 20% de ocurrencia de sequías extremadamente fuertes. Por otra parte, en la agrupación anual este tipo de sequías fueron las que menos se presentaron, solo se detectaron 4 eventos, por lo que su frecuencia de ocurrencia osciló entre el 0 y el 10%, tal como se puede observar en la Figura 21, con un ligero incremento hacia la parte sur cerca de El Queremal.

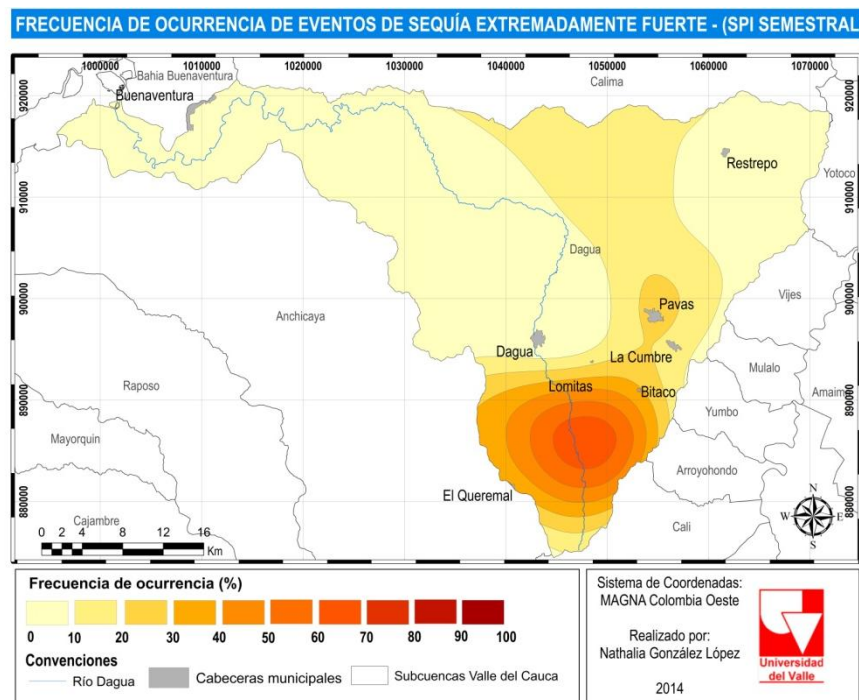


Figura 20. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía extremadamente fuerte - agrupación semestral.

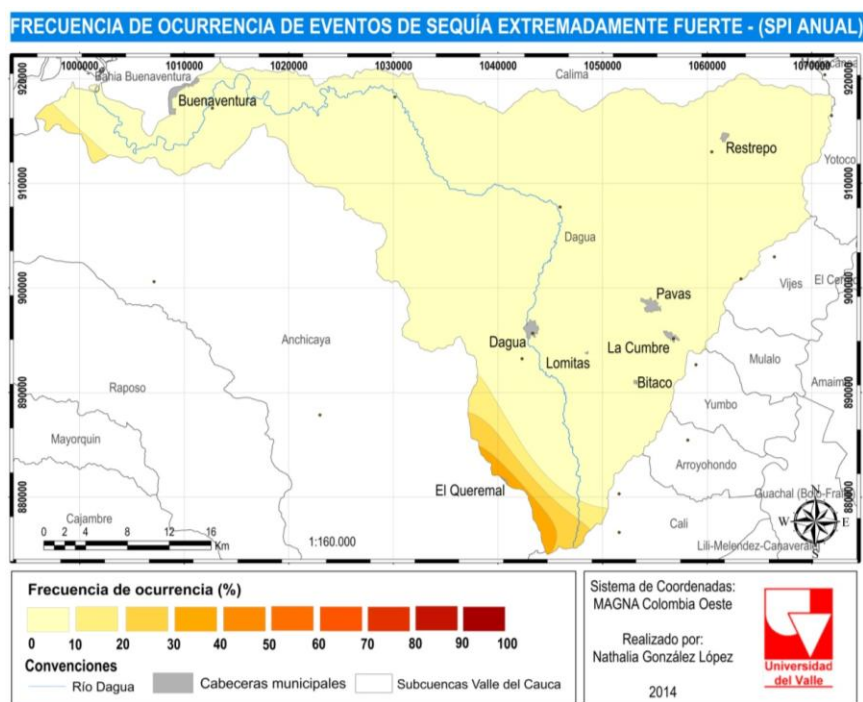


Figura 21. Frecuencia de ocurrencia (%) de sequía extremadamente fuerte - agrupación anual.

8.2.3 Umbrales de precipitación (mm) que indican el inicio de sequía

Una vez se determinaron los eventos de sequía en la cuenca, sus intensidades, magnitudes y su frecuencia de ocurrencia; se calculó la lámina de precipitación a partir de la cual puede ocurrir una sequía, con el fin de proporcionar información clave para generar sistemas de alerta temprana. Para ello se retrotrajeron los valores de precipitación para cada serie cuando el SPI= -1 que es el que indica el inicio de una sequía; por tanto si en una agrupación determinada no logra acumularse la cantidad de lluvia, calculada; en dicha agrupación temporal ocurrió una sequía. En las figuras 22 y 23 se muestran la distribución de los umbrales de precipitación semestral y anual que indican inicio de sequía respectivamente; en ambas agrupaciones se presentó un comportamiento similar, los valores acumulados de lluvia son menores en la parte media y alta de la cuenca, principalmente en las zonas de Loboguerrero y Atuncela, y aumentan hacia la parte baja.

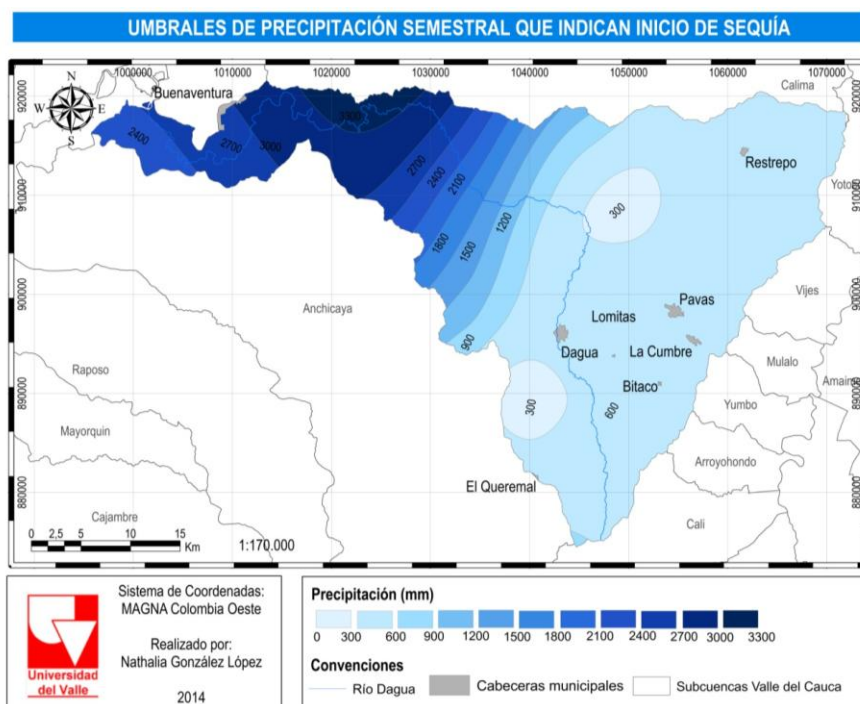


Figura 22. Distribución de umbrales de precipitación (mm) semestral que indican inicio de sequía.

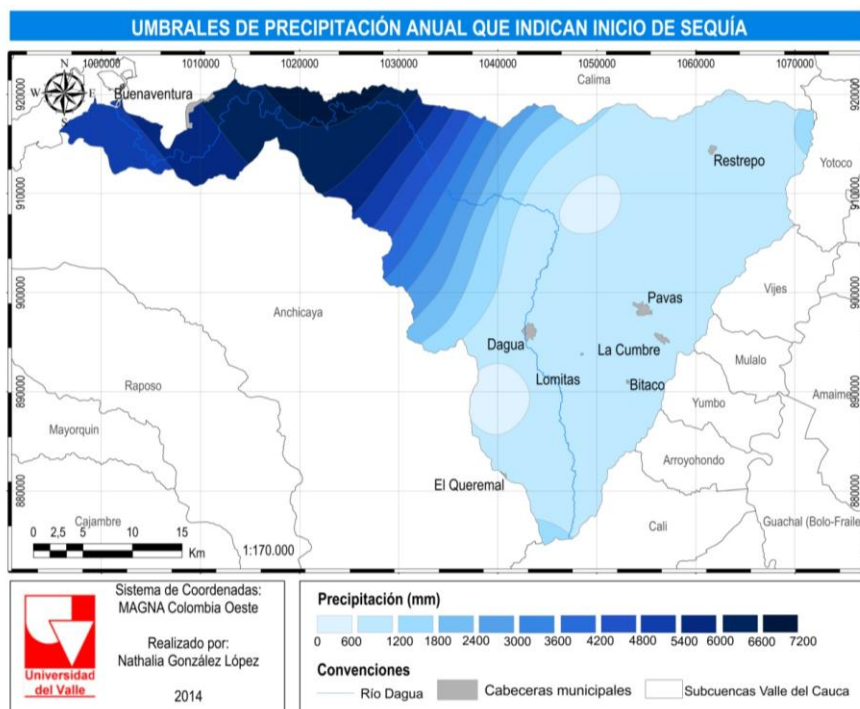


Figura 23. Distribución de umbrales de precipitación (mm) anual que indican inicio de sequía.

Variabilidad espacio-temporal de la susceptibilidad a sequías meteorológicas en la Cuenca del Río Dagua, Valle del Cauca

8.2.4 Cobertura espacial de la sequía.

Para analizar el impacto de la sequía en la cuenca, se eligieron algunos eventos particulares con base a la cobertura espacial que presentaron. Las figuras 24 y 25 muestran los resultados obtenidos, a partir de los cuales, se identificó que tanto para la agrupación semestral como para la anual; el mayor porcentaje de estaciones que reportaron sequía se presentó en el año de 1992, en el cual 9 de las 12 agrupaciones de este año reportaron un porcentaje de localidad mayor al 50%; es decir, que durante casi todo el año se reportó algún evento de sequía en más de la mitad de las estaciones seleccionadas. De forma similar, ocurrió a finales del 2009 hasta comienzos del 2010. Las gráficas de cobertura espacial no muestran en que estaciones se reportó una sequía y por tanto no permiten determinar las zonas con mayor cobertura espacial, tampoco identifica el tipo de sequía, pero proporcionan información para identificar de manera general los periodos en los que el mayor número de estaciones registraron valores de precipitación por debajo del comportamiento normal; y por tanto un evento de sequía sin importar su magnitud o intensidad.

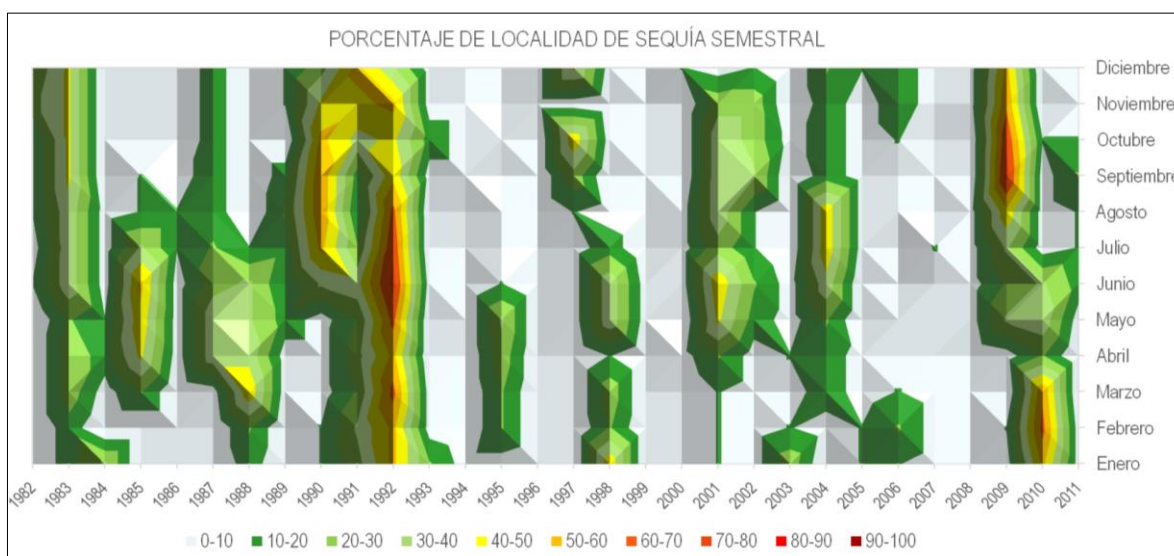


Figura 24. Porcentaje de localidad de sequía en el periodo evaluado para la agrupación semestral.

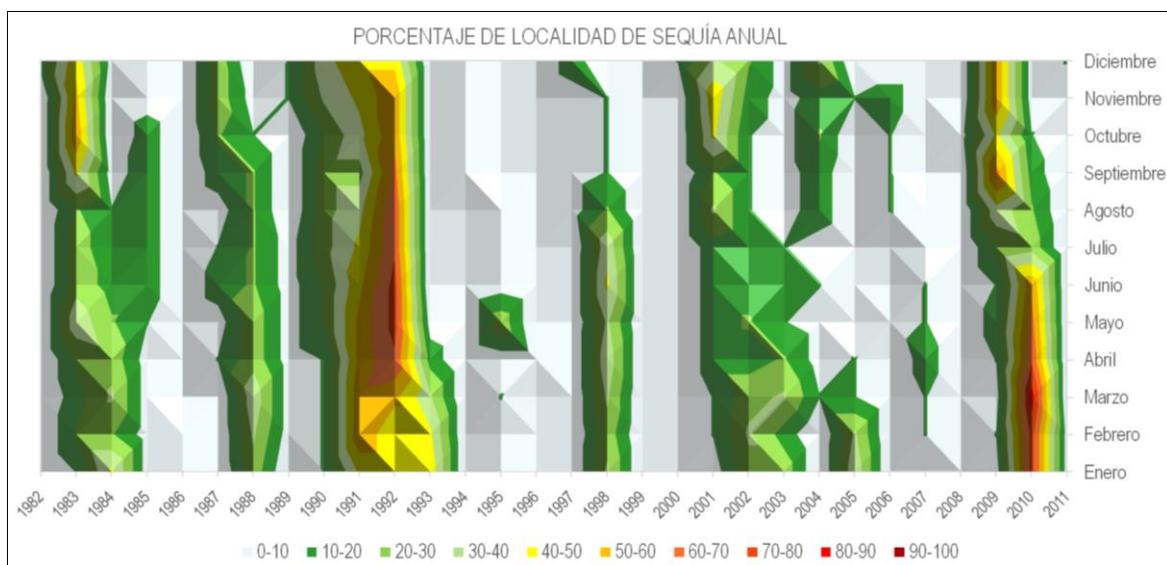


Figura 25. Porcentaje de localidad de sequía en el periodo evaluado para la agrupación anual.

En la Figura 24 se puede observar que en la agrupación semestral la máxima cobertura, fue del 74%, en Junio de 1992 y en septiembre de 2009. Es importante recordar que los acrósticos usados representan el último mes de la agrupación, por ejemplo, para el caso del SPI semestral, en el eje Y, el mes de agosto está representando los meses de marzo hasta agosto. Para la agrupación anual, se alcanzó un porcentaje de cobertura del 84% en marzo de 2010; si bien el comportamiento del porcentaje de ocurrencia de sequías presenta ciertas diferencias entre las agrupaciones usadas, en términos generales, coinciden en los años en los que el mayor número de estaciones registró un evento. Con base en esta información, se eligieron dos períodos para evaluar el comportamiento de la intensidad de la sequía; estos fueron, todo el año de 1992 y desde julio de 2009 hasta junio de 2010, que además de ser los años que presentaron el mayor porcentaje de localidad, coinciden con años en los que se presentó un evento El Niño, según la NOAA. Adicionalmente de estos períodos, se seleccionaron tres eventos de cada uno para la agrupación semestral y para la anual, con el fin de detallar la susceptibilidad a sequías meteorológicas.

Para la agrupación semestral los eventos seleccionados fueron:

- Abril, junio y agosto de 1992 para el primer período.
- Septiembre de 2009 y enero y junio de 2010 para el segundo período.

Del SPI anual se seleccionó:

- Mayo, julio y septiembre de 1992
- Septiembre de 2009, enero y marzo de 2010.

El año 2009 terminó bajo el efecto de un episodio moderado de El Niño que se mantuvo hasta mayo del 2010. Durante este período la dinámica climática del país se vio afectada significativamente generando condiciones secas extremas en algunas regiones. Tras la disipación de este evento, en el Pacífico tropical surgieron las condiciones frías características de La Niña, que sumadas a una condición cálida del Caribe y Atlántico tropical, alteraron el comportamiento de las variables climáticas desde superficie hasta la baja estratosfera, lo cual generó un aumento de los volúmenes de lluvias sobre Colombia con excesos en gran parte del territorio nacional, especialmente en la región Caribe, Andina y Pacífica, durante el segundo semestre de 2010 (Bedoya , Contreras y Ruíz, 2010).

Las Figura 26 y 27 muestran el comportamiento de la intensidad del SPI semestral para los eventos seleccionados y las figuras 28 y 29 para la agrupación anual. Los demás mapas que muestran el comportamiento espacial del transcurso del SPI para los años de 1992 y de julio de 2009 a junio de 2010 se encuentran en el anexo 7.

Primer período seleccionado 1992

Los resultados muestran que la implantación de las sequías extremas en 1992 se dio desde la parte nororiental y suroccidental, formando una especie de corredor entre estas dos zonas en la agrupación de abril, afectando las principales cabeceras municipales, y va reduciendo su intensidad desde la zona nororiental, cerca del municipio de Restrepo, donde en agosto alcanzó niveles cerca de lo normal y para diciembre gran parte de la cuenca presentó intensidades entre 1,0 y -1,0. En la Figura 26 se puede observar que las sequías extremas con mayor cobertura se dan en la agrupación de abril, afectado aproximadamente el 29% del área de la cuenca; y en junio, aproximadamente el 80% de la misma se afectó por algún tipo de sequía. Es importante recordar que en este mapa se involucra la desviación de la precipitación de los meses de noviembre y diciembre de 1991 y de enero, febrero, marzo y abril de 1992; el mapa de junio representa el primer semestre del año y el de agosto muestra el comportamiento del SPI desde marzo hasta agosto. Como se explicó en el AED la cuenca

presenta un comportamiento bimodal en la zona media y alta, por tanto todas las agrupaciones semestrales involucran tres meses lluviosos y tres secos. Según los resultados es posible inferir que el primer trimestre seco (diciembre, enero y febrero) provoca eventos más fuertes en la cuenca principalmente en la zona nororiental y sur occidental cerca del enclave. Adicionalmente en el mapa de diciembre de 1992 para esta agrupación que se muestra en el anexo 7, es posible ver que la intensidad del SPI para esta agrupación indica condiciones de humedad moderada a severa en la zona baja de la cuenca, lo que podría suponer que la precipitación es más intensa en el segundo trimestre lluvioso del año (meses de septiembre, octubre y noviembre).

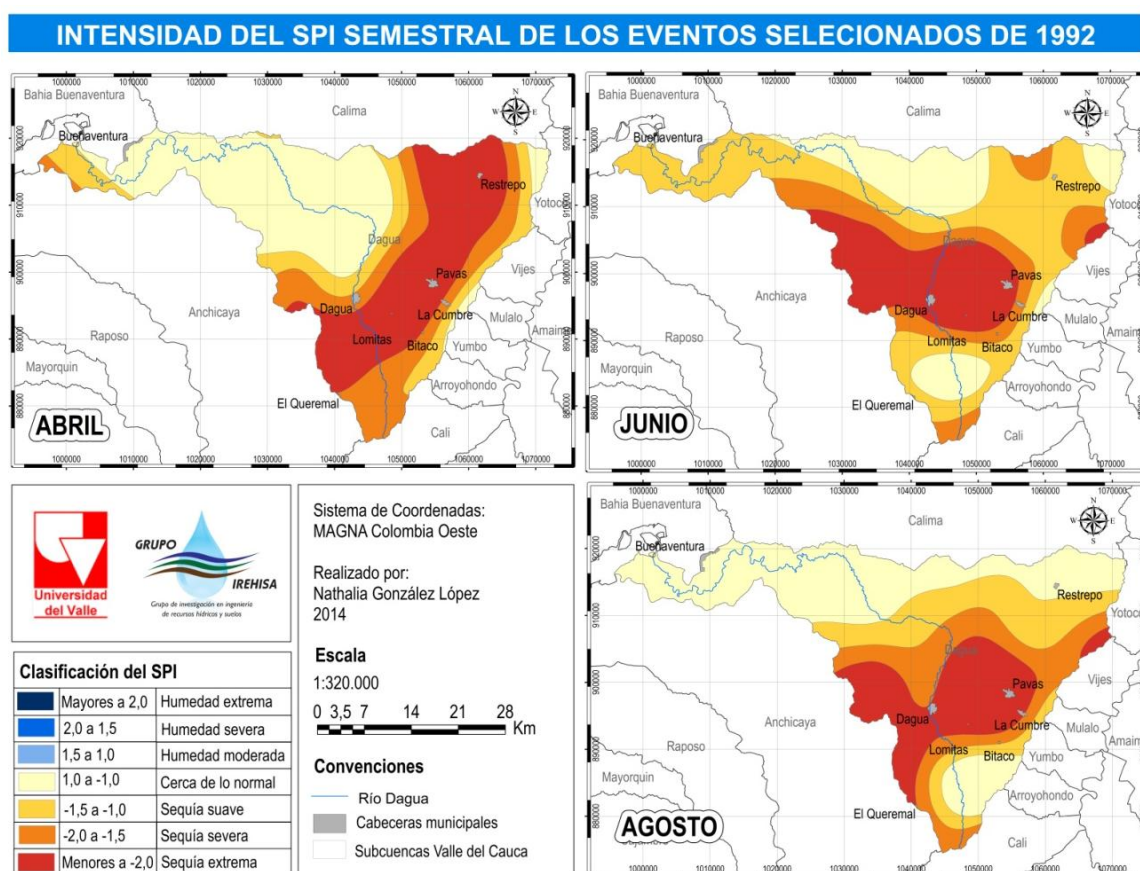


Figura 26. SPI semestral en las agrupaciones seleccionadas de 1992.

El comportamiento de la intensidad del SPI para la agrupación anual, presentó un comportamiento similar al descrito anteriormente, las sequías extremas afectaron los municipios de Restrepo, Vijes, La Cumbre y en la parte sur del municipio de Dagua. De los eventos seleccionados que se muestran en la Figura 27, la agrupación de julio fue la que indicó mayor cobertura de sequía extrema afectado aproximadamente el 37% del área de la cuenca; sin embargo, en la agrupación de mayo el 70% de ésta se vio afectada por algún tipo de sequía; en septiembre predominaron las condiciones cercanas a lo normal (39%).

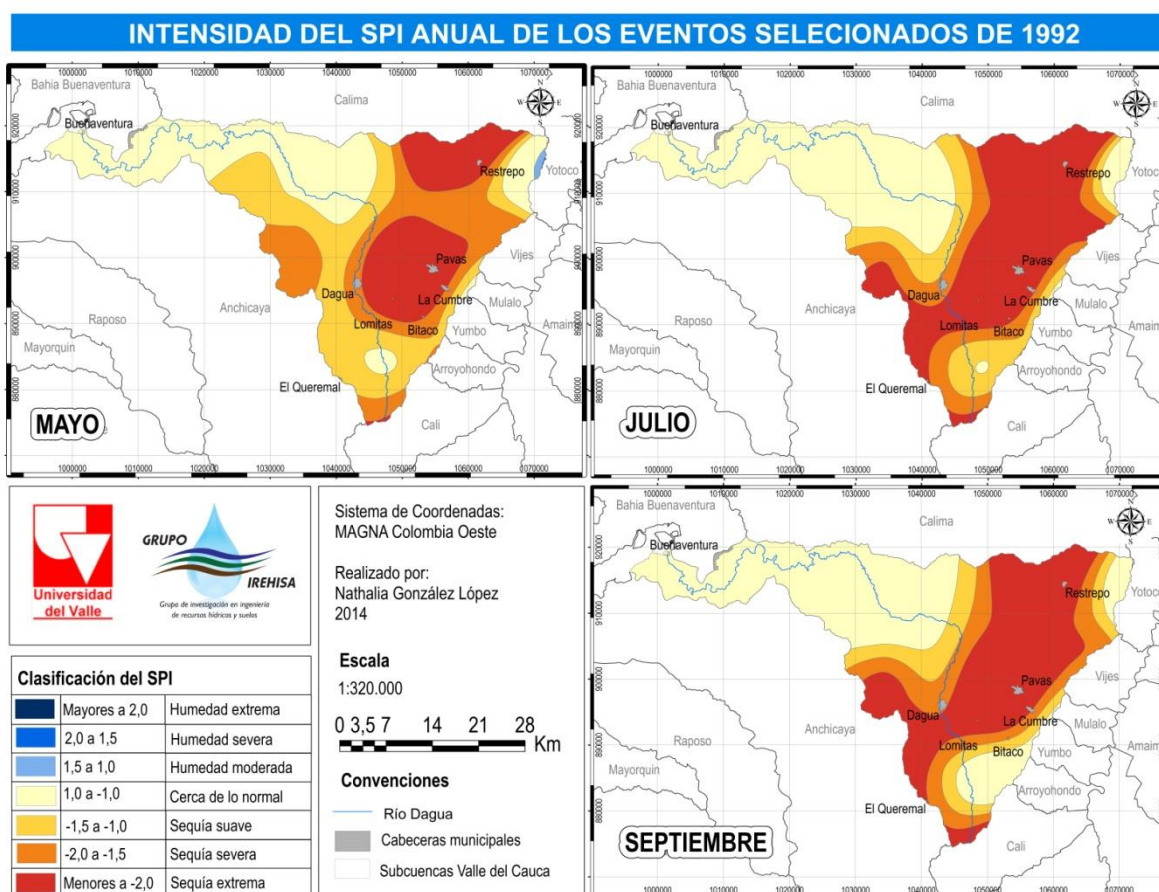


Figura 27. SPI anual en las agrupaciones seleccionadas de 1992.

Segundo período seleccionado julio de 2009 a junio de 2010.

El comportamiento del SPI semestral para el período julio de 2009 a junio de 2010 indicó que para la agrupación de septiembre el 67% del área de la cuenca presentó algún tipo de sequía, predominando la sequía extrema que afectó el 33% de la cuenca principalmente en la zona norte; el 28% tuvo precipitaciones cerca a lo normal y 5% del área presentó humedad de moderada a severa, indicando un ligero aumento de las precipitaciones en la zona baja de la cuenca, en Buenaventura, y en la zona alta, en las proximidades a Bitaco y El Carmen. Para febrero de 2010, el 55% de la cuenca estuvo afectada por eventos de sequía, pero solo en el 8% se presentó sequía extrema, impactando principalmente el nororiente del municipio de La Cumbre y la zona sur de la cuenca. Para junio de 2010, el 23% de la cuenca presentó sequía extrema y el 50% tuvo precipitaciones normales, a diferencia del comportamiento espacial que había presentado el SPI en las anteriores agrupaciones; para este semestre, es posible evidenciar que estas sequías afectaron principalmente en la zona baja de la cuenca; mientras que en la zona media y alta, predominaron condiciones cercanas a lo normal; incluso en algunas zonas del sur oriente de la cuenca, se evidenció un aumento de la precipitación, que alcanzó condiciones de humedad extrema. Sin embargo, dado el régimen de lluvias que se presenta en esta zona, que es la más próxima al océano Pacífico, no se podría asegurar que se trate de eventos de sequía extrema, sino de reducciones significativas en la precipitación, provocadas posiblemente por factores externos ligados a la zona de convergencia intertropical; por tanto es necesario complementar la información de dicha desviación de la precipitación con datos de temperatura, evapotranspiración y la demanda en general del recurso hídrico en dicha zona, en el período evaluado, para determinar con mayor certeza que se trata de eventos de sequía, en el que las láminas de lluvia acumulada no lograron satisfacer las necesidades básicas de los ecosistemas naturales y de la sociedad. Según la National Drought Mitigation Center de los Estados Unidos valores de -2.00 o menos del SPI puede ocasionar pérdidas considerables de los cultivos, con repercusiones en los niveles los ríos, y reservas subterráneas, pozos y almacenamientos superficiales de agua.

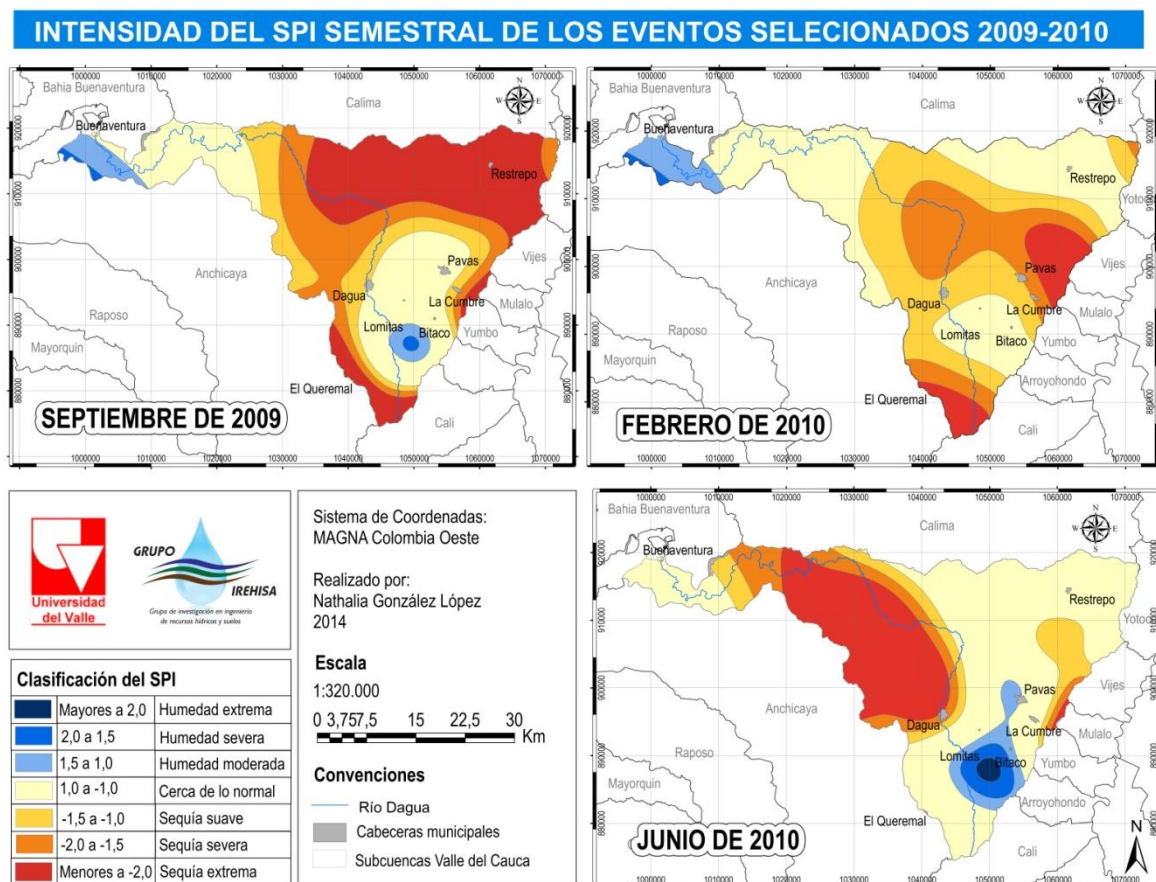


Figura 28. SPI semestral en las agrupaciones seleccionadas de julio de 2009 a junio de 2010.

Para el SPI anual nuevamente se evidenció que las sequías extremas afectan principalmente al norte de la cuenca y la zona suroccidental de ésta; sin embargo se presentaron ciertas tendencias hacia la zona baja, dejando las principales cabeceras municipales de la parte alta, con condiciones cercanas a lo normal o incluso con aumento en la precipitación. Las zonas cercanas al enclave fueron las más afectadas por este fenómeno, evidenciando la necesidad de realizar planes de contingencia y mitigación, con el fin de prevenir condiciones de desertificación y aridez, que sumados a las pendientes, pueden incrementar el grado de erosión, y con ello la cantidad de sedimentos que se vierten al canal, la intensidad y frecuencia de los derrumbes y deslizamientos; impactando en la economía del país, ya que afecta la vía que conecta los principales puertos de Colombia sobre la costa Pacífica con el interior del País. Estos puertos ubicados en la bahía de Buenaventura mueven cerca del

50% de la carga de comercio exterior del País, distinta a hidrocarburos y minería. De la Figura 29 se determinó que para la agrupación anual de septiembre de 2009 predominaron las condiciones cercanas a lo normal en el 43% de la cuenca y el 19% presentó sequías extremas; para enero de 2010, estas últimas se redujeron al 15% del área; sin embargo el porcentaje total afectado por sequías severas y suaves aumentó a un 26 y 23% respectivamente, indicando que el 64% de la cuenca tuvo algún tipo de sequía. El de marzo de 2010 fue el que indicó mayor cobertura espacial de sequía extrema, afectando el 36% de la cuenca y solo el 21% estuvo bajo condiciones cercanas a lo normal; es importante resaltar que nuevamente para esta agrupación se observa una tendencia de aumento de la intensidad del SPI negativo hacia la parte baja de la cuenca.

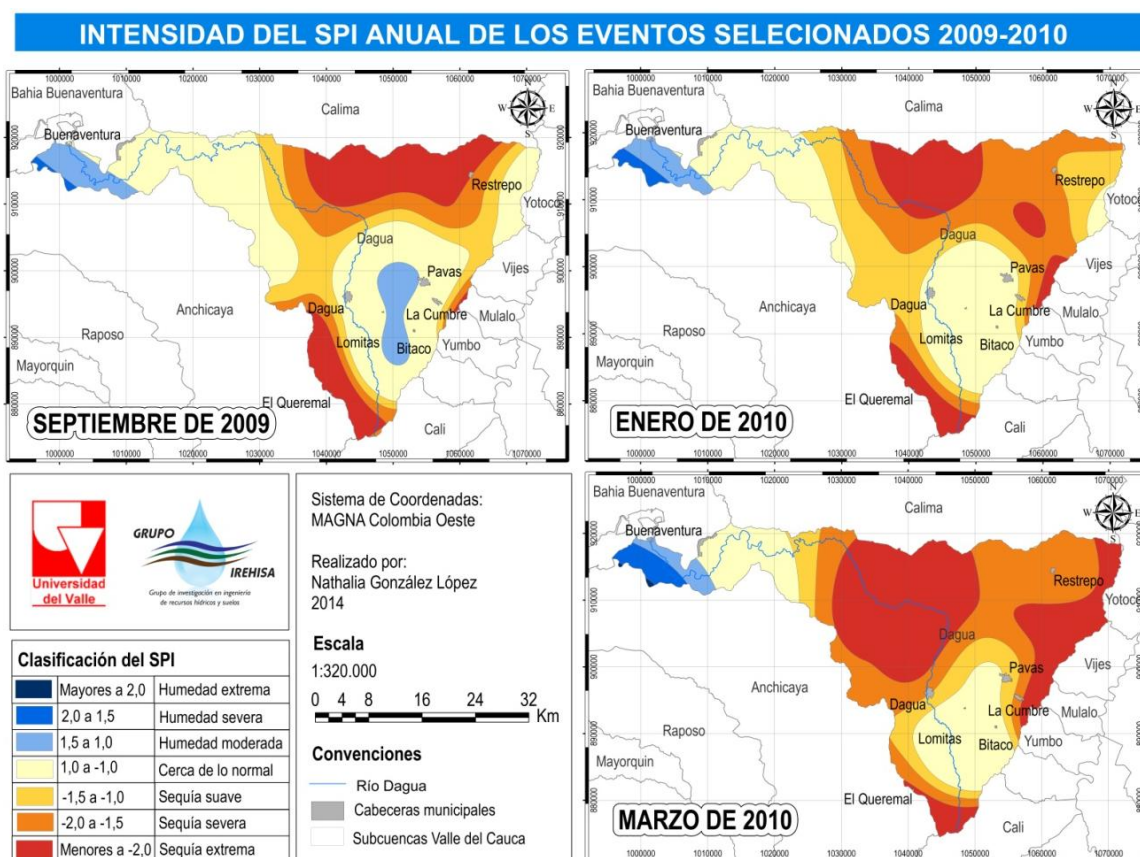


Figura 29. SPI anual en las agrupaciones seleccionadas de julio de 2009 a junio de 2010.

8.3 EVALUACIÓN MULTICRITERIO

Una vez que se aplicó el método de ponderación de evaluación multicriterio, fue posible identificar la importancia de cada uno de los factores condicionantes seleccionados para evaluar la susceptibilidad a sequías meteorológicas, en la Tabla 15 se muestran los resultados obtenidos, los cuales indicaron que la frecuencia de sequías fuertes es el factor con mayor importancia, seguido de la intensidad de los eventos; es decir que según el grupo de profesionales con los que se realizó la matriz de calificación, aquellos factores provenientes directamente del cálculo del SPI, son los que influyen en mayor medida en el análisis de susceptibilidad a sequías meteorológicas, seguidos de los factores de terreno: grado de pendiente y grado de erosión. La conectividad de fragmentos naturales fue el factor menos influyente en la susceptibilidad a sequías meteorológicas. Estos resultados junto con la clasificación de las variables de cada factor que se muestran en la Tabla 10 se incorporaron en la Ecuación 9, obteniendo así la para ingresar al SIG, con el fin de determinar el índice de susceptibilidad de cada zona. La cartográfica de los factores condicionantes se muestran en el anexo 8.

Tabla 15. Resultados del análisis multicriterio para cada factor condicionante

Factor condicionante		Prioridad
Intensidad de eventos de sequía	I	0,27
Frecuencia de ocurrencia de sequías fuertes	F	0,32
Grado de pendiente	P	0,10
Proporción de unidades naturales	N	0,08
Conectividad de fragmentos	C	0,06
Grado de erosión	E	0,11
Conflictos por usos del suelo	S	0,07
Total		1,00

$$I = 0,27(I) + 0,32(F) + 0,10(P) + 0,08(N) + 0,06(C) + 0,11(E) + 0,07(S)$$

8.4 SUSCEPTIBILIDAD A SEQUÍAS METEOROLÓGICAS

Las figuras de la 30 a la 33 muestran la susceptibilidad a sequías meteorológicas para los eventos seleccionados. Los resultados indicaron que en la cuenca predominó el grado de susceptibilidad medio, seguido del bajo y en menor proporción susceptibilidad alta, ésta última se presentó principalmente en la parte media de la cuenca, cerca de las principales cabeceras municipales y próximas al enclave subxerofítico; en los eventos seleccionados no se identificó el grado de susceptibilidad muy alto. En el SPI semestral de 1992, el evento de abril fue el que presentó el mayor porcentaje de área afectada por susceptibilidad alta (8%), sin embargo para los eventos analizados ésta no supera el 10%. En junio de ese mismo año el 60% del área de la cuenca tuvo un nivel de susceptibilidad medio.

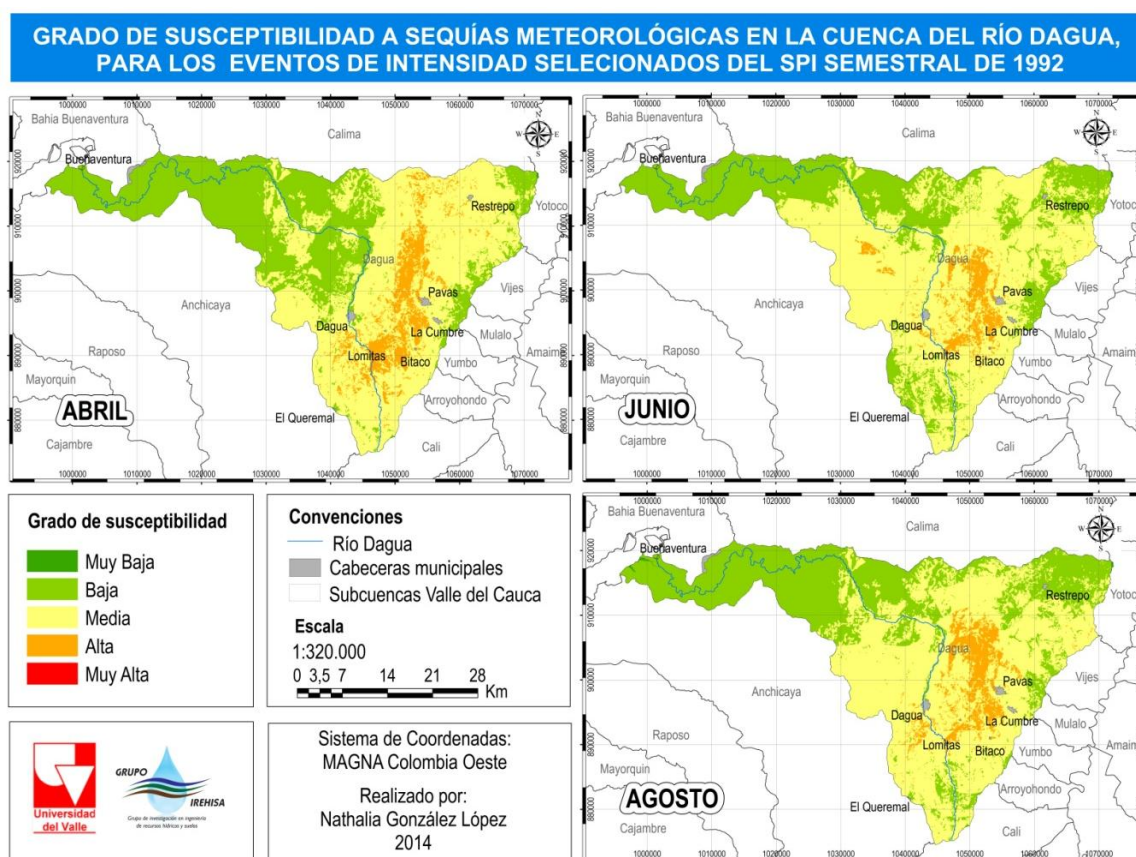


Figura 30. Grado de susceptibilidad a sequías meteorológicas SPI semestral de 1992

Para el SPI anual el comportamiento fue similar, predominando la susceptibilidad media, aproximadamente en el 50% de la cuenca y alrededor del 6% se clasificó con susceptibilidad alta. En general las zonas con susceptibilidad baja se localizaron principalmente en la parte baja de la cuenca y en el flanco occidental de la cordillera, estas áreas presentan una proporción de unidades naturales alta en comparación con las otras zonas de la cuenca, no presentan conflictos por usos del suelo o estos son moderados, y el grado de erosión es de natural a ligero, características que hacen de estas zonas menos susceptibles a eventos de sequías, en contraste las zonas con mayor susceptibilidad presentaban mayor grado de erosión, pendientes fuertes y un grado alto de conflictos por usos del suelo, que junto con las características de intensidad y frecuencia del fenómeno hacen de estas zonas más susceptibles a las sequías meteorológicas.

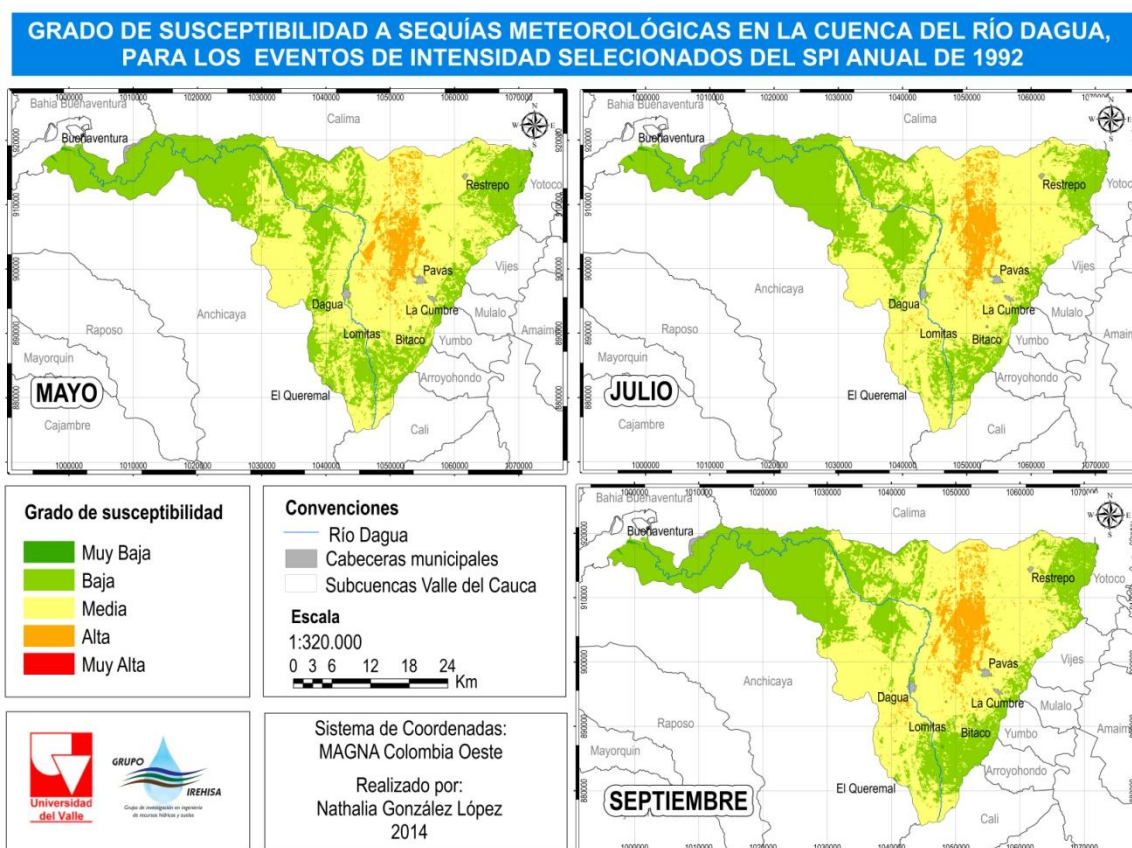


Figura 31.Grado de susceptibilidad a sequías meteorológicas SPI anual de 1992.

Variabilidad espacio-temporal de la susceptibilidad a sequías meteorológicas en la Cuenca del Río Dagua, Valle del Cauca

Para el segundo período evaluado, 2009-2010, el comportamiento fue similar en los casos de estudio anteriores, sin embargo es posible identificar una ligera disminución en la cobertura espacial del grado de susceptibilidad alto, y éste se concentro principalmente en la zona Norte de la cuenca. Para el SPI semestral de septiembre de 2009 el 65% del área presentó susceptibilidad media y el 6% alta; para los eventos anuales el porcentaje de cobertura con susceptibilidad media se redujo, afectando el 58% del área de la cuenca, el grado de susceptibilidad alto aumentó ligeramente al 7% para marzo del 2010.

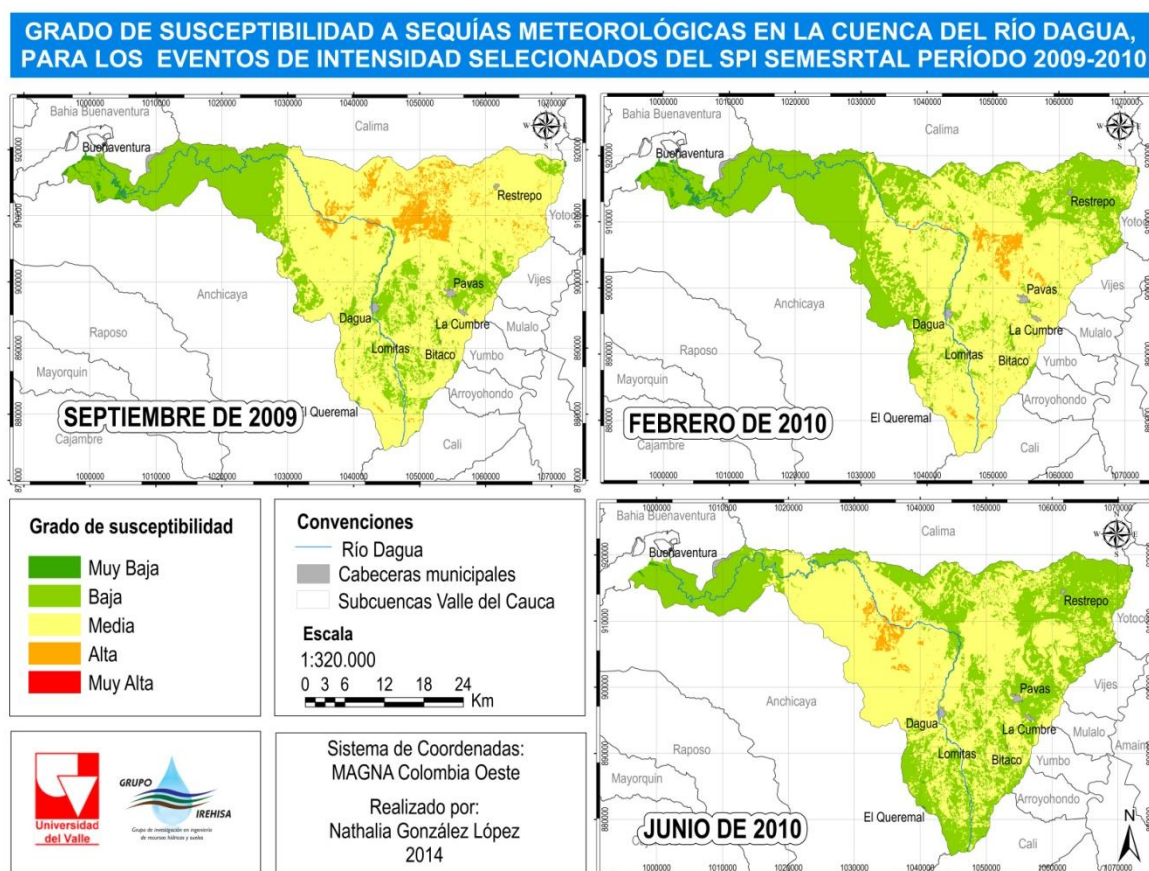


Figura 32.Grado de susceptibilidad a sequías meteorológicas SPI semestral período 2009-2010.

Es importante resaltar que los cambios en la distribución del grado de susceptibilidad se atribuyen principalmente a los factores derivados del cálculo de índice de sequía, en primer lugar porque estos tuvieron el mayor peso en la ponderación de los factores condicionantes de acuerdo al método multicriterio y adicionalmente las características del terreno, pendiente,

grado de erosión, conflicto por uso del suelo, proporción de unidades naturales y conectividad de fragmentos fueron los mismos en todos los eventos seleccionados (ver anexo 8). Si bien en los dos períodos seleccionados el terreno sufrió cambios que a su vez influyen en el nivel de susceptibilidad a las sequías, que no fue posible considerarlos, los resultados proporcionan un primer acercamiento a la zonificación de las áreas con mayor probabilidad a ser afectadas por eventos de sequía y por tanto proporciona información para la priorización de las estrategias de mitigación.

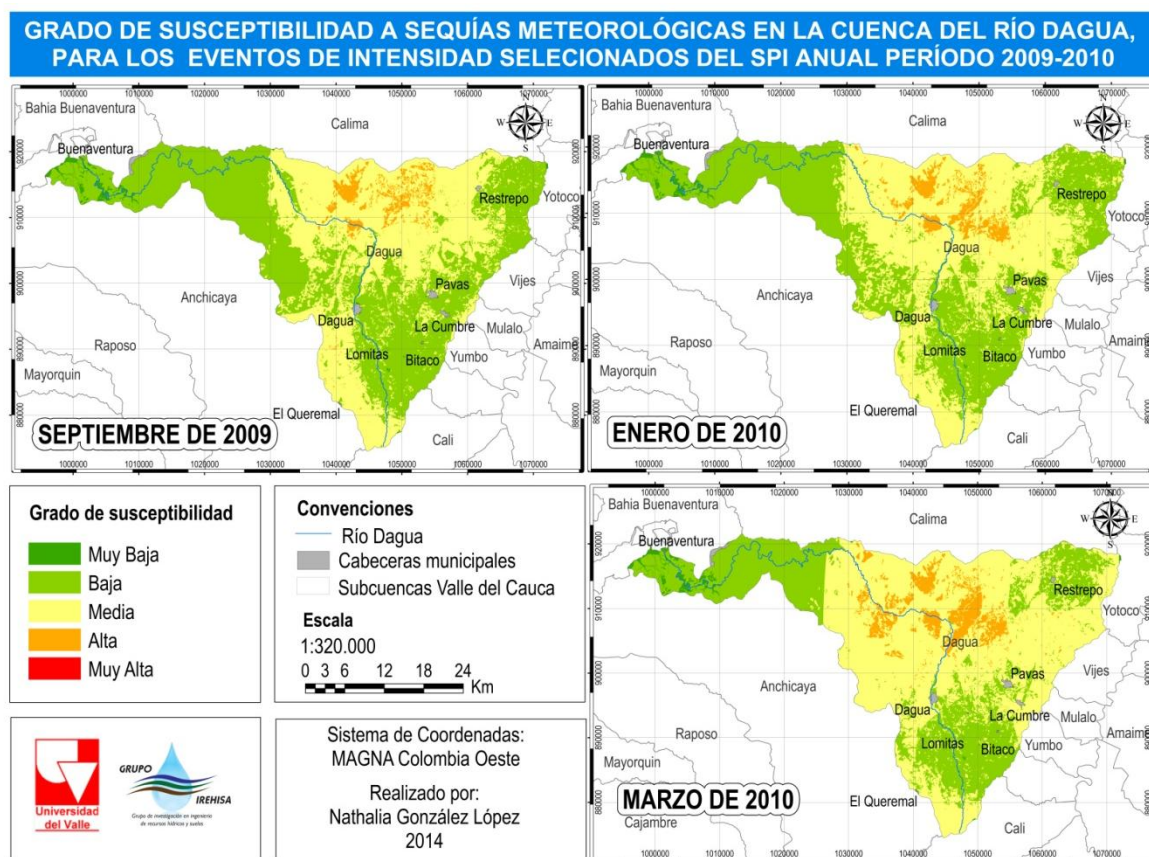


Figura 33.Grado de susceptibilidad a sequías meteorológicas SPI anual período 2009-2010.

Si bien la cuenca se caracterizó por presentar una susceptibilidad media, no se debe ignorar que las sequías generan fuertes impactos sobre los sistemas económicos, sociales y ambientales de la región, afectando principalmente la producción de alimentos. Dichos impactos están mayormente relacionados con las características propias del fenómeno como intensidad, magnitud y frecuencia; pero también de las condiciones del terreno y la gravedad

Variabilidad espacio-temporal de la susceptibilidad a sequías meteorológicas en la Cuenca del Río Dagua, Valle del Cauca

de éstos depende en mayor medida de la naturaleza de la economía y de la capacidad de respuesta de la sociedad y de los ecosistemas afectados. Por ello, es necesario anticiparse a la ocurrencia de períodos de sequía, a partir del estudio de la frecuencia, intensidad, magnitud y duración de éstas en el pasado; el conocimiento de la oferta del recurso, permitirá generar estrategias para optimizar su uso, mejorar los métodos de ahorro del agua y en especial los que tienen como resultado una reducción de las pérdidas, principalmente en las actividades agrícolas; tales como el revestimiento de los canales para la reducción de las filtraciones, controlar la vegetación acuática para reducir el consumo de agua, implementar sistemas de riego por aspersión o localizado por goteo, realizar riego programado según la demanda de los cultivos, cultivar especies tolerantes o más resistentes y realizar prácticas de conservación del suelo para aumentar su capacidad de infiltración.

Desde la parte social, es necesaria la implementación de programas de concientización sobre ahorro de agua, campañas informativas sobre la sequía y los peligros que éstas pueden ocasionar en la salud, así como los problemas ambientales que pueden agravarse, como, el deterioro de la calidad del agua y la mayor erosión eólica. Adicionalmente es necesario establecer programas de ayuda para las personas afectadas.

La eficiencia de los suministros de agua se debe garantizar no solo en épocas de estiaje sino durante todo el año, así como la protección de las cimas de las colinas y las partes altas de las cuencas, establecer franjas forestales contra la pérdida de agua y la erosión, para estimular la infiltración. La ausencia de lluvias implica no sólo la posibilidad de que exista sequía, sino que también podría acarrear la disminución de la superficie agrícola en una región; la demanda de agua generalmente aumenta en los meses secos, debido al incremento de la radiación solar y la temperatura. Por lo anterior, el periodo en el que se registran mayores impactos asociados a la sequía (restricciones de abastecimiento de agua, reducción de crecimiento de los árboles, incendios forestales, etc. están asociado a las mayores demandas atmosféricas de agua y es precisamente cuando el monitoreo de la sequía es más importante. Adicionalmente, es común que, después de períodos secos, se presenten lluvias torrenciales que, ante la degradación de la cubierta vegetal y el descuido y deterioro en los cauces naturales de agua, provocan catástrofes de mayor magnitud que indirectamente pudieran ser atribuidas a la sequía o estar asociadas a ellas.

"Convertid un árbol en leña y podrá
arder para vosotros; pero ya no
producirá flores ni frutos"

Rabindranath Tagore



9. CONCLUSIONES

La definición conceptual y operacional de la sequía se debe abordar bajo consideraciones particulares, considerando la oferta y la demanda hídrica. La complejidad de este fenómeno hace necesario fragmentar los análisis de acuerdo a la disponibilidad de información y a las necesidades particulares de cada problema. Por esta razón, en muchos casos, el uso de índices de sequía se reduce a aquellos que requieren poca información, principalmente a los que dependen solo de datos de precipitación, como el SPI. Es importante aclarar que la ausencia de precipitación, por sí sola, no define la existencia de una sequía, esto sólo es posible establecerlo en relación al comportamiento histórico de las series de precipitación. Esta situación se observó en la parte baja de la cuenca, en la zona de jurisdicción de Buenaventura, que es la más próxima al océano Pacífico, que a pesar de los altos valores de precipitación presentó eventos de sequía extrema (SPI menores a -2), con duraciones y magnitudes significativamente altas; sin embargo, en términos de disponibilidad del recurso, las condiciones en esta región pueden seguir siendo favorables.

La caracterización de los eventos de sequía meteorológica a partir del cálculo de la intensidad, duración, magnitud y frecuencia de estos, es solo una aproximación a la descripción detallada de este fenómeno que debe ser analizado de manera sistémica. El SPI permitió caracterizar las sequías a nivel semestral y anual, a partir de los datos de precipitación de 19 estaciones desde 1982 hasta 2011, encontrando que en todas las series se reportó al menos un evento de sequía, desde leves a extremadamente fuertes. La estación Aguacatal en el período analizado presentó la mayor magnitud de sequía para la agrupación semestral con un valor de 37,94, evento que duró desde octubre de 1991 hasta marzo de 1993, con un pico de intensidad de -2,70 en marzo de 1992. Para la agrupación anual la magnitud más alta se calculó en la serie de precipitación de la estación La Teresita, la cual fue 73,64 desde noviembre de 1989 hasta abril de 1993, con un pico de -2,59 en junio de 1992. Varios eventos de sequía encontrados coincidieron con años en los se presentó El Niño en el país, especialmente los más extensos.

En la agrupación semestral se reportaron 304 eventos de sequía de los cuales el 4,6%, es decir 14 eventos fueron clasificados como sequía extremadamente fuerte y para la agrupación anual se reportaron 171 eventos y solo 4 fueron extremadamente fuertes. Las

sequías leves fueron las que presentaron con mayor frecuencia en la cuenca, superando el 50% de ocurrencia en más de la mitad ésta. Los umbrales de precipitación calculados indicaron que los valores acumulados de lluvia mínima son menores en la parte media y alta de la cuenca, principalmente en las zonas de Loboguerrero y Atuncela, y aumentan hacia la parte baja.

Los eventos seleccionados a partir del análisis de cobertura espacial para evaluar el comportamiento de la intensidad del SPI en dichos períodos, indicaron que la parte media y alta son las más afectadas por los eventos de sequía extrema. Adicionalmente se encontró que el primer trimestre seco en el país (diciembre, enero y febrero) provoca eventos más fuertes en la cuenca principalmente en la zona nororiental y suroccidental cerca del enclave. En el año de 1992 las principales cabeceras municipales de la cuenca fueron afectadas por algún tipo de sequía, en la agrupación anual de mayo el 70% del área de la cuenca presentó algún tipo de sequía. En el período de julio de 2009 a junio de 2010 también se encontró que las zonas próximas al enclave subxerófito son en las que se presentan con mayor frecuencia eventos de sequía, sin embargo se evidenció la presencia de estos eventos en la parte baja de la cuenca, alcanzando intensidades del SPI menores a -2,00; en las principales cabeceras municipales ubicadas en la parte alta de la cuenca predominaron condiciones cercanas a lo normal.

El método de ponderación de evaluación multicriterio, indicó que los factores obtenidos del cálculo del SPI son los que influyen en mayor medida en el análisis de susceptibilidad a sequías meteorológicas, siendo la frecuencia de eventos de sequías el más importante. Los factores condicionantes del terreno con mayor impacto fueron el grado de erosión y de pendiente. En general aproximadamente el 55% de la cuenca presentó un grado medio de susceptibilidad, localizado principalmente en la parte media de ésta, mientras que la parte baja y la zona alta del flanco occidental de la cordillera se caracterizó por tener susceptibilidad baja, representando aproximadamente el 40%. Aunque los resultados reflejan que el nivel de susceptibilidad de la cuenca no es crítico, menos del 10% presentó susceptibilidad alta y no hubo evidencia de muy alta, es necesario involucrar variables de tipo social y económico que determinen el grado de vulnerabilidad, y con ello estimar el riesgo que este fenómeno puede ocasionar en la cuenca del río Dagua.

10. RECOMENDACIONES

La escasez de agua prolongada influye directamente en los recursos hídricos de una región, afectando los sistemas abastecimiento de agua, por lo tanto, es importante conocer los recursos hídricos superficiales y subterráneos de una determinada región y calcular los balances de agua en diferentes condiciones climáticas e hidrológicas.

Durante época de estiaje, no solo las condiciones de cantidad se ven afectadas, sino también la calidad, por lo tanto el impacto de una sequía prolongada sobre la calidad del agua debe ser estudiado y evaluado con mayor interés.

Realizar estudios comparativos de las cosechas, con las condiciones climáticas e hidrológicas con el fin de estimar los daños y pérdidas económicas en la producción agrícola. Igualmente determinar diferencias entre las especies y variedades de las plantas cultivadas, así como su capacidad de tolerancia a la falta de agua y la duración de sus períodos vegetativos, como características importantes para reducir los daños.

Priorizar la evaluación de zonas naturales, como los ecosistemas secos, que son más sensibles a sufrir condiciones de desertificación en períodos de sequías prolongados, con el fin de formular acciones específicas para proteger las especies, los hábitats y ecosistemas maltratados. Se recomienda estudiar con mayor detalle el enclave subxerofítico ubicado en la cuenca del río Dagua, debido a que los resultados reflejaron una alta frecuencia de eventos de sequía extrema en esta zona.

La precipitación es el principal determinante de la severidad de una sequía, sin embargo se recomienda considerar otras variables que pueden influir en la ocurrencia, intensidad y magnitud de este fenómeno, tales como temperatura, humedad relativa, brillo solar y la evapotranspiración, que cobran importancia en el escenario actual de cambio climático.

Los datos retrospectivos sobre la susceptibilidad a sequías meteorológicas calculados en la zona de estudio deben complementarse con información socioeconómica para estimar el grado de vulnerabilidad de la cuenca frente a este fenómeno y así determinar el riesgo que presenta.

A pesar que este estudio estuvo orientado al análisis de los valores negativos de SPI se observó que en algunos periodos una desviaciones positivas que indican condiciones de humedad moderada, severa y extrema, por tanto se deja abierta la recomendación de emplear este índice para caracterizar eventos máximos de precipitación y su relación con la ocurrencia del fenómeno ENOS en su fase La Niña. Así como evaluar el efecto de la longitud de las series usadas en el cálculo del índice.

11. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- ✓ Realizar un inventario detallado de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, así como la calidad de los mismos bajo condiciones de estiaje.
- ✓ Involucrar otras variables climatológicas en la caracterización de los eventos de sequía, tales como la evapotranspiración y la temperatura.
- ✓ Emplear el SPI para el análisis de eventos máximos.
- ✓ Zonificación del riesgo a sequías meteorológicas en el país, principalmente en las zonas con tipos climáticos árido, semiárido y subhúmedo seco.
- ✓ Investigar la relación entre las sequías y los incendios forestales.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Abril, A. (2011). *Estudio e implementación de un modelo para la zonificación de áreas susceptibles a deslizamiento mediante el uso de sistemas de información geográfica: caso de estudio sector Quimsacocha. Cuenca, Ecuador*. Trabajo de grado. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.
- Alperín, M; Borges, V. & Sarandón, R. (2002). Caracterización Espacial de los Tipos de Cobertura de Suelo usando Técnicas Geoestadísticas a partir de Información Satelital. *Revista de la Facultad de Agronomía*. Tomo 105 (1): 40-51.
- Ángel, R. & Martelo, M. (2008). *Caracterización de la sequía meteorológica en los climas Árido, Semiárido y Subhúmedo seco en los Llanos Centro Orientales de Venezuela, para el manejo de los recursos hídricos*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada & Centro de Investigación y Postgrado UNEFA-CIP. Caracas
- Anton, D. & Díaz, C. (2000). *Sequía en un mundo de agua*. Piriguazú Ediciones. San José, Toluca.
- Argeñal, f. (2010). *Variabilidad Climática y Cambio Climático en Honduras*. PNUD.
- Aristizabal, V. & Jaramillo, J. (2013). *Modelos hidrológicos e hidráulicos de zonificación de la amenaza por inundación en el municipio de La Dorada Caldas*. CORPOCALDAS.
- Bass, S., Ramasamy, S., Dey Deprick, J., & Battista, F. (2008). *Disaster Risk Management Systems Analysis*. Environment, Climate Change and Bioenergy Division. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. Rome
- Bedoya, M; Contreras, C. & Ruiz, F. (2010). Alteraciones Del Régimen Hidrológico Y De La Oferta Hídrica Por Variabilidad Y Cambio Climático. Cap. 7. *Estudio nacional del agua 2010*. IDEAM. Colombia.
- Below, R., Grover-Kopec, E. & Dilley, M. (2007, Septiembre). Documenting Drought-Related Disasters Global Reassessment. *The Journal of Environment & Development*. Vol. 16 (No. 3): 328-344.
- Brizuela, A. (2009). *Sequía 2008/2009: Comentarios Sobre El Evento*. [En línea]. Recuperado en diciembre de 2013, de <http://www.cicytpp.org.ar/climatologiafca/sequia/SEQUIA%20al%2015Ene2008.pdf>

- Cardona, F.; Ávila, A., Carvajal, Y. & Jimenez, E. (2013, Enero-Junio). Tendencias en las series de precipitación en dos cuencas torrenciales andinas del Valle del Cauca (Colombia). *Tecnológicas*. Vol. 17 (No 32): 85-95.
- Carvajal, Y., Loaiza, W., Reyes, A., Lobo, J., Constanza, M., Morales, M. & Ávila, A. (2013). *Implementación de parcelas agroecológica en la cuenca del río Dagua*. IREHISA, Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia.
- Castro M. & Carvajal, Y. (2010, Enero-Diciembre). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Revista EIDENAR*: (9): 15-26
- CCI. (2008). Soluciones Viables para la Infraestructura del Valle del Cauca. Santiago de Cali.
- CEPAL. (2005). Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales. Chile.
- CICH. (2007). Biodiversidad. Pag 29. *Informe del Estado Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá*. [En línea]. Recuperado en agosto de 2014, de: http://www.jica.go.jp/project/spanish/panama/2515031E0/data/pdf/4-02_03.pdf
- Colotti, E.; Cedeño, M. & Montañez, C. (2013, Enero-Junio). La sequía meteorológica y la variación de la superficie agrícola en la isla de Margarita, Estado Nueva Esparta, Venezuela período 1972-2004. *Terra Nueva Etapa*. Vol. XXIX (45): 11-53.
- CONAGUA. (1997). Programa Hidráulico de Gran Visión del Estado de Chihuahua 1995-2020, Gerencia Estatal de la CONAGUA en Chihuahua, Chihuahua. Tomo 1. 155 p
- Confederación Hidrológica del Duero. (2007). Caracterización de las Sequías en La Cuenca De Duero, Cap 4. *Plan Especial de Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía*.
- Crespo, G. (2005). Comparación de dos metodologías para el cálculo del índice de severidad de sequía para doce reservas de la biosfera mexicana. Texcoco.
- Cruz Roja Colombiana. (2011). Sequía. [En línea]. Recuperado en Agosto de 2013, de http://www.cruzrojacolombiana.org/publicaciones/pdf/sequia_3112011_102314.pdf
- CVC. (2007). Balance Oferta–Demanda de agua superficial Cuenca del río Dagua. [En línea]. Recuperado en agosto de 2013. de: http://www.cvc.gov.co/portal/images/CVC/Recurso_Hidrico/agua_superficial/balances_ofertas_demanda/BalanceDagua.pdf

- CVC. (2008). Ficha técnica cuenca Dagua. Grupo Sistema de Información Ambiental. Dirección Técnica Ambiental.
- CVC. (2012, Julio). Dagua, La Cumbre y Restrepo: municipios vulnerables a incendios forestales. [En línea]. Recuperado en agosto de 2013, de <http://cvcambiental.blogspot.com/2012/07/invasion-en-la-choclona-podria-ser-un.html>
- CVC. (2014 a, Septiembre). Aumenta la cifra de incendios forestales en el municipio de Dagua. [En línea]. Recuperado en octubre de 2014, de: <http://www.cvc.gov.co/portal/index.php/es/servicios-informacion-1/noticias/1245-cifras-incendios>
- CVC. (2014 b, Septiembre). Bajo nivel del río Dagua obedece a parámetros normales del verano: CVC. [En línea]. Recuperado en Octubre de 2014, de: <http://www.cvc.gov.co/portal/index.php/es/servicios-informacion-1/noticias/1255-menos-dagua>
- Daza, M., Reyes, A., Loaiza, W. & Fajardo, P. (2012, agosto). Índice de sostenibilidad del recurso hídrico agrícola para la definición de estrategias sostenibles y competitivas en la Microcuenca Centella Dagua – Valle del Cauca. *Gestión y ambiente*. Vol. 15 (No 2):47-58.
- DesInventar. s.f.(2013). Sistema de inventario de efectos de desastres. *DesInventar*. [En línea]. Recuperado en Julio de 2013, de: <http://www.desinventar.org/es/>
- Domingo, C.; Cristóbal, J.; Inyera, M. & Pons, X. (2008, septiembre). Detección de pautas de estrés hídrico en tres especies forestales de Cataluña mediante imágenes TERRA-MODIS. *XIII congreso nacional de tecnologías de la información geográfica. Tecnologías de la información geográfica para el desarrollo territorial*. (pp. 540-551). Las Palmas, Gran Canaria
- Domínguez, J. (2000). *Breve Introducción a la Cartografía y a los Sistemas de Información Geográfica (SIG)*. Editorial CIEMAT. Madrid, España.
- Kaipper, M. (2013, diciembre). La sequía: enemigo silencioso de Latinoamérica. *El País*. [En línea]. Recuperado en abril de 2014, de: http://internacional.elpais.com/internacional/2013/12/11/actualidad/1386777333_583840.html
- FAO. (2013). *Esfuerzo concertado de las Naciones Unidas para la adopción de políticas eficaces sobre la sequía*. [En línea]. Recuperado en diciembre de 2013, de <http://www.fao.org/emergencias/la-fao-en-accion/historias/historia-detalle/es/c/171855/>
- FAO. (s.f.). *Sequía. Tipos de peligros y de emergencia*. [En línea]. Recuperado en diciembre de 2013, de: <http://www.fao.org/emergencias/emergencias/sequia/es/>

- Fernández, H. (2012, septiembre). Caracterización de sequías hidrológicas en la cuenca del Río San Juan – Republica Argentina. *XXV congreso latinoamericano de hidráulica*. San José, Costa Rica, 9 al
- García, S.; Baille, A.; González, M.; Martínez, V.; Urrea, M. Hernández, Z.; Nortes, P. & Tanguy, M. (2007). *Desarrollo y aplicación de indicadores de alerta temprana frente a sequías a escala regional desde MODIS*. España. Ed. Martin, 2007, Pp 223 – 229.
- García, M., Piñeros, A., Bernal, F. & Ardila, E. (2012). *Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia*.
- García, A. (2006). *Sequías, Teoría y Prácticas*. Universidad Politécnica de Valencia. Editorial UPV.
- GeoCVC. (s.f.). *Cobertura y uso del suelo*. [En línea]. Recuperado en septiembre de 2014, de: <http://geocvci.cvc.gov.co/pdf/GuiaCoberturaUso.pdf>
- GEOSIG. (2001). *Esquema De Ordenamiento Territorial*. Volumen III. Documento Técnico De Soporte Del E.O.T. Municipio De Buenos Aires Departamento Del Cauca. [En línea]. Recuperado en agosto de 2013, de: <http://www.crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/POT/buenosaires/TITULO%203%20%20La%20Zonificacion%20de%20Amenazas%20Naturales.pdf>
- Gommes, R. & Petrassi, F. (1994). Rainfall variability and drought in Sub-Saharan Africa since 1960. En: *Agrometeorology Series Working Paper N. 9*. Food and Agriculture Organization, Roma. Rome, Italy.
- Gómez, S. (2003). *Análisis de vulnerabilidad con énfasis en sequía en la subcuenca del río Aguas Calientes, Somoto, Nicaragua*. Tesis de maestría. Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica
- González, M. & Sanz, J. (2000). Distribuciones estadísticas ajustadas a las series temporales de totales anuales de precipitación en España: Aspectos Geográficos. *Geographicalia*. (38): 13-32.
- González, J.; Peña, D. y Salas, D. (2012, septiembre). Determinación del impacto de las sequías en la agricultura en cuencas no aforadas. *XXV congreso latinoamericano de hidráulica*. San José, Costa Rica.

- Gutiérrez, S. (2013). *Análisis de la influencia de el fenómeno ENOS “El Niño - Oscilación Del Sur” en la oferta hídrica trimestral de la cuenca hidrográfica del río Dagua, Valle del Cauca*. Trabajo de Grado. Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia.
- Gutiérrez, S., Carvajal, Y. & Ávila, A. (2013, junio). Estudio de la Influencia del Fenómeno El Niño - Oscilación del Sur en la Oferta Hídrica de la Cuenca Hidrográfica del Río Dagua. *Entre Ciencia e Ingeniería*. (13): 26-33.
- Hernández, R. (2008). Caracterización de la sequía meteorológica en los climas Árido, Semiárido y Subhúmedo seco en los Llanos Centro Orientales de Venezuela, para el manejo de los recursos hídricos. Tesis de maestría. Universidad Nacional Experimental. Caracas.
- Hernández, S., Tarife, R., Gamiz, S., Castro, Y. & Esteban, M. (2012). Estudio de las sequías en las Islas Canarias mediante el Análisis de índices multiescalares. Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada.
- Hervás, J., Barredo, J. & Lomoschitz, A. (2002). “Evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos mediante el uso conjunto de SIG, teledetección y métodos de evaluación multicriterio. Aplicación al barranco de Tirajana (Gran Canaria). España.
- Hisda, H. & Tallaksen, L. (2000). *Drought Event Definition*. Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe. Technical Report No. 6.
- Hurtado, G. & Cadena, M. (2002, marzo). Aplicación De Índices De Sequía En Colombia. *Meteorología Colombiana*. (5): 131–137.
- IDEAM. (2001). Colombia Primera Comunicación Nacional antela Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Colombia
- IDEAM. (2008). Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia.
- IDEAM. (2010a). Cambio Climático En Temperatura, Precipitación Y Humedad Relativa Para Colombia Usando Modelos Meteorológicos De Alta Resolución (Panorama 2011-2100). Bogotá, D.C. Colombia.
- IDEAM. (2010b). 2ª comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, República de Colombia.
- IDEAM. (2012). Posibles Efectos Naturales Y Socioeconómicos Del Fenómeno “El Niño” En El Periodo 2012-2013 En Colombia. Bogotá, Colombia.

- IGAC & CORPOICA. (2002). Zonificación De Los Conflictos De Uso De Las Tierras Del País. Capítulo IV: Uso Adecuado Y Conflictos De Uso De Las Tierras En Colombia Zonificación De Los Conflictos De Uso De Las Tierras Del País. Bogotá, D.C.
- INETER & COSUDE. (2005). Sequía Meteorológica, Mapas de Amenazas Recomendaciones técnicas para su elaboración. Managua, Nicaragua.
- IPCC, 2007. Cambio Climático. (2007). Informe De Síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza.
- Jovel, R. (2001). El Impacto del Fenómeno de El Niño de 1997-1998 en la Comunidad Andina de Naciones. [En línea]. Recuperado en Agosto de 2013, de http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/EIRDInforma/esp/revista/No1_2001/PAGINA22.HTM
- Komuscu, A. (1999, febrero). Using the SPI to analyze spatial and temporal patterns of drought in Turkey. *Drought Network News*. Vol. 11 (1): 6-13.
- Lana, X.; Burgueño, A.; Martínez, M. & Serra, C. (2009). Una revisión de los análisis estadísticos de las precipitaciones diarias y mensuales en Cataluña. *Revista del tiempo y el clima del Mediterraneo occidental*. (6): 15–30.
- León, M. (2007). *Principios y Aplicaciones De Sistemas Agroforestales* Bucaramanga, Santander, Colombia.
- Lloyd-Hughes, B. & Saunders, M. (2002, junio). A Drought Climatology For Europe. *International Journal of Climatology*. Vol. 22 (13): 1571–1592.
- Loaiza (2014). *Fenómeno de El Niño-Oscilación Del Sur (Enos) y su impacto sobre los sistemas productivos agrícolas de la cuenca del río Dagua, Valle Del Cauca*. Tesis de maestría. Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia.
- Marcial, R. (2011). *Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en los servicios ambientales hidrológicos de la comunidad de Capulálpam de Méndez*. Trabajo de grado. Universidad de la Sierra Juárez. Oaxaca.
- MAVDT, 2005. *Plan de Acción Nacional. Lucha Contra la Desertificación y la Sequía en Colombia – PAN*. Bogotá: XPRESS Estudio Gráfico. 139p.

- McKee, T., Doesken, N. & Kleist, J. (1993). The Relationship Of Drought Frequency And Duration To Time Scales. Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California.
- MDGIF. Millennium (2012). Boletín No. 2. Adaptación al cambio climático. Colombia. Bogotá. D.C.
- Montealegre J. & J. Pabon. (2000, octubre). La Variabilidad Climática Interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña–Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología. Colombiana*. (2):7-21.
- Montealegre, J. (2012). *Análisis de la variabilidad climática inter-anual (El Niño y La Niña) en la Región Capital, Bogotá Cundinamarca*. Plan Regional Integral de Cambio Climático Región Capital Bogotá – Cundinamarca (PRICC)
- Montero, M.; Sánchez, J.; Ojeda, W. & Prieto, R. 2007. Determinación de períodos de sequía y lluvia intensa en diferentes regiones de México ante escenarios de cambio climático. Informe final. Número de registro INE: INE/A1-056/2007. México.
- Morales, C. (2005). Capítulo I: Pobreza, desertificación y degradación de tierras. *Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales. Indicadores de impacto socioeconómico de desertificación y degradación de tierras*. CEPAL. Santiago de Chile.
- Morales, J. (2005). El efecto de la longitud de registro en el cálculo del Índice de Precipitación Estándar. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma De México. México.
- Naranjo, S. (2012, mayo). Hace 20 años Colombia sufrió el apagón. *El Colombiano*.
- Núñez, S., Núñez, L., Podestá, G., Skansi, M. (2005, octubre). El Índice Estandarizado De Precipitación Como Herramienta Para La Caracterización Y El Monitoreo De La Sequía: Una Prueba De Concepto. *9 ° Congreso Argentino de Meteorología*. Buenos Aires, Argentina.
- Nyabeze, W. (2004). Estimating and interpreting hydrological drought indices using a selected catchment in zimbabwe. En: *Physics and Chemistry of the Earth* (29), 1173–1180.
- OMM. (2006). *Vigilancia y alerta temprana de la sequía: Conceptos, progresos y desafíos futuros*.
- OMM. (2009). Tercera conferencia mundial sobre el clima: hacia un Marco mundial para los servicios climáticos. [Boletín]. 58 (3): 162-1264. Ginebra, Suiza
- OPS. (2000). *Fenómeno El Niño, 1997-1998*. Serie Crónicas de Desastres, 8. Washington, D.C.

- Ortega, G. (2012). *Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación*. Instituto del Agua de Estado de Nuevo León. México.
- Ortega, D., Mejía, E., Palacios, E. & Rendón, L. (2008, septiembre). Análisis y caracterización de la sequía en el distrito de riego 005 Delicias, Chihuahua. *IV seminario internacional de uso integral del agua*. México.
- Palacio, A. (2004). Riesgos naturales y susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes. Aplicación de SIG en la costa baja acumulativa del suroeste de Campeche. En *El Manejo Costero en México*. Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad Autónoma de Quintana Roo. 654 p.
- Palmer, W. (1965). Meteorological Drought. Research Paper N. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington DC. 58pp.
- Paredes, F. (2012). *Sistema para la alerta temprana de sequías meteorológicas en Venezuela*. Tesis de doctorado. Universidad de Carabobo. Bárbula.
- Paredes, F. Millano, J. & Guevara, E. (2008, julio). Análisis espacial de las sequías meteorológicas en la región de Los Llanos de Venezuela durante el periodo 1961-1996. *Revista de climatología*. Vol. 8: 15-27.
- Ped, D. (1975). Indicadores de sequías y condiciones de humedad. *Anales Centro Hidrometeorológico de la URSS*. 156, 19-39.
- PNUD. (2010). *El cambio Climático en Colombia y en el sistema de las Naciones Unidas. Revisión de riesgos y oportunidades asociados al cambio climático*. Bogotá, Colombia.
- Poch, G. (2011). *Desertificación amenaza global*. Centro de información para Argentina y Uruguay.
- Poveda, G. (2004, junio). La hidroclimatología de Colombia: Una Síntesis desde la Escala Inter-Decadal hasta la Escala Diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Vol. 28 (107): 201-222.
- Puertas, O. & Carvajal, Y. (2008, enero-junio). Incidencia de El Niño-Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer. *Ingeniería & Desarrollo*. Universidad del Norte. Vol. 23: 104-118.
- Quintero, M., Carvajal, Y. & Aldunce, P. (2012, enero-junio). Adaptación a la variabilidad y el cambio climático: intersecciones con la gestión del riesgo. *Luna azul*. (34): 257-271

- Rind, D., Goldberg, R., Hansen, J., Rosenzweig, C. & Ruedy, R. (1990). Potential evapotranspiration and the likelihood of future Drought.. *Journal of Geophysical Research*. (95): 9983-10004.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw Hill International, New York, 1980. Revised edition, paperback, RWS Publications, Pittsburgh, 1990,1996.
- Salazar, F. & Hincapié, E. (2006, junio). Causas de los movimientos masales y erosión avanzada en la zona cafetera colombiana. *Cenicafé. Avance técnico* (348).
- Sánchez, L., Mattar, S. & González, M. (2009, septiembre). Cambios Climáticos Y Enfermedades Infecciosas: Nuevos Retos Epidemiológicos. *Revista MVZ Córdoba*. Vol. 14(3):1876-1885.
- SEMARNAT & PNUMA. (2006). *El Cambio Climático En América Latina Y El Caribe*.
- Serrano, S., Beguería, S. & López, J. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *J. Climate*.
- Solano, E. & Stolz, W. (s.f.). *El Fenómeno ENOS (El Niño/Oscilación Del Sur)*.
- Soldano, A. (2008, marzo). Conceptos sobre riesgos. *Foro virtual de la RIMD*. [En línea]. Recuperado en marzo de 2013, de: <http://www.rimd.org/advf/documentos/4921a360071e58.79575639.pdf>
- Steila D. (1972). *Drought in Arizona: A drought identification methodology and analysis*. Division of Economic and Business Research, (University of Arizona). 65 p. Tucson.
- SUBDERE. (2011). *Guía análisis de riesgos naturales para el ordenamiento territorial*. Chile.
- TeleSUR. (2014, Junio). Sequía afecta a países de América Latina. [En línea]. Recuperado en septiembre de 2014, de: <http://www.telesurtv.net/news/Sequia-afecta-a-paises-de-America-Latina-20140611-0040.html>
- Thom, H. 1966. Some Methods of Climatological Analysis. *WMO Technical Note Number*. (81): 16-22.
- UNESCO. (2003). *Agua para todos, agua para la vida*. Informe.
- UNESCO. (2010). *Guía metodológica para la aplicación del Análisis Regional de Frecuencia de Sequías basado en L-momentos y resultados de aplicación en América Latina*. CAZALAC.

- USAID. 1993. Evaluación del peligro de desertificación. Cap. 9. De *Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado*. 569p. Washington, D.C.
- Valiente, O. (2001, marzo). Sequía: Definiciones, Tipologías y Métodos de Cuantificación. Universidad de Barcelona. *Investigaciones geográficas*. (26):59-80.
- Velázquez, A., Mas, J. & Palacio, J. (2002). Análisis del cambio de uso del suelo. Convenio INE-IGg (UNAM). [En línea]. Recuperado en septiembre de 2014, de: <http://www.ciga.unam.mx/investigadores/zacatuche/PDF/71Proyectos%20de%20investigacion/711Responsable/711-16.pdf>
- Vélez, C. (2012, Agosto). Viene El Niño y con él la sequía y los incendios. *El Colombiano*. [En línea]. Recuperado en agosto de 2013, de: http://www.elcolombiano.com/BancoConocimiento/V/viene_el_nino_y_con_el_la_sequia_y_los_incendios/viene_el_nino_y_con_el_la_sequia_y_los_incendios.asp
- Vidal, E. (2008). Determinación y análisis del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) como indicador de intensidad de sequía para Paraguay. Primera aproximación.
- Vilchis, A., Díaz, C., Bâ, K., Gómez, M. & Magaña, D. (2012, noviembre). La sequía en la modelación de riesgo de incendios forestales en la cuenca Lerma, estado de México. *XXII Congreso Nacional De Hidráulica*. Acapulco, Guerrero, México.
- Byun, H. & Wilhite, D. (1999, septiembre). Objective Quantification of Drought Severity and Duration. *Journal of climate*. Vol.12 (9): 2747-2756.
- Young, K. (1992). A Three-Way Model for Interpolating for Monthly Precipitation Values. *Monthly Weather Review*. (120): 2561-2569.
- Zambrano, H., Pardo, M. & Naranjo, L. (2007). *Evaluación de integridad ecológica propuesta metodológica. Herramienta para el análisis de la efectividad en el largo plazo en áreas del sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia*. Convenio WWF – Colombia, Parques Nacionales Naturales de Colombia, Instituto Alexander von Humboldt.
- Zuluaga, J. (2009) *Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la sequía en Colombia*. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Zúñiga, H. (2010). *La pendiente compleja atributo del territorio, útil en el ordenamiento espacial del municipio*. Ensayo técnico. Bogotá, D.C.