ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE COBERTURAS Y RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO GRAN SEVILLA (MAGDALENA – COLOMBIA)

DUVAN ROBERTO PÉREZ PELUFFO
Biólogo

Universidad del Magdalena
Centro de Posgrados y Formación Continua
Facultad de Ciencias Básicas
2022

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE COBERTURAS Y RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO GRAN SEVILLA (MAGDALENA – COLOMBIA)

DUVAN ROBERTO PÉREZ PELUFFO
Código: 2017238510
ORCID: 0000-0002-5270-9949

Trabajo de grado sometido como requisito para optar al título de:
Magister en Ecología y Biodiversidad

Director:
YEISON ANDRÉS GUTIÉRREZ ROJAS
M.Sc. Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas

Universidad del Magdalena
Centro de Posgrados y Formación Continua
Facultad de Ciencias Básicas
2022

Para ti…

AGRADECIMIENTOS

A la *Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad del Magdalena* por ser piedra angular en mi formación profesional y personal.

A mi director *Yeison Gutiérrez Rojas*, por su apoyo, dedicación, ejemplo como investigador, y su influencia positiva en el desarrollo de mi carrera.

Agradecimiento especial al Grupo de investigación: "*Ecología y Diversidad de Algas Marinas y Arrecifes Coralinos*" de la Universidad del Magdalena y a su directora *Rocío García Urueña*, por su invaluable soporte al facilitar espacios, equipos y software para el desarrollo de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN **9**

ABSTRACT **10**

INTRODUCCIÓN **11**

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA **12**

JUSTIFICACIÓN **14**

ANTECEDENTES **15**

MARCO TEÓRICO **20**

Ecología del Paisaje 20

Coberturas de la Tierra *20*

Técnicas de Clasificación *21*

Índices y Métrica *21*

Análisis Hídrico 22

HIPÓTESIS DE TRABAJO **24**

OBJETIVOS **25**

Objetivo general 25

Objetivos específicos 25

METODOLOGÍA **26**

Área de Estudio 26

Análisis Multitemporal de Coberturas (Objetivo Específico 1) 27

Oferta Hídrica (Objetivo Específico 2) 29

Balance Hídrico Superficial *29*

Precipitación y Evapotranspiración *30*

Índice de Aridez *31*

Coeficiente de Escorrentía *32*

Demanda Hídrica (Objetivo Específico 3) 33

Demanda Hídrica Total por Factor de Coberturas *33*

Índice de Escasez *34*

RESULTADOS 36

Análisis Multitemporal de Coberturas (Objetivo Específico 1) 36

Índices y Métricas *38*

Oferta Hídrica (Objetivo Específico 2) 40

Balance Hídrico Superficial 1980-1989 ..... *40*

Balance Hídrico Superficial 1990-1999 ..... *44*

Balance Hídrico Superficial 2000-2009 ..... *47*

Balance Hídrico Superficial 2010-2018 ..... *50*

Índice de Aridez *53*

Producción de Agua por Balance Hídrico Superficial *58*

Producción de Agua por Coeficiente de Escorrentía *59*

Demanda del Recurso Hídrico (Objetivo Específico 3) 64

Demanda Hídrica Total por Factor de Coberturas *64*

Índice de Escasez *66*

DISCUSIÓN 68

REFERENCIAS 73

ANEXOS 87

Anexo 1. Porcentaje de coberturas decadales *CORINE Land Cover* registradas en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018 87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros básicos de la cuenca del río Gran Sevilla. 27

Tabla 2. Productos satelitales implementados para la caracterización paisajística de la cuenca del río Gran Sevilla. 28

Tabla 3. Clasificación del IA. 32

Tabla 4. Coeficientes de escorrentía de Prevert. 33

Tabla 5. Clasificación de la demanda hídrica por ranqueo del índice de escasez según la Resolución 865 de 2004. 35

Tabla 6. Resumen decadal de métricas paisajísticas para coberturas naturales y artificializadas en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018 39

Tabla 7. Índice de aridez para la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018 54

Tabla 8. Oferta y rendimiento hídrico interanuales estimados para la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018 a partir de balance hídrico superficial 58

Tabla 9. Coeficiente de escorrentía ponderado, volumen medio escurrido y rendimiento hídrico decadales interanuales estimados para la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018 a partir del método racional..... 61

Tabla 10. Demanda hídrica calculada por tipo de coberturas para la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018 65

Tabla 11. Índice de escasez para la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018 67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización, imagen satelital, modelo digital de elevación, red de drenaje y subcuencas del río Gan Sevilla. 26

Figura 2. Coberturas de la tierra en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018. 37

Figura 3. Porcentaje de coberturas decadales *CORINE Land Cover* registradas en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018. 38

Figura 4. Distribución espacial de la precipitación media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-1989. 41

Figura 5. Distribución espacial de la evapotranspiración real media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-1989. 42

Figura 6. Distribución espacial de la escorrentía media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-1989. 43

Figura 7. Precipitación, evapotranspiración real y escorrentía media mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-1989. 43

Figura 8. Distribución espacial de la precipitación media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1990-1999. 44

Figura 9. Distribución espacial de la evapotranspiración real media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1990-1999. 45

Figura 10. Distribución espacial de la escorrentía media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1990-1999. 46

Figura 11. Precipitación, evapotranspiración real y escorrentía media mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1990-1999. 46

Figura 12. Distribución espacial de la precipitación media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2000-2009. 48

Figura 13. Distribución espacial de la evapotranspiración real media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2000-2009. 49

Figura 14. Distribución espacial de la escorrentía media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2000-2009. 49

Figura 15. Precipitación, evapotranspiración real y escorrentía media mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2000-2009. 50

Figura 16. Distribución espacial de la precipitación media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2010-2018. 51

Figura 17. Distribución espacial de la evapotranspiración real media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2010-2018. 52

Figura 18. Distribución espacial de la escorrentía media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2010-2018. 52

Figura 19. Precipitación, evapotranspiración real y escorrentía media mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2010-2018. 53

Figura 20. Distribución espacial de la aridez media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-1989. 54

Figura 21. Distribución espacial de la aridez media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1990-1999. 55

Figura 22. Distribución espacial de la aridez media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2000-2009. 55

Figura 23. Distribución espacial de la aridez media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2010-2018. 56

Figura 24. Comportamiento del índice de aridez medio mensual interanual por décadas en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018. 57

Figura 25. Comportamiento estimado de la oferta hídrica media mensual interanual decadal por balance hídrico superficial en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018. 59

Figura 26. Distribución espacial decadal del coeficiente de escorrentía interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018. 60

Figura 27. Comportamiento estimado de la oferta hídrica media mensual interanual decadal por método racional en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018. 62

Figura 28. Distribución espacial del volumen medio anual y mensual interanual escurrido en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-1989. 62

Figura 29. Distribución espacial del volumen medio anual y mensual interanual escurrido en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1990-1999. 63

Figura 30. Distribución espacial del volumen medio anual y mensual interanual escurrido en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2000-2009. 63

Figura 31. Distribución espacial del volumen medio anual y mensual interanual escurrido en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2010-2018. 64

Figura 32. Comportamiento de la oferta hídrica, la demanda hídrica y el índice de escasez interanuales decadales en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018. 67

RESUMEN

La Cuenca del Río Gran Sevilla, (conformada por los ríos Frío, Sevilla y la quebrada Orihueca) es uno de los mayores aportantes de agua dulce al Complejo Lagunar Ciénaga Grande de Santa Marta. En el presente trabajo se estimó la producción agua de esta unidad paisajística mediante balance hídrico superficial y método racional al tiempo que se evaluó el efecto del cambio de sus coberturas sobre dichas estimaciones en los períodos 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009 y 2010-2018 mediante modelos climáticos WorldClim 2.1 y clasificación no supervisada implementando imágenes Landsat 5 y 8. Se encontró aumento de los centros poblados al interior de la cuenca, una leve recuperación de los bosques aunque también una acentuada fragmentación y grandes trasformaciones paisajísticas en el la cuenca media y baja; en las dos modelaciones la cuenca ha disminuido su aptitud para producir agua en un 12% desde la década de los 1980's y el índice de escasez de en general apunta a una alta demanda hídrica interanual decadal; cuando en ésta cuenca se tienen en cuenta las dinámicas paisajísticas, las características hídricas del suelo y la pendiente, la estimación del agua producida se reduce entre un 1,48% y un 2,23%; no se halló asociación entre las variables hídricas y de cobertura, mostrando ambos grupos un comportamiento independiente; la complejidad paisajística fue mayor en las coberturas naturales que en las artificializadas y a gran escala también se mantuvo dicha complejidad, aunque se recomienda la replicación de ésta metodología a escala temporal y espacial significativamente más reducida para apreciar de manera más óptima la respuesta de las subcuencas o microcuencas ante las modificaciones de la cobertura y los usos del suelo.

ABSTRACT

The Gran Sevilla River Basin, (made up of the Frío, Sevilla and Orihueca streams) is one of the largest freshwater contributors to the Ciénaga Grande de Santa Marta Lagoon Complex. In the present work, the water production of this landscape unit was estimated by means of surface water balance and rational method, while the effect of the change in its coverage on said estimates in the periods 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009 and 2010-2018 using WorldClim 2.1 climate models and unsupervised classification using Landsat 5 and 8 products. An increase was found in populated centers within the basin, a slight recovery of the forests but also an accentuated fragmentation and large landscape transformations in the area. middle and lower basin; Under the two models, the basin has decreased its ability to produce water by 12% since the 1980s and the scarcity index in general points to a high inter-annual decadal demand for water; When the landscape dynamics, the hydric characteristics of the soil and the slope are taken into account in this basin, the estimate of the water produced is reduced between 1.48% and 2.23%; No association was found between the hydric and coverage variables, both groups showing an independent behavior; The landscape complexity was greater in the natural covers than in the artificial ones and on a large scale, this complexity was also maintained, although the replication of this methodology on a much smaller temporal and spatial scale is recommended to more optimally appreciate the response of the sub-basin or micro-basins in the face of changes in coverage and land use.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial que sostiene la vida, la cantidad de agua determina en gran medida el tipo de paisaje o área biótica presente en un lugar, el volumen de agua disponible en el mundo es de aproximadamente 1.386 millones de kilómetros cúbicos, de los cuales 2,5% es agua dulce (Fattorelli & Fernández, 2011) y sólo 0,26% se encuentra en lagos, embalses y ríos; la cantidad de agua almacenada por escorrentía en todos los ríos del mundo es de 2.000 km^3/año, valor inferior a la extracción mundial, estimada en 3.800 km^3 anuales (Díaz Caravantes et al., 2013).

Colombia ocupa el séptimo lugar a nivel mundial de los países con mayor disponibilidad de recursos hídricos renovables, la ubicación geográfica, variada topografía y régimen climático que caracterizan al territorio determinan que posea una de las mayores ofertas hídricas del planeta; sin embargo, ésta no se encuentra distribuida homogéneamente en todo el territorio, viéndose sometida a variaciones que determinan su disponibilidad (Campuzano et al., 2012). Según el Estudio Nacional de Agua 2010, en el país se estima una oferta hídrica total de 2.210 km^3/año, cerca del 13% de los 17.000 km^3/año que corresponden a la oferta suramericana (IDEAM, 2010a), el consumo medio de agua en Colombia ronda los 2.300 km^3/año y disminuye notablemente en un 38% para el año medio seco en una cifra de 1.400 km^3/año (Arévalo Uribe, 2012).

El uso del recurso hídrico en el campo representa entre 70% y 80% del total mundial, la falta de tecnología e infraestructura de riego hace que el 46% del agua sea efectivamente utilizada y el resto regrese al ciclo eclógico sin ser aprovechada en la agricultura (Carabias & Landa, 2005).

Debido a la problemática del agua, muchas comunidades dependen de recursos hídricos subterráneos, sin que esto disminuya las presiones sobre los ríos y otras fuentes superficiales; el presente documento abordará aspectos como la oferta y demanda de agua en una cuenca tropical relacionados a la evolución paisajística en varios períodos de tiempo, mediante técnicas de percepción remota y análisis de series de tiempo climáticas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El aumento en la demanda de agua debido al crecimiento de los centros urbanos hace que se presente sobreexplotación del recurso hídrico, con el consecuente deterioro de sus fuentes; en los próximos años no sólo seguirá aumentando la necesidad de agua para los usos económicos, sino que la oferta aprovechable del recurso puede reducirse si continúan la tendencia actual de deforestación de sus sitios de producción (Mussetta, 2013).

En las últimas décadas se ha evidenciado una crisis global al respecto de la cantidad y calidad de agua dulce; la expansión urbana continua, el crecimiento económico, y el cambio climático, han sido los factores más importantes que han llevado a esta situación (Díaz Caravantes et al., 2013).

Las modificaciones radicales del paisaje en busca del aumento de la producción de alimentos y de espacios óptimos para asentamientos humanos han tenido impactos negativos en la disponibilidad de agua en las cuencas que se desarrollan por escorrentía (Dudula & Randhir, 2016), generando escasez de recursos, pérdida de áreas naturales y paulatinamente el deterioro de los servicios ecosistémicos (Russell et al., 2017; Vogl et al., 2017), de ahí la importancia de conocer la evolución de los cuerpos de agua en especial de las cuencas hidrográficas, que son la principal fuente de suministro para la mayoría de poblaciones (Orrego, 1999 en Severiche Sierra et al., 2013).

La cuenca del río Gran Sevilla (Magdalena, Colombia), es uno de los mayores aportantes de agua dulce al Complejo Lagunar Ciénaga Grande de Santa Marta, es fuente de agua potable para localidades como Sevilla, Estación Sevilla, San Javier, Palmor, Guacamayal, San José de Kennedy, Palomar, La Candelaria, La Gran Vía, Río Frío, San Pedro de La Sierra, Santa Rosalía, Siberia, Varela, Zawady y ofrece abastecimiento hídrico para el sector agroindustrial que se ha establecido en su interior. Este sistema ha sido foco de expansión de la frontera agrícola, en especial desde la puesta en marcha de cultivos extensivos de banano y palma africana, que acrecentaron la demanda de agua para regadíos desde finales el siglo XIX hasta el

presente (Viloria De la Hoz, 2009) con la consecuente disminución en la oferta para el mantenimiento de su caudal base.

El presente trabajo se realizó con el objetivo de analizar las dinámicas espacio-temporales de las coberturas y el uso del suelo en la cuenca del río Gran Sevilla, ahondando en las consecuencias que traen la trasformaciones paisajísticas sobre la producción de agua; para ello se implementaron modelos climáticos y técnicas de precepción remota, a fin de estimar la respuesta hídrica de la megacuenca en el período 1980-2018, y aportar a su conocimiento como unidad paisajística funcional para la región. Ante lo anterior, la pregunta orientadora de investigación fue:

¿Cómo han impactado los cambios paisajísticos decadales en la cuenca del río Gran Sevilla a su balance hídrico superficial en el período 1980-2018?

JUSTIFICACIÓN

El entendimiento de las dinámicas hídricas y la degradación de sus fuentes es de relevancia mundial, en especial en momentos de crisis ambiental y deterioro de los recursos naturales vitales para la existencia de las comunidades humanas.

La descripción de patrones de cambio permite la identificación de tendencias y facilita la toma de decisiones respecto a medidas de manejo y conservación de espacios vitales para el desarrollo de la vida y el mantenimiento de las condiciones de bienestar social.

A pesar de la existencia de referentes en el país que estudian las coberturas de la tierra y los usos de suelo (IDEAM, 2010b; IDEAM et al., 2008) y de estimaciones de la oferta y disponibilidad del recuro hídrico (IDEAM, 2010a, 2015, 2019), éstos tienen como base la escala nacional, sin atender a tópicos específicos y no buscaron relacionar la producción y demanda de agua con los caracteres paisajísticos del sistema y/o su evolución a través del tiempo; dichos aspectos son relevantes debido que aportan información sobre la interacción entre los componentes paisajísticos y la acción del hombre, y además constituyen bases técnico-científicas para el ordenamiento ambiental y ecológico de la zona estudiada, al ofrecer un panorama más completo de su ritmo de fragmentación y evolución de su complejidad con el consecuente impacto en su capacidad para producir agua.

La realización de esta investigación ofrece la oportunidad de contar con información valiosa al momento de priorizar las medidas de mitigación y control necesarias para garantizar a futuro el correcto funcionamiento ecológico de la cuenca.

ANTECEDENTES

En Colombia, los estudios de coberturas y usos de la tierra son de aplicación reciente y es destacable el interés por parte de las facultades de ingeniería y ecología en evaluaciones de tipo multitemporal. A continuación, algunos ejemplos relevantes:

Gómez Ángel (2009), analizó la dinámica de transformación de las coberturas afectadas por el crecimiento urbano, en una zona de 4.806 hectáreas en la localidad de Suba (Bogotá), en el período 1955-2006; reportando la desaparición de grandes zonas naturales y de uso agropecuario, además de un alto grado de fragmentación, fruto del crecimiento descontrolado de los usos urbanos.

Acuña Caro (2013), realizó un análisis de coberturas y de usos de suelo, del Corredor Encenillo (Cundinamarca), mediante la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia y el uso de una imagen Landsat, encontrando un mosaico de coberturas con predominancia de más del 50% de espacios agropecuarios, un alto grado de fragmentación, y de conflictos de uso, indicando necesidad de ordenamiento y manejo adecuado para evitar su posible transformación a un estado definitivo de deterioro.

Castellanos-M et al. (2011), analizaron la variación de la cobertura vegetal en la microcuenca El Llanito, en el municipio de Barrancabermeja (Santander), mediante fotointerpretación de imágenes aéreas; encontrando la deforestación de 4.635,26 hectáreas de bosque natural y, aumento de las coberturas de bosque secundario y de pastizales por lo que concluyeron que el sistema se encontraba bajo un estado de alta fragmentación, debido a la expansión agrícola/ganadera, la tala selectiva, y que ésta última podría estar encaminando a la ciénaga a un proceso de colmatación.

El cambio en la cobertura boscosa en el Parque Nacional Natural Tinigua (Meta) y su área de influencia, fue analizado por medio de imágenes Landsat, correspondientes a los años 1988, 2000 y 2015, encontrando un aumento

considerable de la deforestación en que los bosques fueron reemplazados por grandes pastizales para ganadería, cultivos de palma de aceite, áreas de quema y tala para la explotación ilegal maderera, por vías o por el aumento de los centros poblados que rodean al parque (Arias Hernández & Lugo De La Hortúa, 2015).

Padilla Nieto & Salazar Arcila (2015), estimaron los efectos sobre la biodiversidad causados por el establecimiento y expansión de cultivos para la producción de agrocombustibles en un transecto de las regiones Caribe y Andina mediante clasificación supervisada de imágenes Landsat 7, para el año 2001 y Landsat 8, para el año 2014; encontrando que si bien no existe una relación estricta o directa entre el área de ocupación de los cultivos y la perdida de coberturas naturales, la expansión de los primeros provocan efectos negativos por la pérdida de flora autóctona y aumento de la vulnerabilidad a desaparición (o perdida) de parches remanentes de boque nativo a consecuencia de la reducción paulatina de su densidad de forma (Área/Perímetro).

Los cambios multitemporales de las coberturas de la región del pacifico Norte chocoano (integrada por los municipios de Nuquí, Bahía Solano y Juradó) fueron analizados utilizando información de la deforestación de los periodos de 1990, 2000, 2005, 2010 y 2012 suministrados por el IDEAM para toda Colombia y para el año 2014 se implementaron imágenes del sensor RapidEye, procesadas mediante fotointerpretación y clasificación supervisada; encontrando que en el periodo 2010-2012 hubo una permanencia de bosques del 97,11% mientras en el periodo 2012-2014 fue de 80,34% (Palacios Bermúdez, 2015).

Mejía Ramírez (2016), evaluó el efecto de la minería sobre las coberturas en el Bajo Cauca Antioqueño, para ello procesó imágenes Landsat de 1986 y 2016 mediante clasificación supervisada; evidenciándose un aumento en la pérdida de cobertura vegetal y grandes extensiones de suelo desnudo a causa del aumento considerable de la extracción ilegal de oro de aluvión.

Castillo & Rodríguez (2017), foto-interpretaron 11 imágenes de los satélites Landsat 5 y Landsat 7 tomadas entre los años 1984 y 2003, con el fin de identificar los

patrones de cambio de las coberturas en la laguna de Fúquene, que se encuentra en la sabana de los valles de Ubaté y Chiquinquirá, hallando que al final de período analizado el espejo de agua se redujo en un 78,7%, hubo aparición de áreas cultivadas y expansión de la vegetación acuática flotante, así como la aparición y extensión de praderas, procesos causados por la eutrofización de la laguna y su desecación intencional destinada a usos agrícolas.

Mongua Lucero (2017), realizó un análisis de las coberturas en la cuenca del río San Juan, (que atraviesa diversos municipio del departamento de Risaralda y el Pacífico colombiano), a partir de imágenes Landsat de los años 1990, 2005 y 2013; y encontró que, al final del período estudiado, las áreas de extracción minera se quintuplicaron, mientras las tierras desnudas y degradadas se duplicaron como consecuencia de la expansión minera y agrícola, lo que ha provocado aumento en el desgaste del suelo y la sedimentación.

Dentro del contexto del Caribe colombiano, Mendoza Riaño & García Blanco (2011), evaluaron el estado y condición de los recursos naturales en el municipio de Manaure (La Guajira), utilizando imágenes Landsat de los años 1986 y 2002 que clasificaron mediante metodologías supervisadas, reportando aumento de 2,62% en las tierras desnudas y degradadas como producto de la condición desértica de la zona, el aumento de 733 hectáreas de espacio urbanizado y la aparición de cuerpos de agua a lo largo de la costa, lo que se traduce en incremento de la amenaza ante subidas de la marea.

Gutiérrez Rojas (2009), realizó la caracterización del uso de suelos en la microcuenca del río Gaira, en el departamento del Magdalena, implementando clasificación no supervisada sobre una imagen Aster, con una resolución de 15 metros por pixel, con la que encontró predominancia de bosques primarios, en especial en la parte alta (50% de las coberturas eran boscosas), el 10% de la cuenca se encontraba ocupada por cultivos permanentes, 6% por asentamientos humanos y halló una alta fragmentación de los bosques, en especial los ribereños, por estar asociados suelos muy fértiles, favorables para los procesos de expansión agrícola.

Ramírez Zapata (2015), llevó a cabo el análisis e identificación de las coberturas en el municipio de San Jacinto (Bolívar), a partir de imágenes RapidEye y Spot, de los años 1999 y 2011 mediante clasificación supervisada, siguiendo la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, con lo que reportó evidencias de que los cambios en las coberturas en el período analizado no fueron muy relevantes en términos porcentuales, dado que hay persistencia en el uso de los suelos para actividades agrícolas, pero hay leve aumento en las coberturas que transitan hacia bosques.

Son de obligatoria referencia los estudios de carácter nacional adelantados por el IDEAM, en los años 2008 y 2010 en los que publicó la estandarización de metodologías y generación de productos cartográficos que describen las coberturas y usos del suelo; y la publicación recurrente del Estudio Nacional del Agua, correspondiente a los años 2010, 2014 y 2018 en los que aborda el tema de los recursos hídricos, estimando su oferta y demanda a lo largo de todo el territorio colombiano (IDEAM, 2010a, 2015, 2019).

Dentro de las aproximaciones similares a lo planteado en el presente trabajo, se encuentran Aponte Pérez & Galeano Franco (2017), quienes en el municipio de La Playa de Belén (Norte de Santander) analizaron la afectación sobre la oferta hídrica superficial de la microcuenca La Tenería, producida por los cambios en el uso del suelo en los años 2000, 2013 y 2016, mediante clasificación no supervisada de imágenes satelitales y cálculo de la oferta hídrica superficial, encontrando que menos de la mitad de la cuenca está ocupada por coberturas naturales, lo que disminuye su rendimiento hídrico ocasionando el aumento de las superficies erosionadas; y a pesar de observar la transformación sucesional de rastrojos en bosque no se apreciaron efectos mitigadores de la alta transformación paisajística en la producción de agua de la cuenca.

Jullian et al. (2018), modelaron escenarios de cambio de uso de suelo y su efecto sobre el servicio de regulación hídrica a través del método del número de curva al sur de Chile, encontrando que, de darse aumento de bosques nativos, incrementa

la capacidad de regulación del agua por parte la cuenca, mientras que al consolidarse plantaciones forestales dicha capacidad de regulación se disminuye.

Pérez Cutillas et al. (2018), estimaron el impacto hidrológico asociado la revegetación de una Subcuenca del Alto Taibilla en Río Segura, (España) en los períodos 1933-1948 y 1996-2012 empleando el método del número de curva (coeficiente de escorrentía por método racional) y lluvia-escorrentía encontrando disminución del caudal y aumento de la evapotranspiración como producto de una reorganización de los flujos verticales y laterales de agua en la cuenca como producto del reemplazamiento de las coberturas agrícolas por bosques y teniendo impacto en los recursos hídricos de la zona.

Y más recientemente Suarez Soto (2019), buscó relacionar los cambios en la cobertura vegetal, el clima y la oferta hídrica en la cuenca del río Canalete, en el departamento de Córdoba, el periodo de 1972-2017, hallando fuertes correlaciones entre variables que se explican a través del cambio climático y la acción antrópica.

MARCO TEÓRICO

Ecología del Paisaje

El paisaje puede ser definido como el producto de las interacciones de los componentes biofísicos y socioeconómicos de un sistema natural, la ecología de paisajes puede es la ciencia que se encarga del estudio y mejoramiento de las interacciones entre la disposición espacial de los componentes de un sistema y los procesos ecológicos que se dan en este (Liding et al., 2008; Wu, 2008). La ecología del paisaje está llamada a responder las necesidades y problemáticas de un mundo en constante cambio, lo que ha conllevado a nuevas formas de analizar los patrones y procesos de cambio paisajístico a mayores escalas (Hobbs, 1997), con la revolución tecnológica ha llevado a la aplicación de sensores remotos como parte de los intentos de alcanzar una visión integradora y holística del paisaje como unidad funcional de estudio (Venema et al., 2005).

Coberturas de la Tierra

Las coberturas de la tierra están definidas como los tipos de suelo existentes en un territorio unidos al tipo específico de vegetación que crece sobre él, mientas los usos del suelo se refieren al producto de la interacción o intervención del ser humano con dicho suelo (Bae & Ryu, 2015).

Los cambios en las coberturas terrestres son el fruto de procesos biofísicos, la intervención humana o la interacción de ambos factores (Dang & Kawasaki, 2017), el entendimiento de las dinámicas de cambio en las coberturas terrestres y los usos del suelo es fundamental para la comprensión de los procesos ecosistémicos que sustentan la vida (Giri et al., 2013).

Los estudios paisajísticos hacen uso frecuente de técnicas como el sensoramiento remoto e implementación de sistemas de información geográfica, dada las ventajas que ofrecen en cuanto a captura masiva de información, poca intervención en el

área de estudio y facilidades para el monitoreo de procesos en grandes áreas paisajísticas (Bakker et al., 2009; Castillo & Rodríguez, 2017; Huisman & de By, 2009; Rocchini et al., 2017; Xing et al., 2017; Zhang & Roy, 2017).

Técnicas de Clasificación

El estudio de las coberturas vegetales y uso del suelo implica en muchos casos la necesidad de caracterizar una inmensa cantidad de parches en un área de terreno que a su vez suele ser muy extensa. Para facilitar tales procesos los SIG poseen de facto dos técnicas que implementan firmas espectrales (cúmulos o clústeres) para identificar gamas de reflectancia sobre imágenes satelitales que permiten la asignación de cada pixel a una categoría particular: la clasificación no supervisada y la supervisada, diferenciándose en que la primera trabaja en base en la probabilidad de que un pixel sea clasificado en un número determinado de categorías previamente establecido, mientras la segunda considera el conocimiento del área de estudio mediante la visita a campo que puede complementarse con el análisis detallado de imágenes aéreas para la rectificación de las preclasificaciones obtenidas (Aguirre Gómez & Morales Manilla, 2012; Contreras Silva, 2011; IDEAM, 2010b; IDEAM et al., 2008).

Índices y Métrica

Para el análisis paisajístico se consideran generalmente variables del entorno que se miden sobre los parches o parcelas que lo componen como: La frecuencia de un tipo de parche específico, su área, perímetro y distancia entre parches, tales datos son la base de cálculos más complejos que caracterizan la distribución de la heterogeneidad espacial e incluso son útiles en la estimación de su evolución multitemporal (Morláns, 2009).

El Índice de Forma se basa en la relación entre área y perímetro y facilita la comprensión de la morfología y funcionalidad cada parche al interior del paisaje (Vila Subirós et al., 2006); mientras la Dimensión Fractal describe mediante un índice el grado de irregularidad y fragmentación de un conjunto geométrico o de un objeto natural (Rehman & Siddiqi, 2009).

Análisis Hídrico

Una cuenca hidrográfica es toda el área de terreno que por su relieve propende en la captación superficial de agua de las precipitaciones, encausándolas en forma de río, quebrada, lago, laguna, humedal, estuario, embalse, manantial o pantano; la mayor parte del agua con que se desarrollan las actividades cotidianas del ser humano, proviene de las precipitaciones y el escurrimiento que tiene lugar dentro de las cuencas hidrográficas (Shroder, 2014); cuando en la cuenca existen interacción de aguas superficiales con subterráneas, el sistema pasa a llamarse cuenca hidrológica, es decir, que las cuencas hidrográficas cuentan únicamente con el agua superficial, mientras que las hidrológicas poseen acuíferos [aguas subterráneas] (Gutiérrez Rojas, 2009); es un hecho preocupante que con el aumento constante de la demanda de recursos hídricos de los asentamientos humanos, cada vez es más notable y frecuente el empleo de las fuentes subterráneas presentes en las cuencas hidrológicas.

El cálculo de la escorrentía a partir de las entradas, salidas, y variaciones en almacenamiento de agua en un sistema se define como balance hídrico (UNESCO, 2014); su estudio viene ligado a la oferta hídrica superficial, que hace referencia al volumen de agua almacenado en los sistemas naturales durante un periodo determinado de tiempo [usualmente expresada en millones de metros cúbicos], en éste sentido puede ser definida como el agua que fluye por la superficie del suelo, que no se infiltra, no se evapora y se concentra en los cauces de los ríos o en los cuerpos de agua lénticos (IDEAM, 2015); y la demanda hídrica representada como el volumen de líquido extraído de los cuerpos de agua, utilizado para las actividades

socioeconómicas en un espacio y tiempo determinado (IDEAM, 2010a); se conoce como rendimiento hídrico a la cantidad de agua que una cuenca tiene la capacidad de producir por unidad de superficie en un intervalo de tiempo dado [normalmente un año], las unidades convencionales para presentar esta variable son L/s/Km2 (IDEAM, 2015).

Cuando el balance hídrico deja de ser estrictamente superficial y tiene en cuenta el efecto de vegetación, usos de suelo, la pendiente del terreno, el tipo hidrológico de suelo, entre otras variables (Treviño Garza et al., 2002) se pasa la estimación del coeficiente de escorrentía para cada condición de terreno dependiendo del cruce de los factores y variables antes mencionados, y luego a su ponderación a fin de capturar la mayor heterogeneidad del terreno analizado, para tal fin suele emplearse plataformas SIG que facilitan el manejo de la información y se implementan las fórmulas racionales que permiten la obtención de los volúmenes totales escurridos (Monsalve Sáenz, 1999).

Una de las mayores causantes del deterioro medioambiental, de las funciones y de los cambios en régimen hídrico de un ecosistema es la fragmentación (Mas & Correa Sandoval, 2000), contando también la pérdida de especies y de hábitat (Venema et al., 2005), dentro de las formas de evaluar tales impactos se encuentra el índice de aridez, que muestra de manera cualitativa, los lugares con excedentes y déficit de agua (IDEAM, 2010a) y el índice de escasez que muestra la relación entre la demanda y la oferta hídrica; cuando la cantidad de agua captada es mayor a la capacidad de dichas fuentes como ríos, lagos y acuíferos se dice que hay escasez del recurso hídrico (Delgado Lindeman & Quintana Canabal, 2014).

HIPÓTESIS DE TRABAJO

El razonamiento básico del presente trabajo fue: Como parte de la respuesta hídrica de la cuenca del río Gran Sevilla se disminuye su rendimiento en correspondencia con la aparición coberturas y uso del suelo artificializados, traduciéndose en pérdida de complejidad paisajística y reducción en la capacidad de escurrimiento de agua de la megacuenca.

Se esperaba encontrar un progresivo aumento en la transformación paisajística con tendencia a la desaparición de coberturas naturales, en consonancia con la reducción de la oferta hídrica de la cuenca (producción) y aumento en la demanda de agua provocando una altísima escasez de éste recurso.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar los cambios paisajísticos decadales en la cuenca del río Gran Sevilla (Departamento del Magdalena) en el período 1980-2018 y comparar su impacto en la respuesta hídrica usando el método racional y el balance hídrico superficial.

Objetivos específicos

Caracterizar los cambios paisajísticos (coberturas de la tierra) decadales en la cuenca del río Gran Sevilla el período 1980-2018 mediante técnicas de percepción remota.

Cuantificar la oferta hídrica decadal en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018 por balance hídrico superficial y mediante método racional.

Estimar la demanda de agua decadal en la cuenca del río Gran Sevilla en relación con las coberturas de la tierra presentes en el período 1980-2018.

METODOLOGÍA

Área de Estudio

La cuenca del río Gran Sevilla se encuentra ubicada en la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, aproximadamente entre las coordenadas: 11,0260248325°N y 10,652804557°N de latitud; y 73,860175546°W y 74,3314499508°W de longitud; se trata de una unidad paisajística conformada, en orden de norte a sur, por las cuencas de río Frío, la quebrada Orihueca y el río Sevilla (Figura 1), cuenta con un área total de 974,282 Km^2 cubriendo mayor superficie la cuenca del río Sevilla con 413,915 Km^2 seguida por río Frío con 377,57 Km^2 y luego la quebrad Orihueca con 182,797 km^2 (Tabla 1).

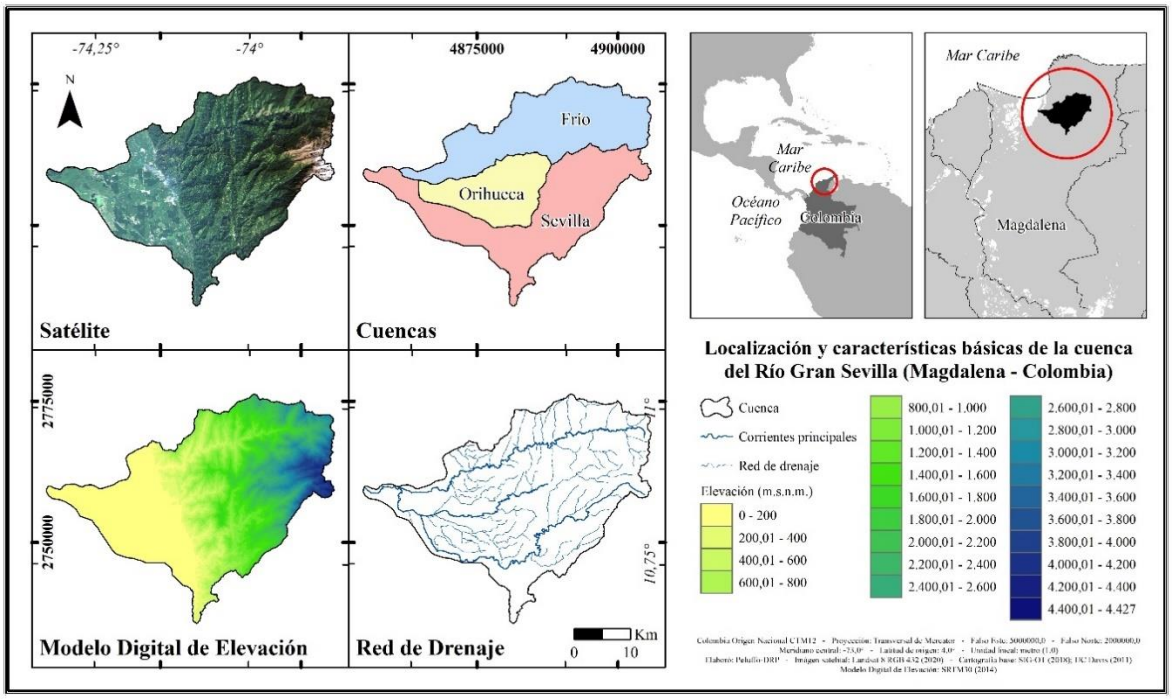

Figura 1. Localización, imagen satelital, modelo digital de elevación, red de drenaje y subcuencas del río Gan Sevilla.

El río nace a una altitud aproximada de 4.427 metros sobre el nivel del mar, haciendo un recorrido en sentido este-oeste para desembocar en la Ciénaga Grande de Santa Marta, ocupando parte de los territorios del Distrito Turístico Cultural e Histórico de Santa Marta, y los municipios Ciénaga, Zona Bananera y Puebloviejo.

Al norte limita con las cuencas de los ríos Buritaca y Córdoba, y al sur con las cuencas hidrográficas de los ríos Tucurinca y Aracataca; Al este limita con la cuenca hidrográfica del río Don Diego, y al oeste con la Ciénaga Grande de Santa Marta y la ciénaga del El Chino; Dentro de la subcuenca Sevilla, sus principales centros poblados son Palmor, San José de Kennedy, Sevilla, Estación Sevilla, Guacamayal y Palomar; para el caso del río Frío se encuentran en la cuenca baja y son Zawady, Río Frio, Varela y La Candelaria; y en la subcuenca de la quebrada Orihueca se localizan La Gran Vía, Orihueca, Manzanares y Santa Rosalía (CORPAMAG, 2015, 2016).

Tabla 1. Parámetros básicos de la cuenca del río Gran Sevilla.

Parámetro	**Subcuenca**			**Gran Sevilla**
	Sevilla	*Frío*	*Orihueca*	
Área (km^2)	413,915	377,57	182,797	974,282
Perímetro (km)	159,475	125,16	65,069	172,059
Altitud media (m.s.n.m.)	1.195,6	1.396	421,5	1.128
Altitud máxima (m.s.n.m.)	4.427	4.234	1.971	4.427
Longitud del cauce principal (km)	83,277	61,789	30,075	83,277
Caudal medio (m^3/s)*	14,59	16,74	4,31	35,64**
Rendimiento hídrico ($L/s/km^2$)*	35,12	44,31	23,81	103,24**

Fuente: Cálculos propios y CORPAMAG (2015, 2016).
**Datos estimados por balance hídrico superficial.*
***Sumatorias.*

Este conjunto de cuencas es uno de los más importantes de la región occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, debido a que es fuente de agua potable para las poblaciones que se asientan en sus riveras incluyendo múltiples usos agropecuarios como el cultivo de banano y palma africana, que le otorgan valor estratégico tanto a nivel ecológico como agroindustrial.

Análisis Multitemporal de Coberturas (Objetivo Específico 1)

Para cada período de tiempo a analizar (1980-1989; 1990-1999; 2000-2009; y 2010-2018) se obtuvieron imágenes de los satélites Landsat 5 y Landsat 8 (Tabla 2), y se preprocesaron haciendo correcciones atmosféricas mediante el método [de Chávez]

de substracción de objetos oscuros, que busca obtener valores reales de reflectancia, y ha demostrado buenos resultados en los productos de los satélites antes citados, debido a que su resolución no es excesivamente alta (Rodríguez Martín, 2014; Sendra et al., 2015).

Tabla 2. Productos satelitales implementados para la caracterización paisajística de la cuenca del río Gran Sevilla.

Período	Satélite	Identificador	Fecha de captura	Fecha de publicación	Cobertura de nubes en la escena	Cobertura de nubes en tierra	Combinación de Bandas
1980-1989	Landsat 5	LT05_L1TP_009052_19891221_20200916_02_T1	21 de diciembre de 1989	16 de septiembre de 2020	4%	0%	Red: B4 Green: B5 Blue: B3
		LT05_L1TP_009053_19891221_20200916_02_T1			1%	0%	
1990 1999		LT05_L1TP_009052_19990131_20200908_02_T1	31 de enero de1999	8 de septiembre de 2020	24%	16%	
		LT05_L1TP_009053_19990131_20200908_02_T1			0%	0%	
2000-2009		LT05_L1TP_009052_20100129_20200825_02_T1	29 de enero de 2010	25 de agosto de 2020	9%	18%	
		LT05_L1TP_009053_20100129_20200825_02_T1			0%	0%	
2010-2018	Landsat 8	LC08_L1TP_009052_20171218_20200902_02_T1	18 de diciembre de 2017	2 de septiembre de 2020	11,15%	8,34%	Red: B5 Green: B6 Blue: B4

Fuente: Productos satelitales obtenidos a través de la plataforma de exploración terrestre del Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS (https://earthexplorer.usgs.gov/).

Se obtuvieron las coberturas de la cuenca mediante reclasificación no supervisada de las imágenes (Rojas & Ortiz, 2009 en Morales-Hernández et al., 2016) implementando para ello una resolución mínima de píxel de 30x30 metros, dadas las limitaciones de Landsat 5, lo que en términos de escala equivale a 1:60.000 (Nolasco et al., 2014).

El patrón del paisaje se analizó a partir de interpretación visual (Mas & Correa Sandoval, 2000) de categorías previamente establecidas en la "*Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra*" fruto de la adopción de la metodología *Corine Land Cover* en el territorio nacional colombiano por parte del (IDEAM, 2010b).

Este análisis se llevó a cabo usando la plataforma ArcGIS y empleando métricas e índices descriptivos del paisaje como: número de parches, área de parche, promedio de las áreas por tipo parche, índice de forma, y dimensión fractal, de tal manera que se permita la estimación de la complejidad de los fragmentos de vegetación (Cabezas Gaviria & Ospina Montealegre, 2010).

El índice de forma (*IF*) evalúa la complejidad de un parche de vegetación comparándolo con la forma de un círculo de la misma área del parche a analizar, mientras la dimensión fractal (*DF*) estima el nivel complejidad considerando la escala de observación del paisaje, dichas ecuaciones se definen como sigue:

$$IF = \frac{p}{2\sqrt{\pi} \times S} \qquad DF = \frac{2\ln(p)}{\ln(S)}$$

Donde, *IF* es el índice de forma, *DF* es la dimensión fractal, *p* es el perímetro del cada parche, y *S* es la superficie de cada parche; *IF* toma valores de 1 para formas sencillas (parecidas a un círculo perfecto) y va aumentando según las formas van ganando complejidad; mientras *DF* asume valores de 1 para geometrías sencillas y se aproxima a 2 para indicar mayor complejidad (Mas & Correa Sandoval, 2000).

Oferta Hídrica (Objetivo Específico 2)

Las estimaciones de la oferta hídrica se realizaron considerando los factores que se describen a continuación:

Balance Hídrico Superficial

Para estimar el balance hídrico se tomó la ecuación diferencial de conservación de masas (Álvarez Villa et al., 2008) del modelo de conversión de lluvia en escorrentía (Pascual Aguilar et al., 2010), que se define como:

$$\frac{dS}{dt} = P_{(t)} - ET_{(t)} - ESC_{(t)}$$

Donde, *dS/dt* representa el almacenamiento de agua en el suelo y en los acuíferos, *P* y *ET* son la precipitación y la evapotranspiración real en la cuenca y *ESC* representa la escorrentía de la cuenca. Todas las variables se encuentran en función del tiempo *(t)*.

Al integrar la ecuación de balance hídrico en el largo plazo los valores de $P_{(t)}$, $ET_{(t)}$ y $ESC_{(t)}$, se pueden reemplazar por los valores promedio de cada lapso temporal, teniendo lo siguiente:

$$ESC = P - ET$$

Donde, *ESC* es la escorrentía promedio en mm, *P* es la precipitación promedio en mm y *ET* es la evapotranspiración real promedio en mm.

Precipitación y Evapotranspiración

Los valores de precipitación se obtuvieron a partir de los datos históricos mensuales de CRU-TS 4.03 (Harris et al., 2014) modelación basada en WorldClim 2.1 (Fick & Hijmans, 2017).

Dado que en estudios hidrológicos la evapotranspiración potencial (*ETP*) y la evapotranspiración de referencia (*ET0*) son usadas indistintamente (Sánchez San Román, 2017), se extrajo la evapotranspiración de referencia del modelo elaborado por Trabucco & Zomer (2019), quienes realizaron sus estimaciones mediante la metodología de Penman- Monteith (Allen et al., 1998) recomendada por la FAO (Allen et al., 2006).

La evapotranspiración real se estimó por el método de lo propuesto por Budyko & Miller (1974), que va en consonancia con la metodología aplicada en el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2010a, 2015, 2019):

$$\mathrm{ETR} = \left[\mathrm{ETP} * \mathrm{P} * \tanh\left(\frac{\mathrm{P}}{\mathrm{ETP}}\right) * \left[1 - \cosh\left(\frac{\mathrm{ETP}}{\mathrm{P}}\right) + \sinh\left(\frac{\mathrm{ETP}}{\mathrm{P}}\right)\right]\right]^{1/2}$$

Donde *ETR* es la evapotranspiración real (mm/año), *ETP* es la evapotranspiración potencial (mm/año) y *P* es la precipitación media en la cuenca.

La determinación del balance hídrico en una cuenca sigue dos enfoques, uno espacial y otro promedio; por lo tanto, los resultados se presentaron en términos espaciales (mapas de precipitación, evapotranspiración real y escorrentía) y estadísticos de balance promedio para la cuenca.

Índice de Aridez

El índice de aridez estima en qué medida la cantidad de agua que precipita en una zona es la adecuada [o no] para el sostenimiento de los ecosistemas que en ella se encuentran, su fórmula de cálculo es la siguiente (Alarcón-Hincapié et al., 2019):

$$\mathrm{IA} = \frac{\mathrm{ETP} - \mathrm{ETR}}{\mathrm{ETP}}$$

Donde, *IA* es el índice de aridez (adimensional), *ETP* es la evapotranspiración potencial y *ETR* es la evapotranspiración real.

La deficiencia o excedencia de agua se puede clasificar según el índice de aridez en siete categorías, tal como lo muestra la Tabla 3:

Tabla 3. Clasificación del IA.

Rango de variación del IA	Descripción	Color
Menor a 0,15	Altos excedentes de agua	
0,15 – 0,19	Excedentes de agua	
0,20 – 0,29	Moderado y excedentes de agua	
0,30 – 0,39	Moderado (Normal)	
0,40 – 0,49	Moderado y deficitario de agua	
0,50 – 0,59	Deficitario de agua	
Mayor a 0,60	Altamente deficitario de agua	

Fuente: IDEAM (2010a).

Coeficiente de Escorrentía

Para la estimación de la producción interanual de agua teniendo en cuenta el efecto de las coberturas (respuesta hídrica), se tomó el método racional para el cálculo del volumen medio escurrido [En los sucesivo se le llamará Volumen escurrido a la oferta hídrica estimada por éste método, para diferenciarla de las estimaciones hechas a través de balance hídrico superficial] que considera tanto la vegetación como el tipo hidrológico de suelo y la pendiente (Treviño Garza et al., 2002), como se puede apreciar en la siguiente ecuación:

$$\mathrm{Vme} = \left(\sum (Ce_c * A_c)\right) * (P_m)$$

Donde *Vme*, es el volumen medio escurrido (Oferta hídrica por método racional); *Ce*, es el coeficiente de escorrentía calculado para cada unidad de cobertura; A, es el área de cada unidad de cobertura; y P_m, es la precipitación media multianual.

El coeficiente de escorrentía se asignó a cada unidad de cobertura según la interceptación de factores que se aprecian en la Tabla 4, luego de realizar el respectivo cruce de la información de los tipos hidrológicos de suelo basados en el número de curva y tomado del modelo HYSOGs250m (Ross et al., 2018); el porcentaje de pendiente fue calculado con base en el modelo de elevación digital SRTM30 (EROS & USGS, 2018) y las coberturas de la tierra para cada década

fueron reclasificadas a fin de ajustarse a las tres categorías de uso del suelo de la Tabla 4.

Tabla 4. Coeficientes de escorrentía de Prevert.

Uso de Suelo	**Pendiente** *(%)*	**Textura del Suelo**		
		(Gruesa) *Arenoso-limoso Limoso-arenoso*	(Media) *Limoso Limoso-arcilloso*	(Fina) *Arcilloso*
Bosque	*0 - 5*	0,1	0,3	0,4
	5 - 10	0,25	0,35	0,5
	10 - 30	0,3	0,4	0,6
	>30	0,32	0,42	0,63
Pastizal	*0 - 5*	0,15	0,35	0,45
	5 - 10	0,3	0,4	0,55
	10 - 30	0,35	0,45	0,65
	>30	0,37	0,47	0,68
Agricultura	*0 - 5*	0,3	0,5	0,6
	5 - 10	0,4	0,66	0,7
	10 - 30	0,5	0,7	0,8
	>30	0,53	0,74	0,84

Fuente: Treviño Garza et al. (2002).

Las estimaciones de oferta con base en este método se efectuaron mediante algebra de mapas a nivel decadal, considerando su carácter medio interanual y medio mensual para cada período analizado.

Demanda Hídrica (Objetivo Específico 3)

Demanda Hídrica Total por Factor de Coberturas

La demanda se estimó mediante el análisis y reclasificación de las coberturas, fueron considerados los datos de las demandas por tipo y unidad de superficie, del Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2010a, 2015, 2019).

La demanda hídrica total se calculó como la sumatoria del producto de la superficie de cada parche de cobertura por la demanda respectiva de cada una por unidad de superficie, como se ilustra en la siguiente ecuación:

$$Dh = \sum (A_c \times D_c)$$

Donde *Dh*, es la demanda hídrica total para la cuenca; A_c, es el Área correspondiente a cada cobertura (expresada en hectáreas); y D_c, es la demanda calculada para cada cobertura (expresada en [Mm^3/ha] Millones de metros cúbicos por hectárea).

Índice de Escasez

Con la obtención de la demanda hídrica media interanual para cada período de tiempo y la oferta media por balance hídrico superficial y método racional, se realizó el cálculo del índice de escasez, el cual está determinado como el cociente de la demanda entre la oferta, expresado en porcentaje mediante su multiplicación por 100 como se muestra en la siguiente ecuación (Resolución 865 de 2004):

$$Ie = \frac{Dh}{Oh} \times 100$$

Donde *Ie,* es el índice de escasez; *Dh,* es la demanda hídrica; *Oh,* es la oferta hídrica; y 100 es el factor para expresarlo en porcentaje.

El índice de escasez se agrupa en cinco categorías según la Resolución 865 de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, las cuales se especifican en la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de la demanda hídrica por ranqueo del índice de escasez según la Resolución 865 de 2004.

Categoría	Rango IE	Color	Explicación
Alto	>50%		Demanda Alta
Medio Alto	20,01-50%		Demanda Apreciable
Medio	10,01-20%		Demanda Baja
Mínimo	1-10%		Demanda Muy Baja
No Significativo	<1%		Demanda No Significativa

Fuente: Resolución 865 de 2004 *(Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial).*

RESULTADOS

Análisis Multitemporal de Coberturas (Objetivo Específico 1)

La clasificación con base en productos de los satélites Landsat 5 para los períodos 1980-1989, 1990-1999, y 2000-2009 y Landsat 8 en el caso del período 2010-2018, permitió la detección de 19 coberturas que fueron categorizadas como “Naturales” o “Artificializadas” según los intereses propios del trabajo y se encuentran relacionadas en la Tabla 5, en donde se puede apreciar su distribución porcentual para cada período, considerando que tales cálculos se hicieron utilizando el nuevo estándar de proyección cartográfico para Colombia [Colombia Origen Nacional CTM12] y se visualizan espaciotemporalmente en la Figura 2.

Se puede apreciar que las coberturas de tipo natural se concentran desde la parte central de la cuenca hacia el este, es decir que los mayores porcentajes de coberturas naturales se encuentran asociados a las mayores altitudes, y las coberturas de tipo artificial predominan desde el centro hasta el extremo oeste de la cuenca, zonas en las que es apreciable la expansión de centros urbanos (Figura 2), siendo ésta la única cobertura [Tejido urbano continuo] que mantuvo un crecimiento sostenido durante el trascurso de las cuatro décadas (Figura 3).

Dentro de las coberturas artificiales, es notable un comportamiento fluctuante, mostrando los cambios más importantes ente los períodos 1900-1999 y 2000-2009, y una ligera tendencia de las coberturas naturales a desaparecer en favor del crecimiento del bosque fragmentado, que muestra sus picos de crecimiento en las décadas de los 1990’s y 2010’s, y parece ir en tendencia de aumento en la actualidad; también destaca la disminución de la superficie de bosque denso entre 1980 y 2009, con un incremento significativo hacia la década de 2010’s llegando a superar su estado inicial (Figura 3).

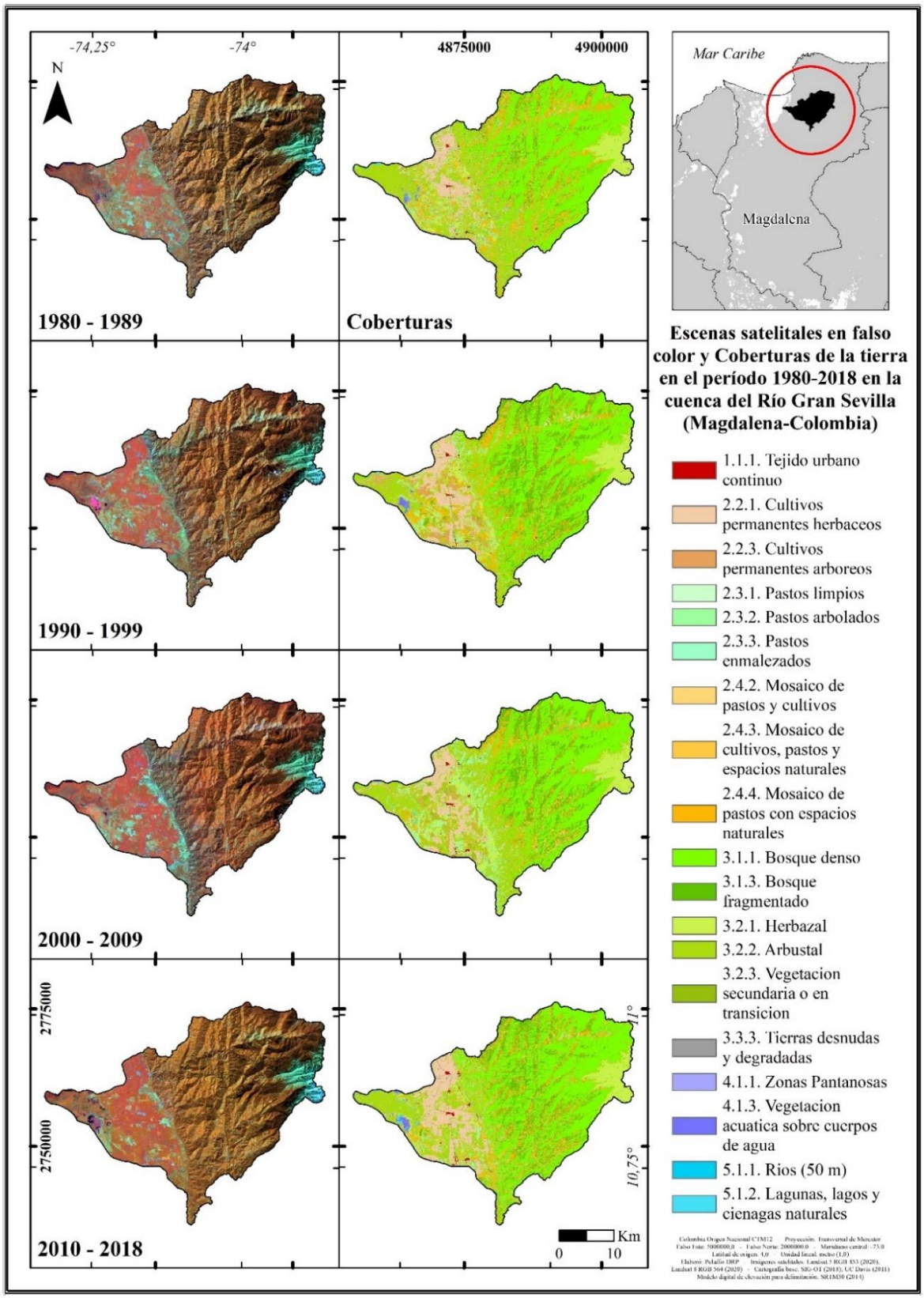

Figura 2. Coberturas de la tierra en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018.

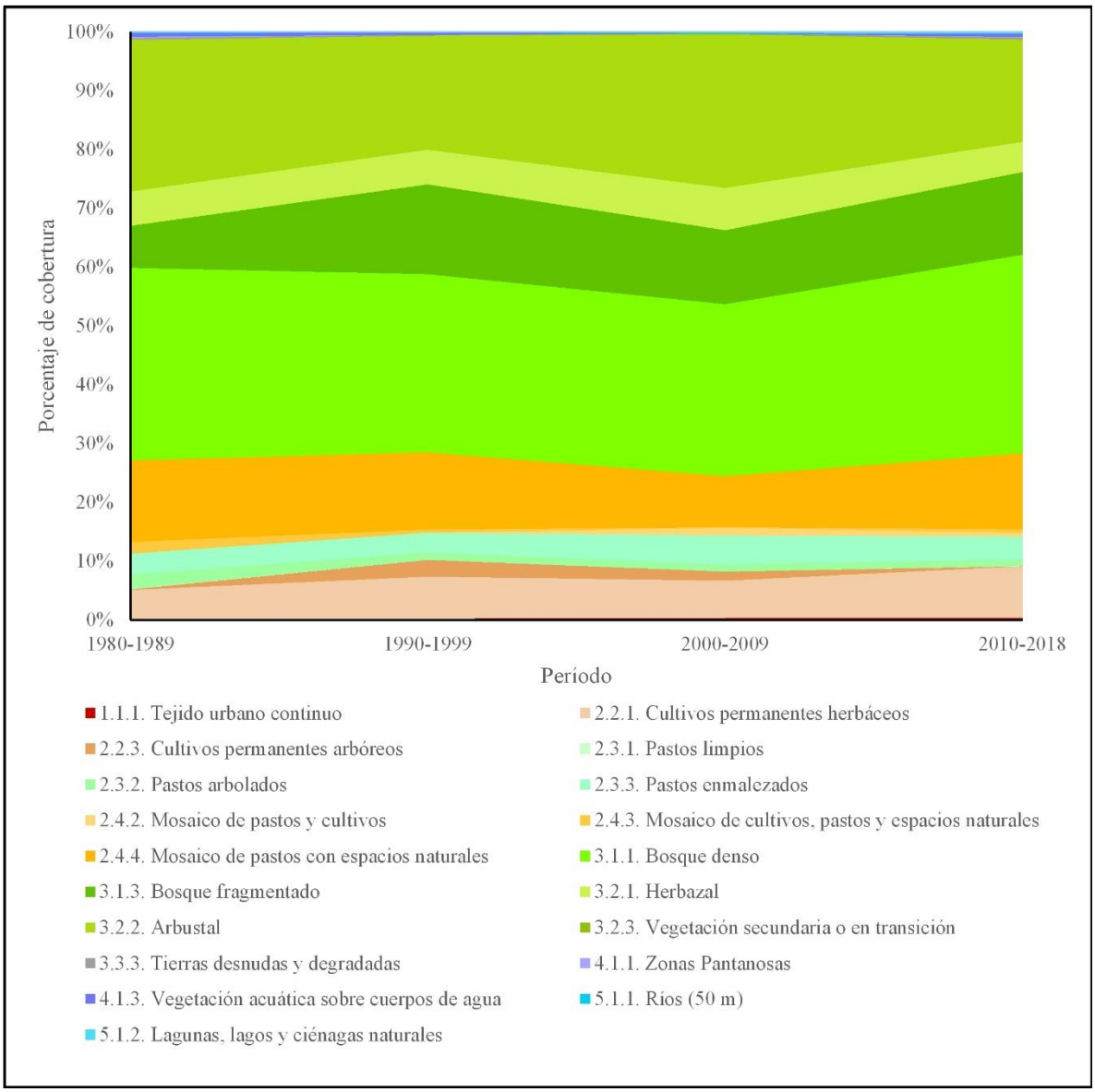

Figura 3. Porcentaje de coberturas decadales *CORINE Land Cover* registradas en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018.
*Porcentajes basados en un área total de 974,282 km^2 (Ver: **Anexo 1**).*

Índices y Métricas

En cuanto a métricas paisajísticas, se compararon mediante Kruskal-Wallis partiendo de la categorización de coberturas naturales y artificializadas, hallando ausencia de diferencias significativas entre los períodos analizados respecto a la

dimensión fractal (P>0,05) y encontrando diferencias en cuanto al índice de forma, el área promedio, el perímetro promedio y el número de fragmentos (P<0,05).

El número de parches (fragmentos) de coberturas naturales inicia en más de 52.000 en la década de los 1980's alcanzando un pico máximo en los 1900's, momento en se superaron los 61.000 fragmentos para luego caer por debajo de los 50.000 en la década siguiente e ir recuperando su número hacia la década de los 2010's, en que supera su número inicial en más de 1.300 parches. Las coberturas artificializadas, pasaron por un proceso similar, iniciando en un valor ligeramente superior a 57.000 fragmentos sufriendo una disminución considerable en la siguiente década [que se corresponde con el significativo aumento de coberturas naturales] y en los años subsiguientes aparentó mantener un ritmo sostenido de crecimiento en número.

Tabla 6. Resumen decadal de métricas paisajísticas para coberturas naturales y artificializadas en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018.

Tipos de Cobertura	Período	Número de parches	Área Promedio *(m^2)*	Perímetro promedio *(m)*	Índice de Forma	Dimensión Fractal
Naturales	1980 - 1989	52.535	14.867,82	351,22	1,28	1,41
	1990 - 1999	61.081	16.871,05	416,48	1,33	1,42
	2000 - 2009	49.383	15.931,68	379,02	1,29	1,42
	2010 - 2018	53.924	15.535,04	366,98	1,28	1,42
Artificializadas	1980 - 1989	57.134	4.909,21	220,77	1,26	1,42
	1990 - 1999	42.220	5.834,76	246,50	1,28	1,42
	2000 - 2009	48.131	5.114,14	230,48	1,26	1,42
	2010 - 2018	56.459	8.455,73	241,38	1,26	1,42

Fuente: Estimaciones propias – Porcentajes basados en un área total de 974,282 km^2.

En cuanto al área promedio de los fragmentos (Tabla 6) en el caso de las coberturas naturales, se mantuvieron entre más de 14.800 m^2 y cerca de los 17.000 m^2 mostrando su pico en los 1990's y una ligera tendencia a la disminución en las décadas subsiguientes. Las coberturas artificializadas, de manera distinta, mostraron una tendencia al aumento de área durante todo el período, iniciando en algo más de 4.900 m^2 y terminando por encima de los 8.450 m^2, sin dejar de lado una ligera disminución hacia los 2000's, pero siendo muy notorio su incremento de área superior a 72,24% al final de las casi cuatro décadas analizadas.

El perímetro promedio se comportó de manera fluctuante a lo largo de los cuatro períodos para los dos tipos de coberturas, siendo muy notorios los picos presentados en los 1990's y denotando que de manera general tendieron a aumentar (Tabla 6).

El índice de forma y la dimensión fractal calculados se comportaron de manera distinta, siendo el *IF* el que más variaciones presentó a lo largo del tiempo, manifestando su pico máximo en el período 1990-1999 para ambos tipos de cobertura teniendo como punto a destacar que registraron el mismo valor tanto al inicio como al final del período observado, lo que indica que a pequeña escala se están dando muchos cambios en la complejidad de los fragmentos de los dos tipos de cobertura, aunque la *DF*, al registrar valores similares, sugiere el mantenimiento de la complejidad paisajística a gran escala a lo largo del tiempo (Tabla 6).

Oferta Hídrica (Objetivo Específico 2)

Para el desarrollo de este apartado, los datos de precipitación, evapotranspiración real, escorrentía, índice de aridez y producción mensual de agua fueron sometidos a prueba de comparación de medias [Kruskal-Wallis] previa comprobación de supuestos, arrojando la no existencia de diferencias estadísticamente significativas entre períodos para ninguna de las variables mencionadas ($P>0,05$).

A continuación, se presentan en orden cronológico el análisis del balance hídrico para cada uno de los períodos de tiempo tenidos en cuenta para el presente estudio:

Balance Hídrico Superficial 1980-1989

La precipitación en la cuenca del río Gran Sevilla durante los 1980's tuvo un total anual promedio de 1.568,6 mm/año con un máximo de 2.018,95 mm/año registrado al sur de la zona central de la cuenca y un mínimo de 997,92 mm/año en la

desembocadura (Figura 4); a nivel mensual tuvo una media de 130,72 mm/mes y su comportamiento mostró un patrón bimodal con dos picos, el primero en mayo con 209,82 mm/mes, el segundo en octubre con 289,51 mm/mes, y un mínimo de 10,56 mm/mes en enero (Figura 7).

La evapotranspiración real en el período 1980-1989 mostró valores medios totales interanuales entre los 748,89 mm/año y los 1.002,18 mm/año, con una media de 874,8 mm/año, dándose el registro mínimos en el sector de mayor altitud de la cuenca, es decir, en el extremo este (Figura 5); mensualmente tuvo una media mensual interanual de 72,9 mm/mes, moviéndose entre los 9,87 mm/mes en enero y los 111,53 mm/mes en septiembre, siendo este último uno de los picos bimodales en conjunto a otro en mayo con 107,73 mm/mes (Figura 7).

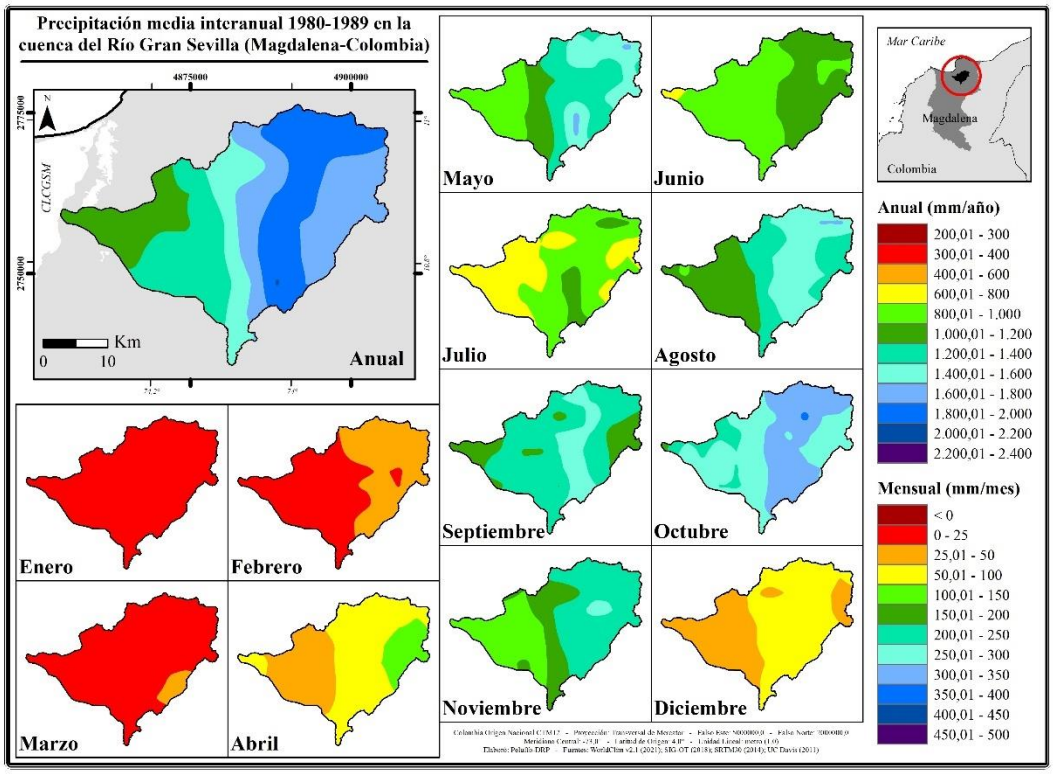

Figura 4. Distribución espacial de la precipitación media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-1989.

La escorrentía anual para los 1980's tuvo una media de 693,21 mm/año, con una media máxima de 1.074,61 mm/año en los sectores más altos y una media mínima de 246,81 mm/año en las partes bajas de la cuenca (Figura 6); la media mensual interanual presentó una media de 57,77 mm/mes, comportándose en un patrón bimodal coincidente con los eventos de precipitación siendo sus picos mensuales fueron en mayo y octubre con valores de 101,95 mm/mes y 180,39 mm/mes respectivamente, registrando un mínimo de 0,16 mm/mes en marzo (Figura 7).

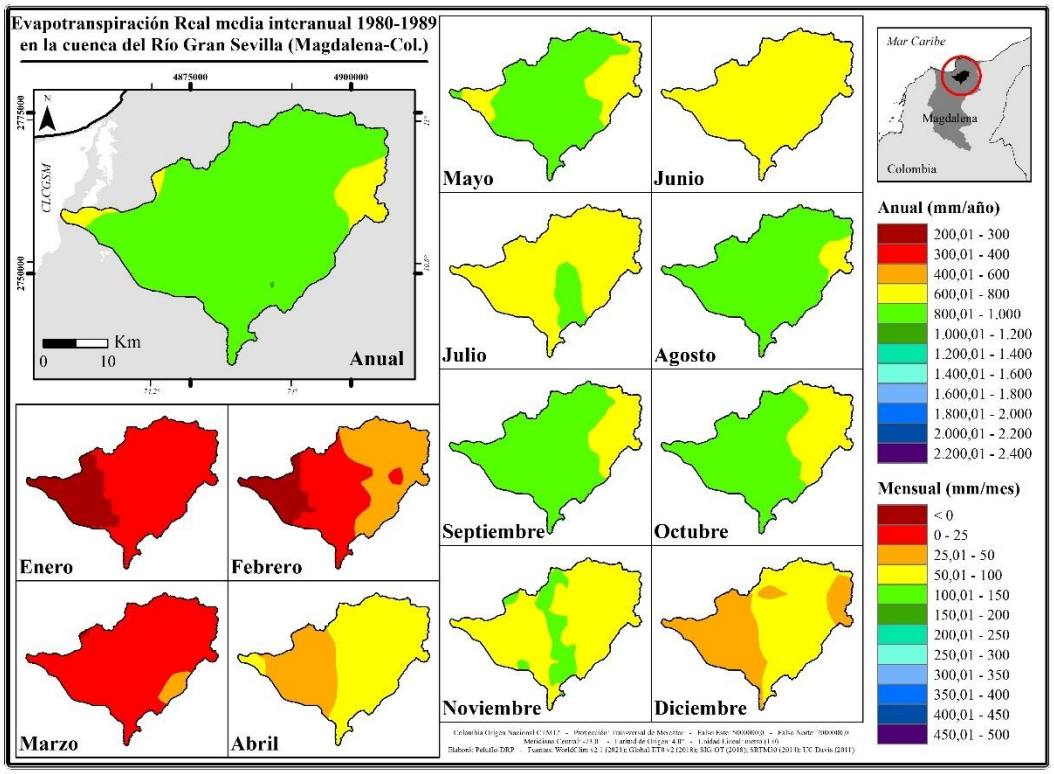

Figura 5. Distribución espacial de la evapotranspiración real media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-1989.

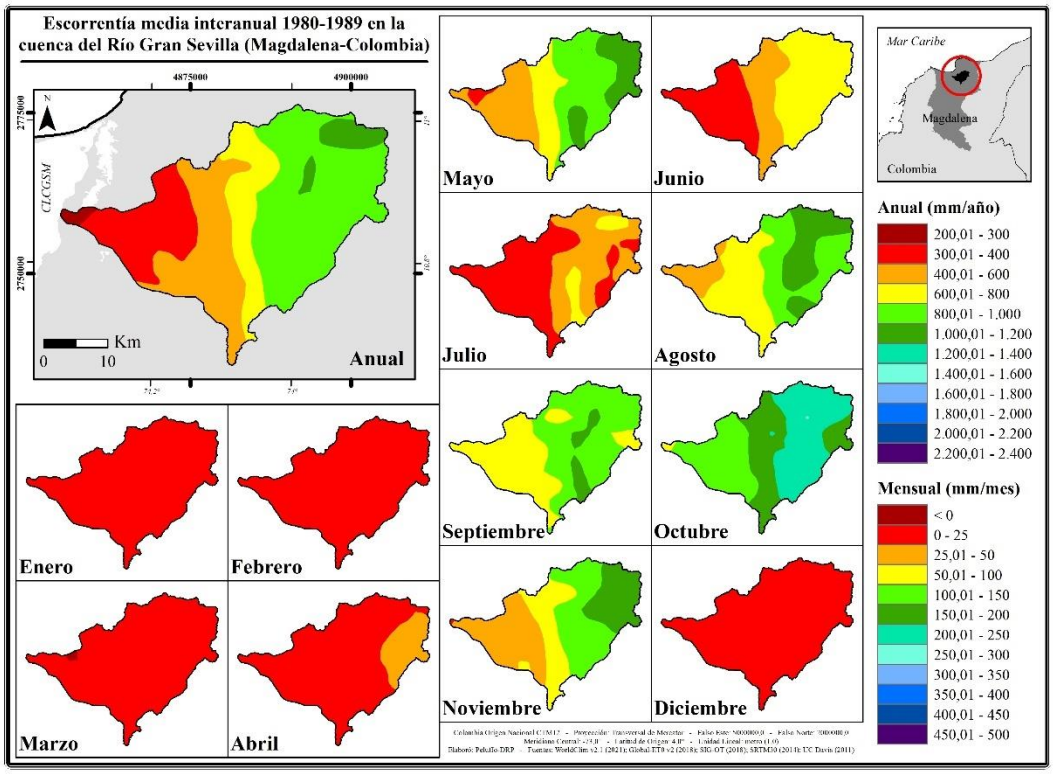

Figura 6. Distribución espacial de la escorrentía media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-1989.

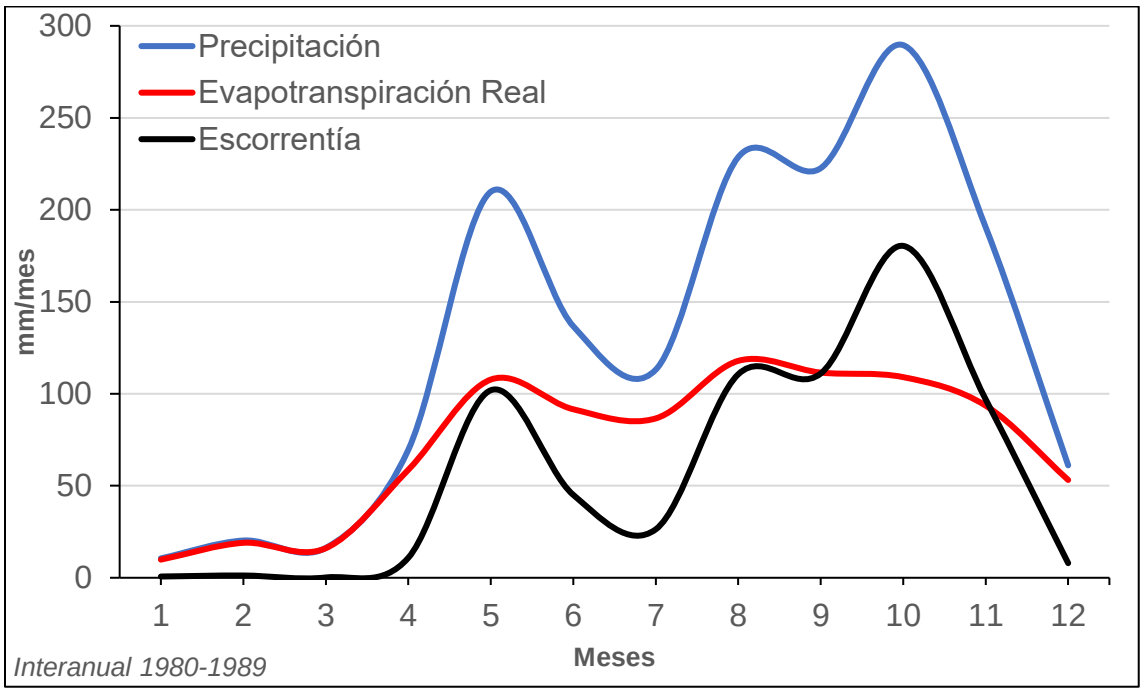

Figura 7. Precipitación, evapotranspiración real y escorrentía media mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-1989.
Meses: 1-enero, 12-diciembre.

Balance Hídrico Superficial 1990-1999

En los 1990's, la precipitación tuvo una media interanual de 1.866,11 mm/año con un valor medio máximo de 2.381,9 mm/año hacia la región noreste y el centro-sur de la cuenca, y una media mínima de 1.210,43 mm/año en la zona de la desembocadura (Figura 8); mensualmente sus valores fluctuaron entre los 4,11 mm/mes en enero y los 311,42 mm/mes en octubre, siendo éste el último pico bimodal, presentándose el primero en junio con 213,15 mm/mes, y siendo registrada una media mensual interanual de 155,51 mm/mes (Figura 11).

La evapotranspiración real en el período 1990-1999 exhibió una media interanual de 941,27 mm/año, un máximo de 1.071,03 mm/año en el sector central de la cuenca y 785,5 mm/año en su extremo este, zona con mayor altitud (Figura 9); mensualmente esta variable mostró dos picos, uno en mayo con 110,73 mm/mes y otro en septiembre con 119,86 mm/mes, con una mínima de 3,38 mm/mes en enero y una media mensual interanual de 78,44 mm/mes (Figura 11).

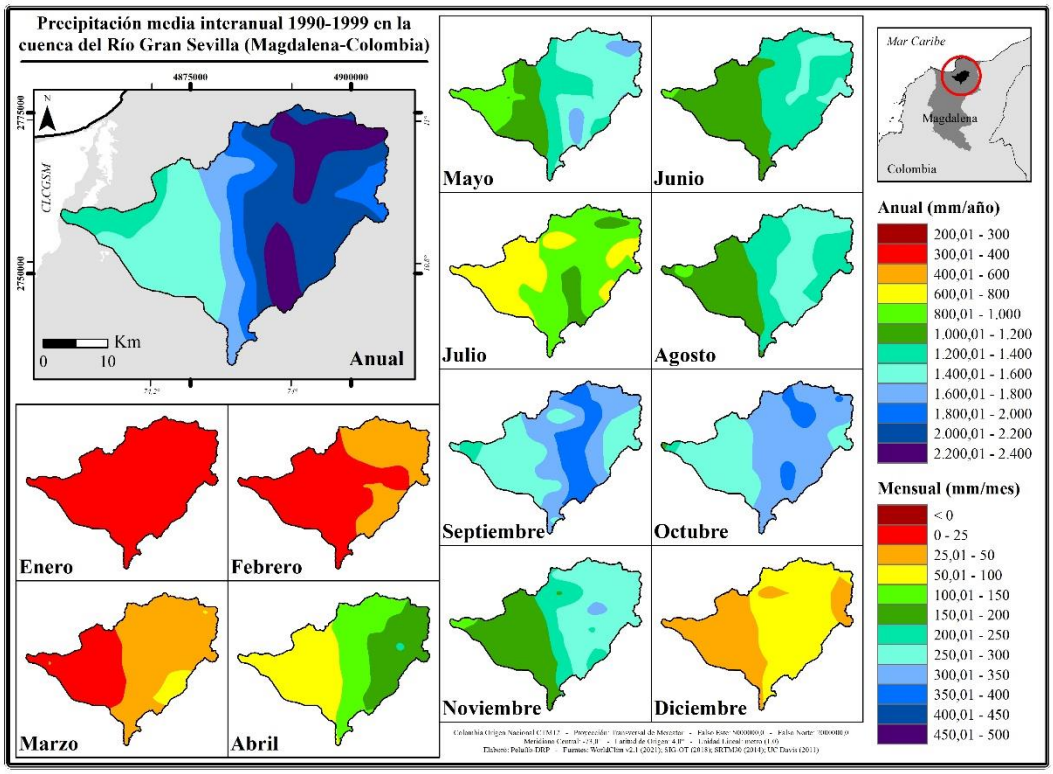

Figura 8. Distribución espacial de la precipitación media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1990-1999.

La escorrentía media interanual en la década de los 1990's presentó un valor promedio de 924,02 mm/año con un máximo de 1.390,32 mm/año en la franja de las zona media-alta y un mínimo de 360,67 mm/año en la desembocadura de la cuenca (Figura 10); el promedio mensual interanual fue de 77 mm/mes y el mínimo 0,73 mm/mes en enero, con un comportamiento similar al de la precipitación en el que se presentaron dos picos en mayo y octubre con 1117,39 mm/mes y 201,15 mm/mes respectivamente (Figura 11).

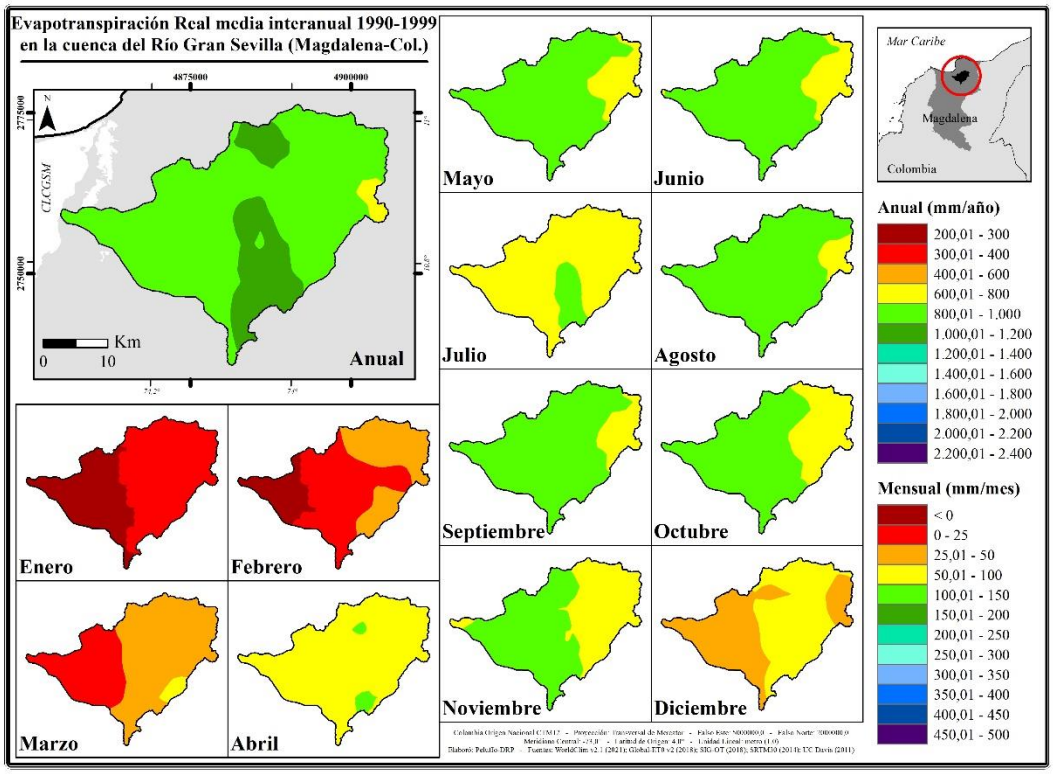

Figura 9. Distribución espacial de la evapotranspiración real media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1990-1999.

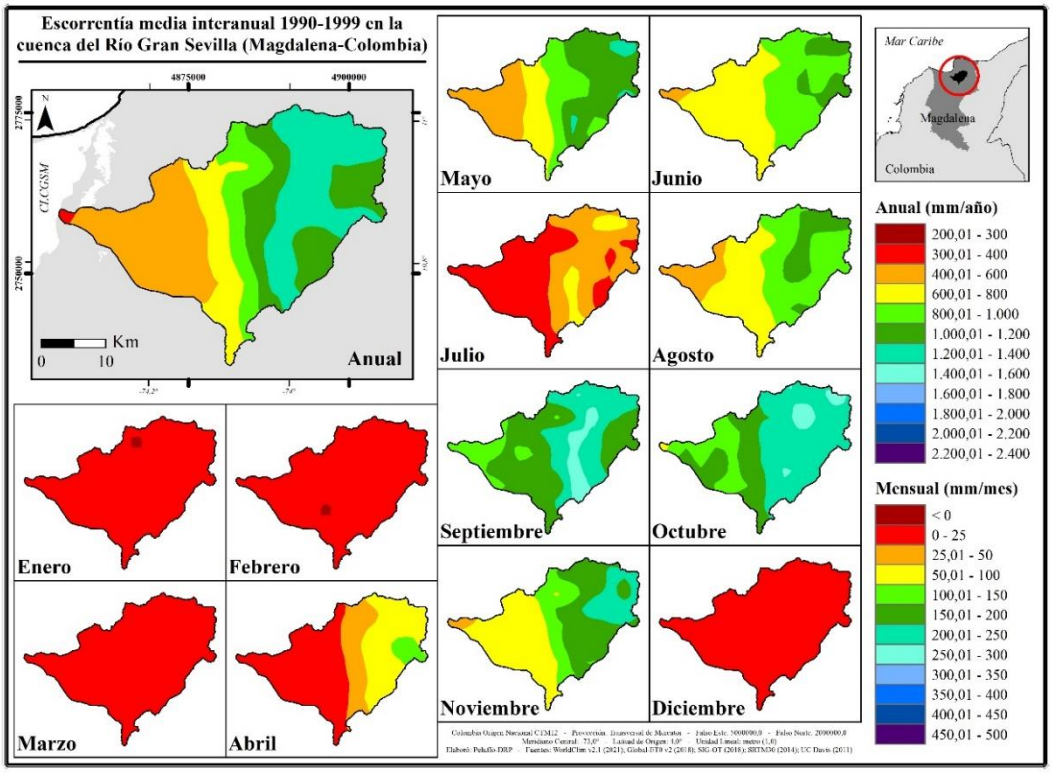

Figura 10. Distribución espacial de la escorrentía media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1990-1999.

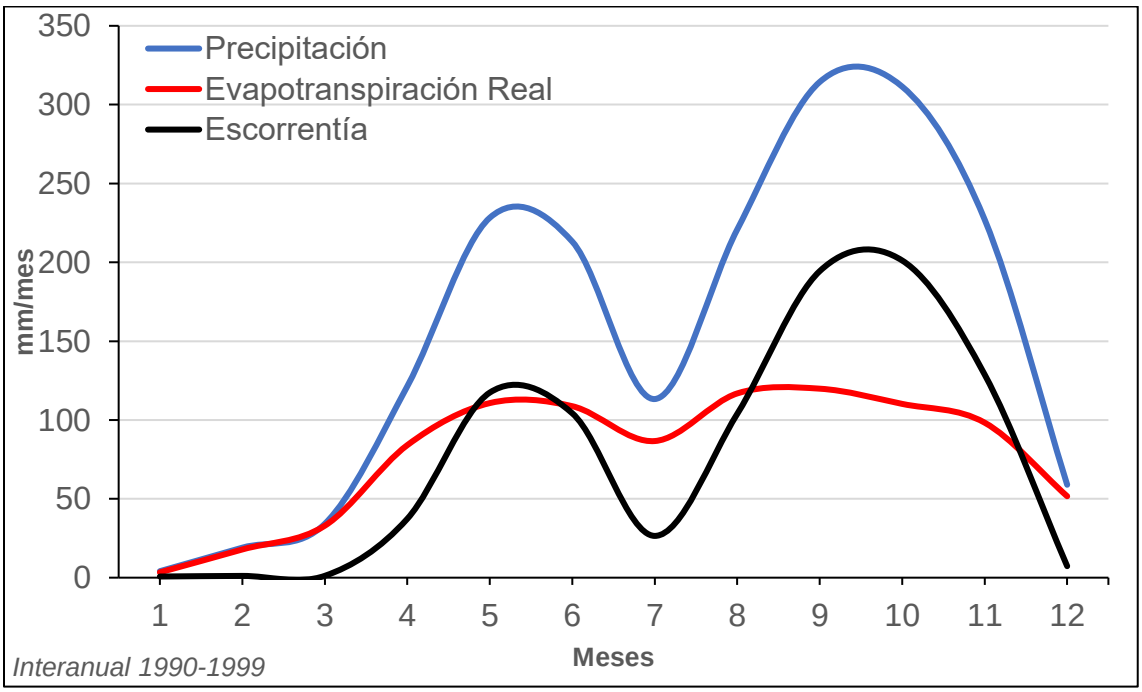

Figura 11. Precipitación, evapotranspiración real y escorrentía media mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1990-1999.
Meses: 1-enero, 12-diciembre.

Balance Hídrico Superficial 2000-2009

La década de los 2000's presentó una precipitación media interanual de 1.524,92 mm/año, una mínima de 974,97mm/año en la cuenca baja y una máximo de 1.988,83 mm/año al norte de la zona alta y al sur del sector medio de la cuenca (Figura 12); la precipitaciones media mensual interanual en éste período tomó un valor de 127,08 mm/mes con una media de 8,96 mm/mes en enero y tres picos importantes, el primero en junio con 191,67 mm/mes, el segundo en agosto con un registro de 242,28 mm/mes y el último en octubre con un valor de 239,59 mm/mes (Figura 15).

Para el período 2000-2009, la evapotranspiración real tuvo una media interanual de 861,33 mm/mes, moviéndose espacialmente desde los 731,31 mm/mes, registrados en el extremo este, hasta los 982,94 mm/mes al sur de la región central (Figura 13); a nivel mensual la media interanual fue de 71,78 mm/mes y la mínima 8,36 mm/mes en enero, igual que ocurrió con la precipitación se presentaron tres picos en junio, agosto y octubre, con 104,81 mm/mes, 120,14 mm/mes, y 105,81 mm/mes respectivamente (Figura 15).

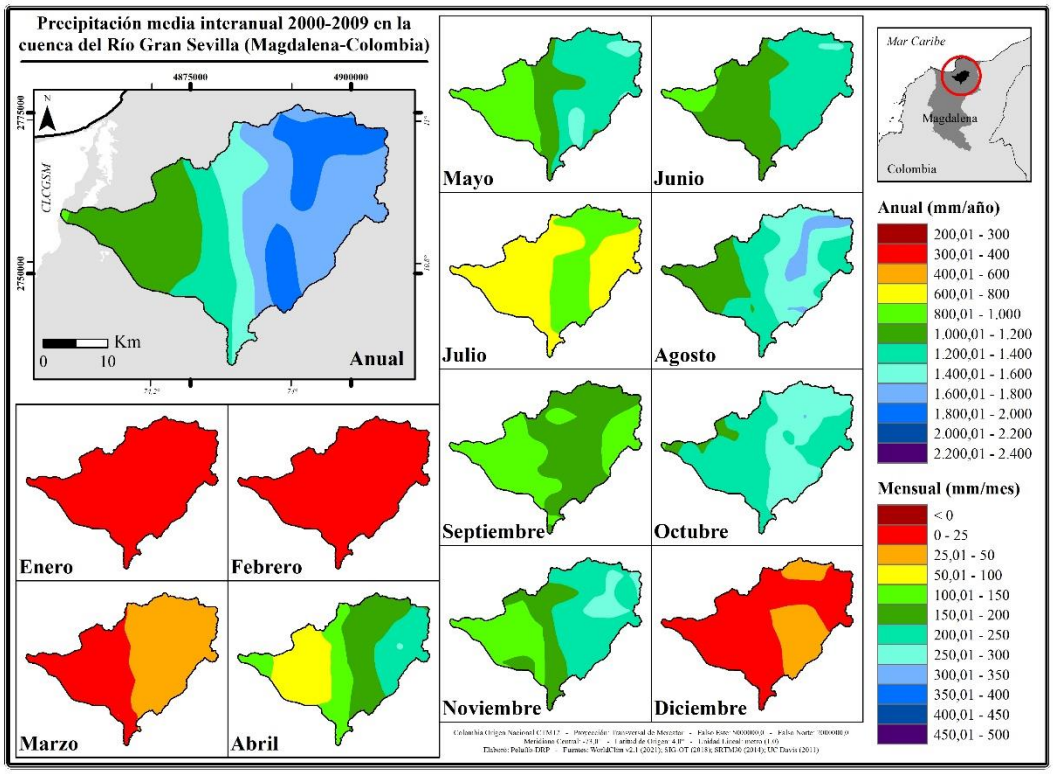

Figura 12. Distribución espacial de la precipitación media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2000-2009.

La escorrentía media interanual en la cuenca para la década de los 2000's presentó un valor de 662,91 mm/año, un máximo de 1.083,26 mm/año en el sector con mayor altitud (extremo este) y un mínimo de 662,91 mm/año en la desembocadura (Figura 14); mensualmente el promedio interanual fue de 55,24 mm/mes una media mínima de 0,18 mm/mes en diciembre y tres picos destacables, el primero en junio con 86,72 mm/mes el segundo en agosto con 122 mm/mes y el tercero en octubre con 134,3 mm/mes (Figura 15).

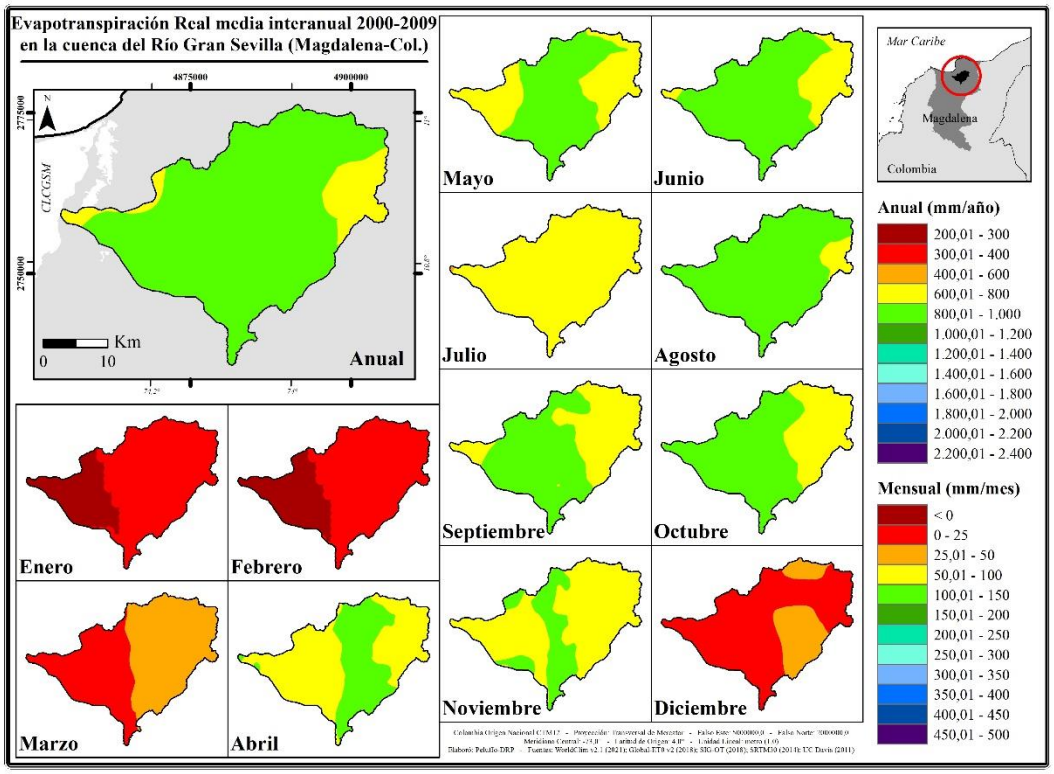

Figura 13. Distribución espacial de la evapotranspiración real media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2000-2009.

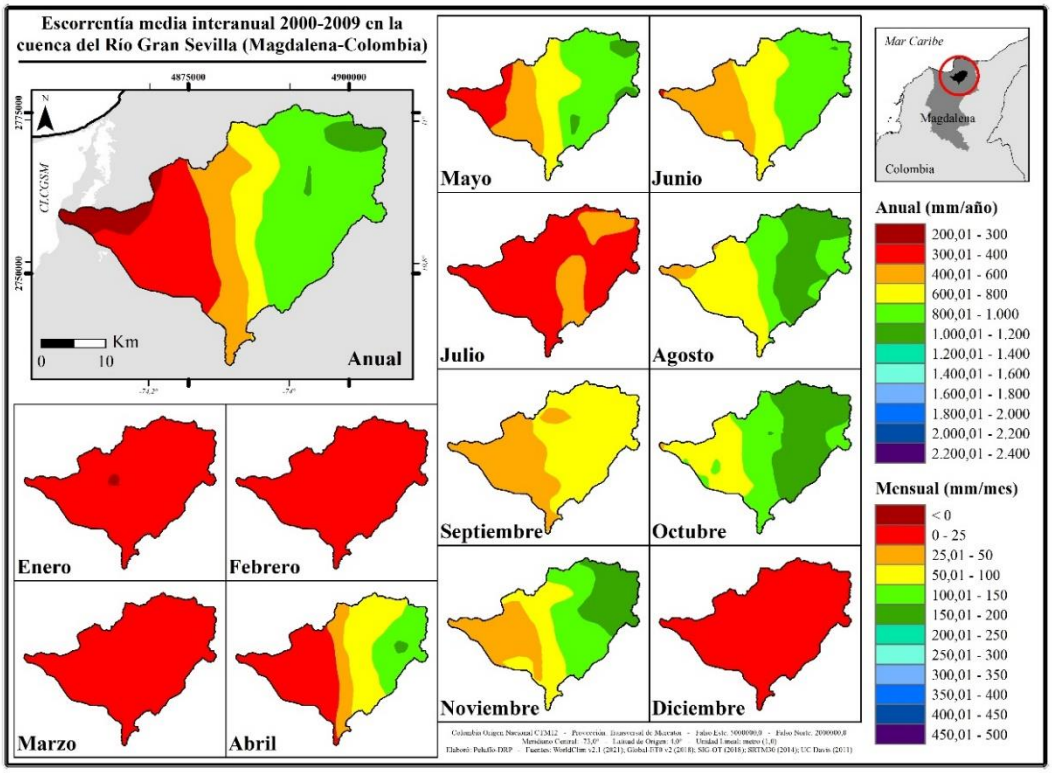

Figura 14. Distribución espacial de la escorrentía media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2000-2009.

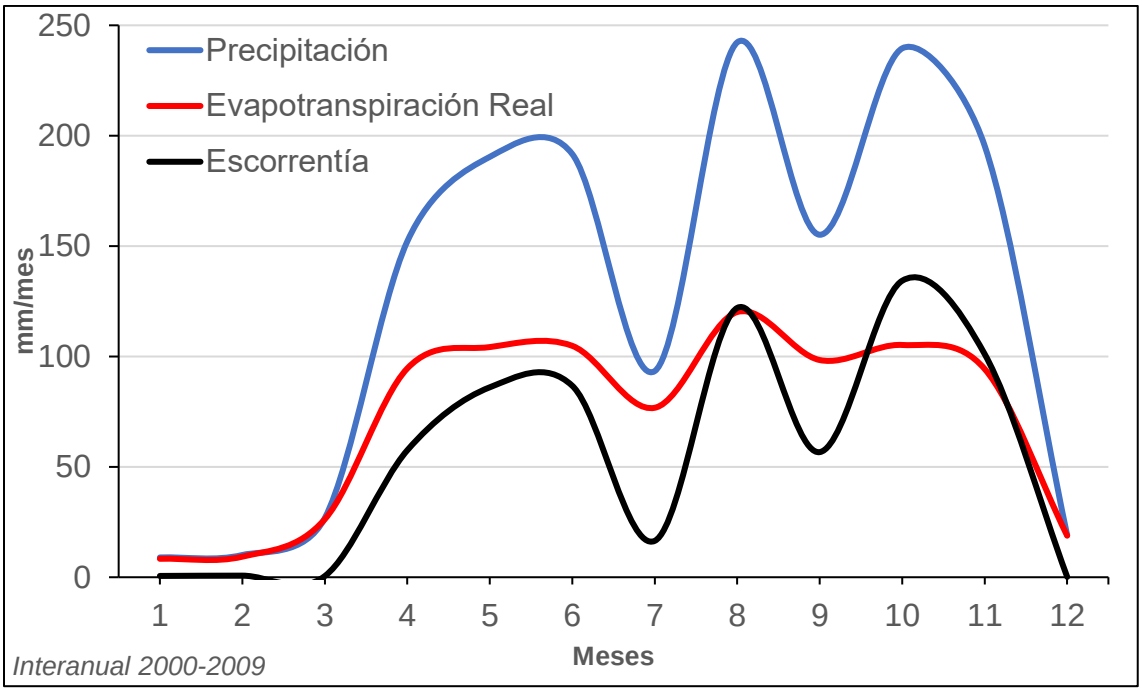

Figura 15. Precipitación, evapotranspiración real y escorrentía media mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2000-2009.
Meses: 1-enero, 12-diciembre.

Balance Hídrico Superficial 2010-2018

La precipitación total media interanual del período 2010-2018 presentó un valor promedio de 1380,72 mm/año, con un mínimo de 884,93 mm/año registrado hacia el extremo oeste y un valor máximo de 1794,32 mm/año al noreste de la cuenca alta (Figura 16); mientras a nivel mensual destaca una fluctuación bimodal caracterizada por una media de 115,06 mm/mes una mínima en marzo de 4,18 mm/mes y dos importantes repuntes, el menor en mayo con 213,43 mm/mes y el mayor en octubre con 354,68 mm/mes (Figura 19).

La evapotranspiración real total media interanual en el período 2010-2018 fue de 774,88 mm/año como valor promedio, mientras su mínimo de 665,15 mm/año se presentó en el sector más alto de la cuenca y su máximo de 886,19 mm/año en la cunca media, específicamente al sur (Figura 17); vista mensualmente, la

evapotranspiración real mostró dos picos de 108,06 mm/mes y 112,04 mm/mes en mayo y octubre respectivamente (Figura 19).

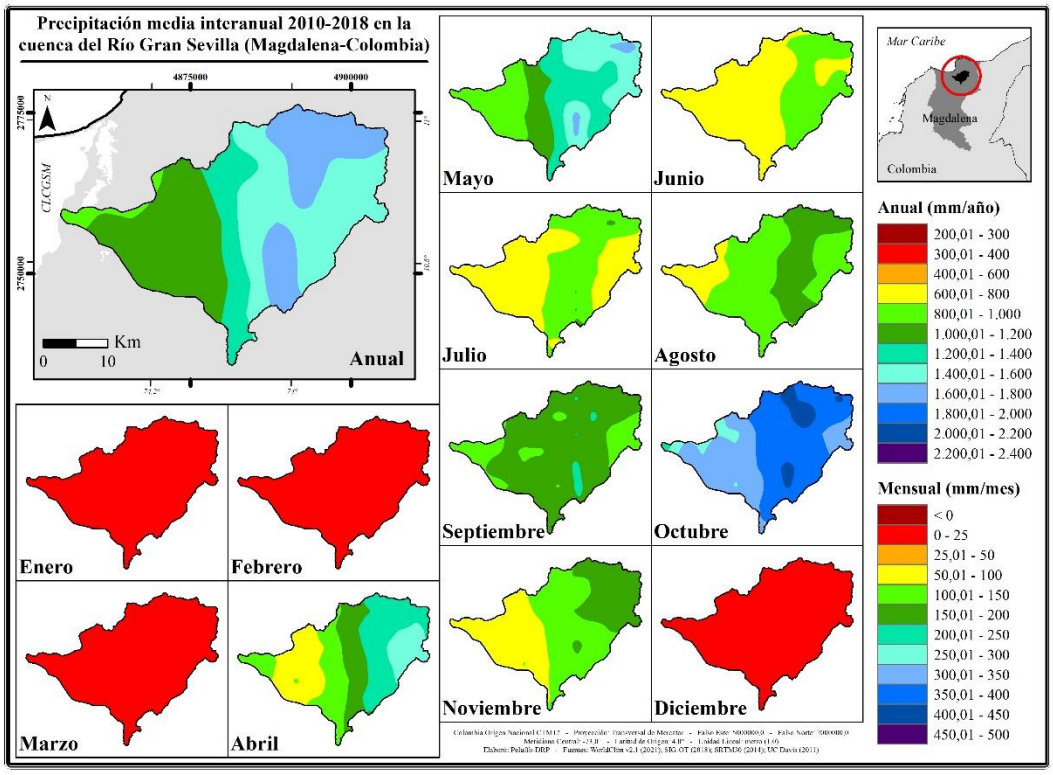

Figura 16. Distribución espacial de la precipitación media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2010-2018.

La escorrentía total media interanual para el período 2010-2018 tuvo un valor promedio de 605,24 mm/año, un máximo de 970,3 mm/año presentado en el extremo este y una mínima de 212,59 mm/año registrado en la desembocadura (Figura 18); mensualmente se dio un valor medio interanuales de 50,44 mm/mes y un mínimo de 0,03 mm/mes en diciembre, teniendo un comportamiento bimodal similar al de la precipitación con dos picos destacables, el primero en mayo con una media de 105,22 mm/mes el segundo en octubre con una media de 242,57 mm/mes (Figura 19).

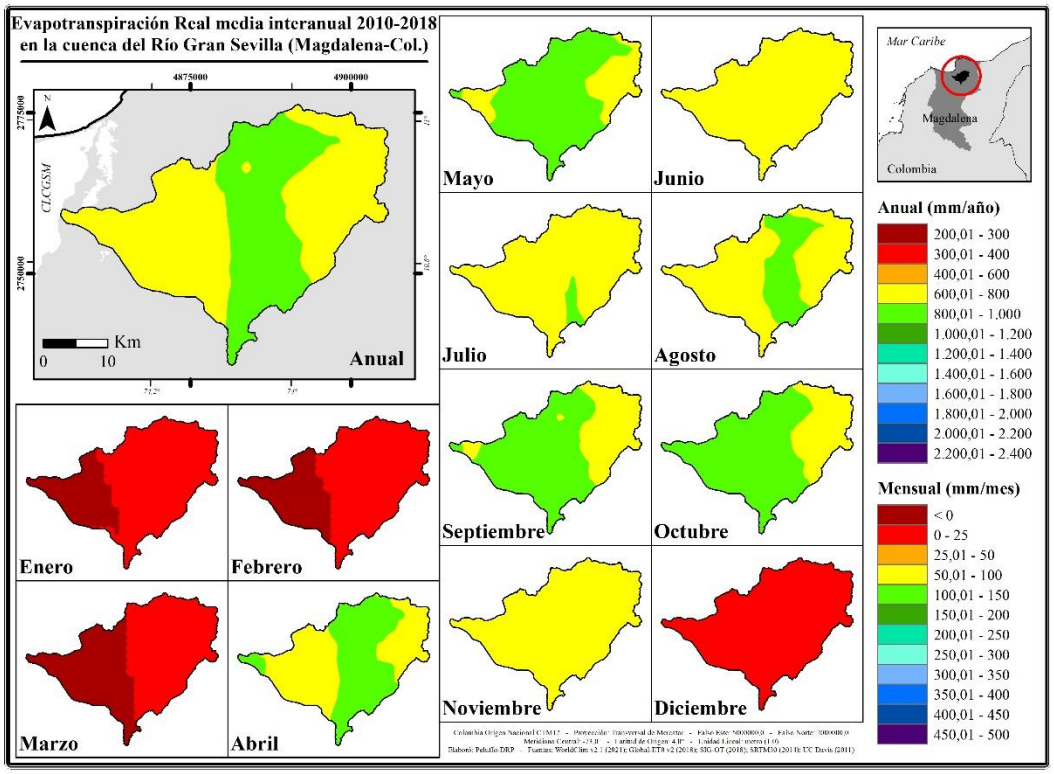

Figura 17. Distribución espacial de la evapotranspiración real media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2010-2018.

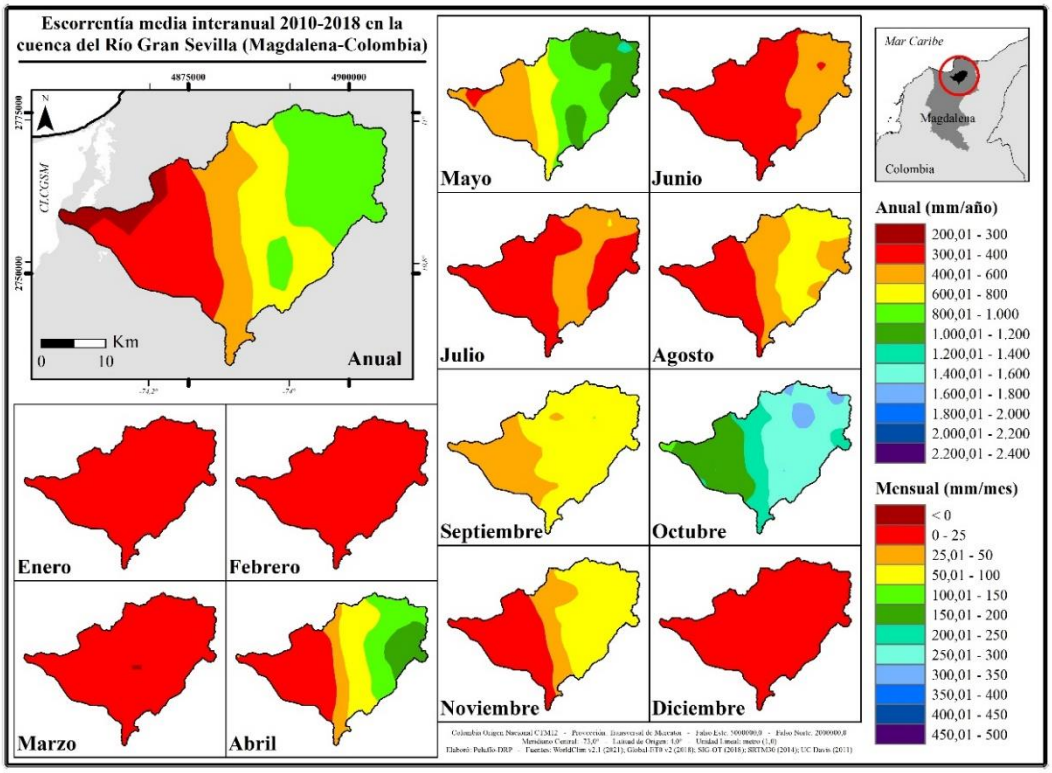

Figura 18. Distribución espacial de la escorrentía media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2010-2018.

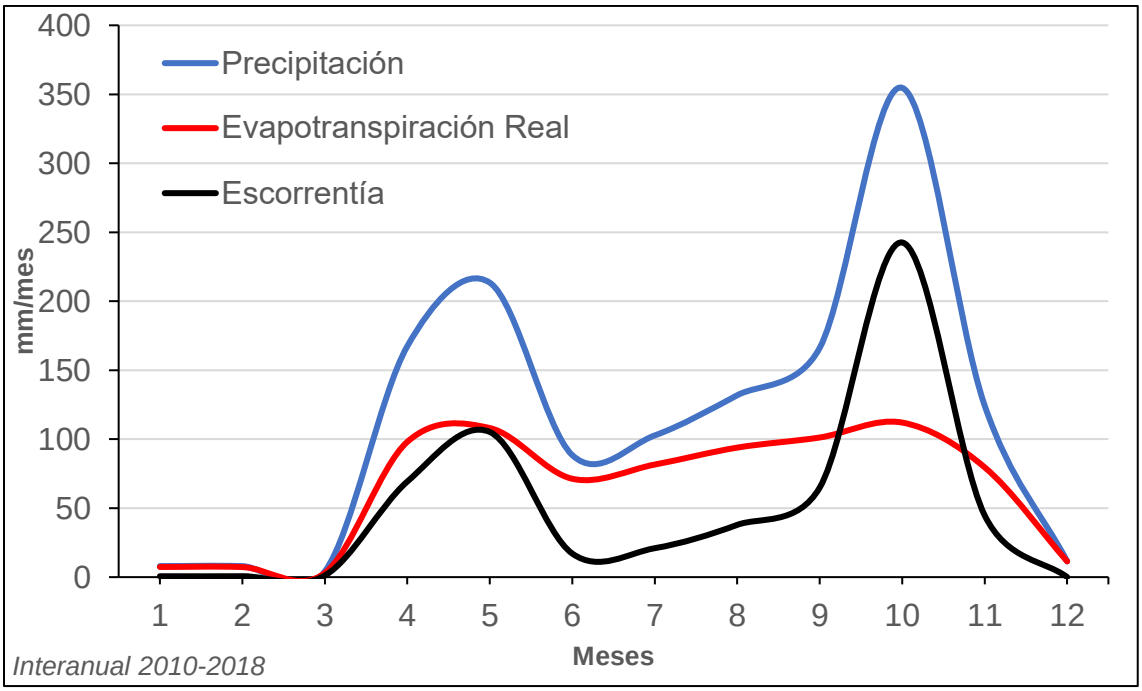

Figura 19. Precipitación, evapotranspiración real y escorrentía media mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2010-2018.
Meses: 1-enero, 12-diciembre.

Índice de Aridez

El índice de aridez en la cuenca del río Gran Sevilla a nivel interanual se movió entre 0,28 y 0,38 (Tabla 7) lo que apunta a que por lo general presenta niveles moderados o normales de precipitación para el mantenimiento de los ecosistemas que ocurren en su interior, aunque en determinados periodos [1990-1999] mostró excedentes de agua.

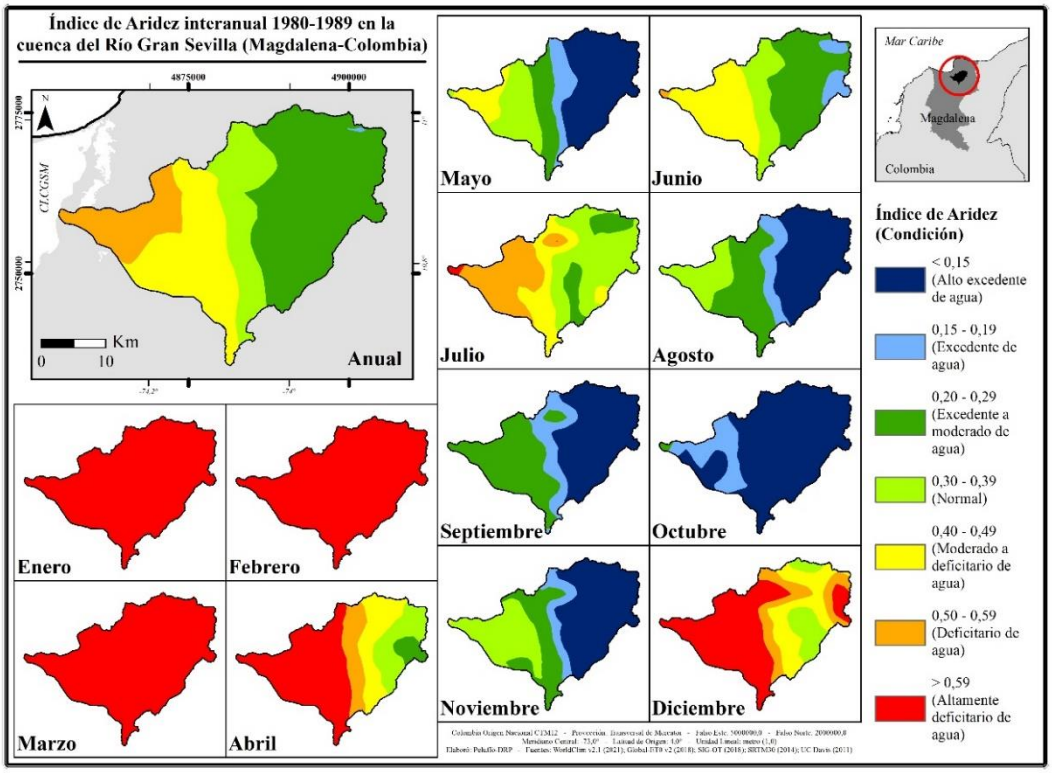

Figura 20. Distribución espacial de la aridez media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-1989.

En la década de los 1980's la aridez media fue de 0,34 (Tabla 7); la máxima de 0,55 y la mínima fue de 0,19; presentándose los mayores valores en la porción más baja de la cuenca y los menores a mayor altitud (Figura 20).

Tabla 7. Índice de aridez para la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018.

Período	**Precipitación** *(mm/año)*	**Oferta** *(Mm³/año)*	**Índice de Aridez**		
			IA	*Color*	*Descripción*
1980-1989	1568,70	675,38	0,34		Moderado
1990-1999	1866,11	900,26	0,28		Moderado y excedentes de agua
2000-2009	1524,92	645,86	0,35		Moderado
2010-2018	1380,72	589,67	0,38		Moderado

Fuente: Clasificación del IA y coloraciones (IDEAM, 2010a).

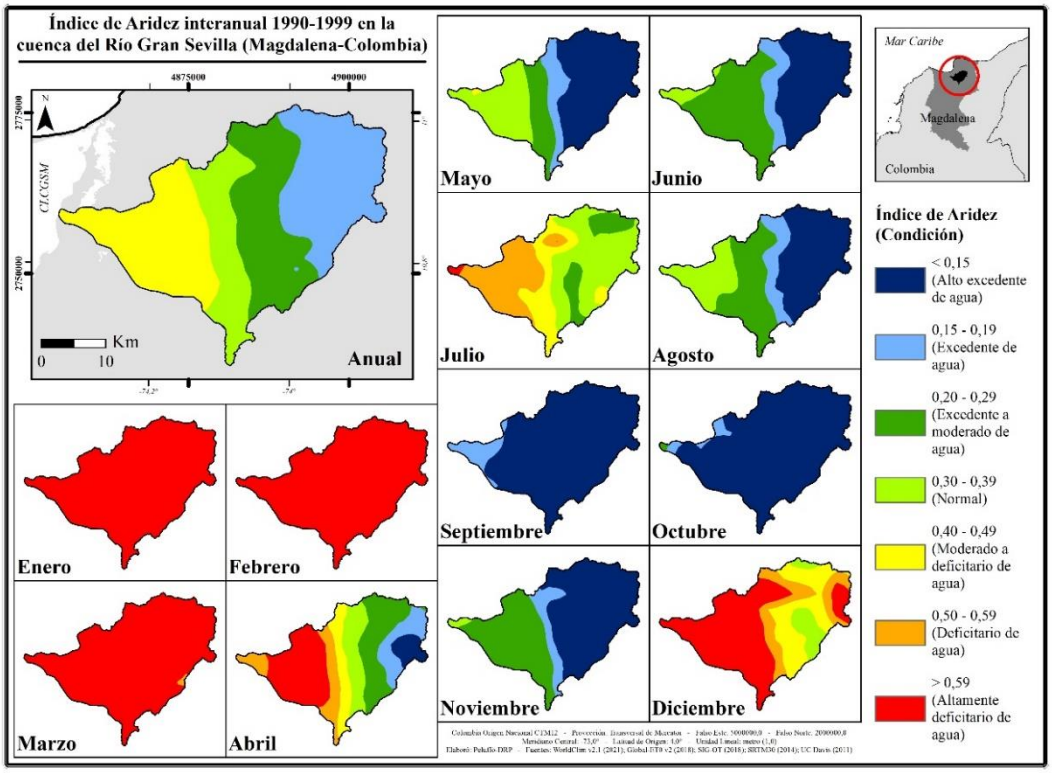

Figura 21. Distribución espacial de la aridez media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1990-1999.

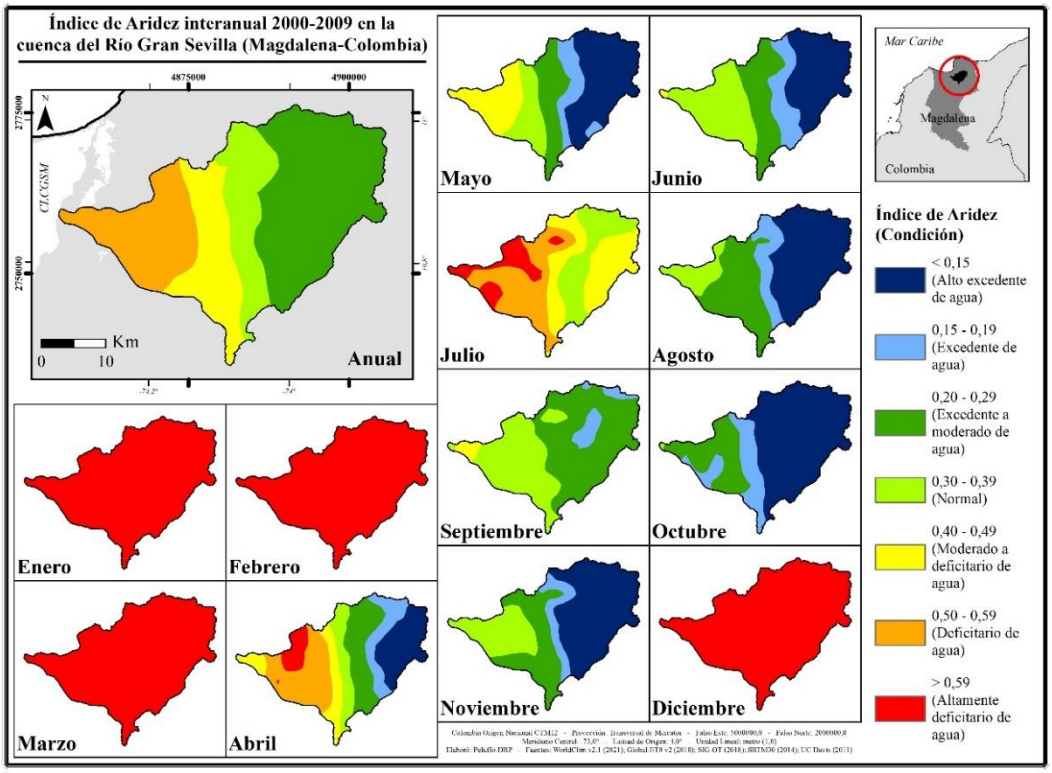

Figura 22. Distribución espacial de la aridez media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2000-2009.

El período 1990-1999 a nivel interanual destacó al registrar los menores valores del índice de aridez, con una media de 0,28 (Tabla 7); un máximo de 0,48 y un mínimo de 0,15 siendo espacialmente similar al de la década anterior con registros menores a mayor altitud y viceversa, patrón que se cumple en todos los períodos analizados (Figura 21).

En la década de los 2000's el índice de aridez registró una media interanual de 0,35 (Tabla 7); una máxima de 0,56 hacia el oeste y un valor mínimo de 0,19 registrado hacia el este (Figura 22).

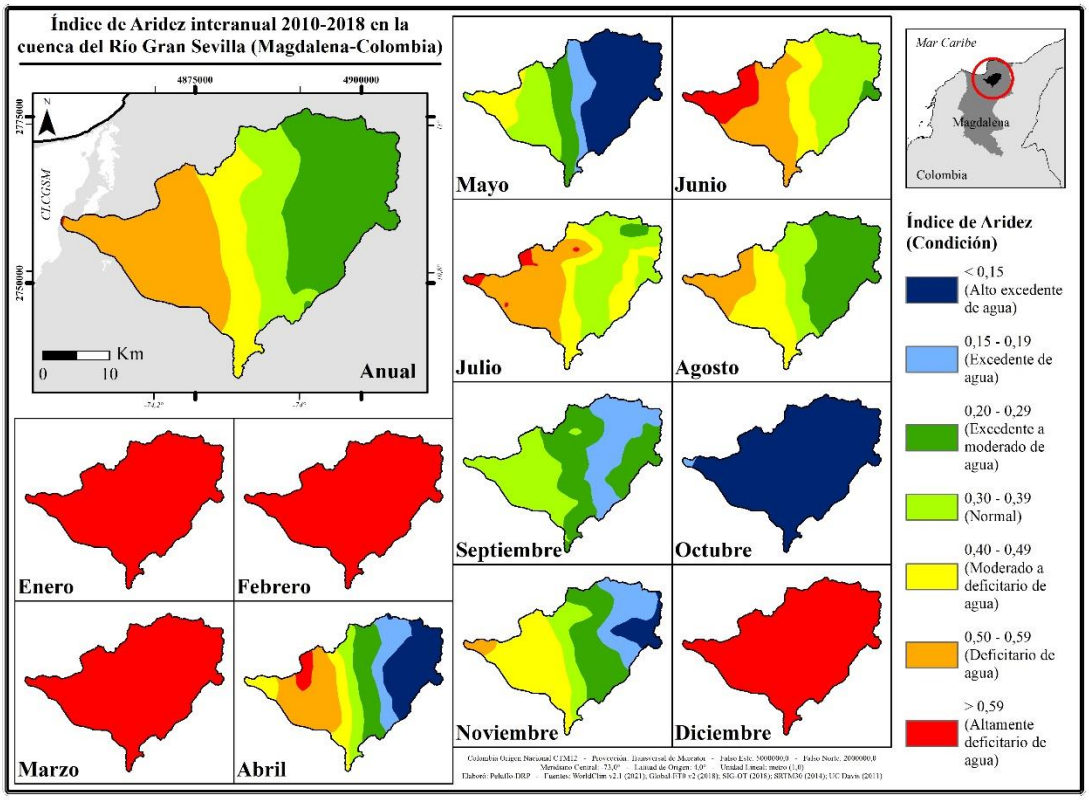

Figura 23. Distribución espacial de la aridez media anual y mensual interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2010-2018.

Para el período 2010-2018 la aridez registró un índice medio interanual de 0,38 (Tabla 7); el mínimo fue de 0,22 en zonas altas y el máximo de 0,59 en el sector más bajo de la cuenca (Figura 23).

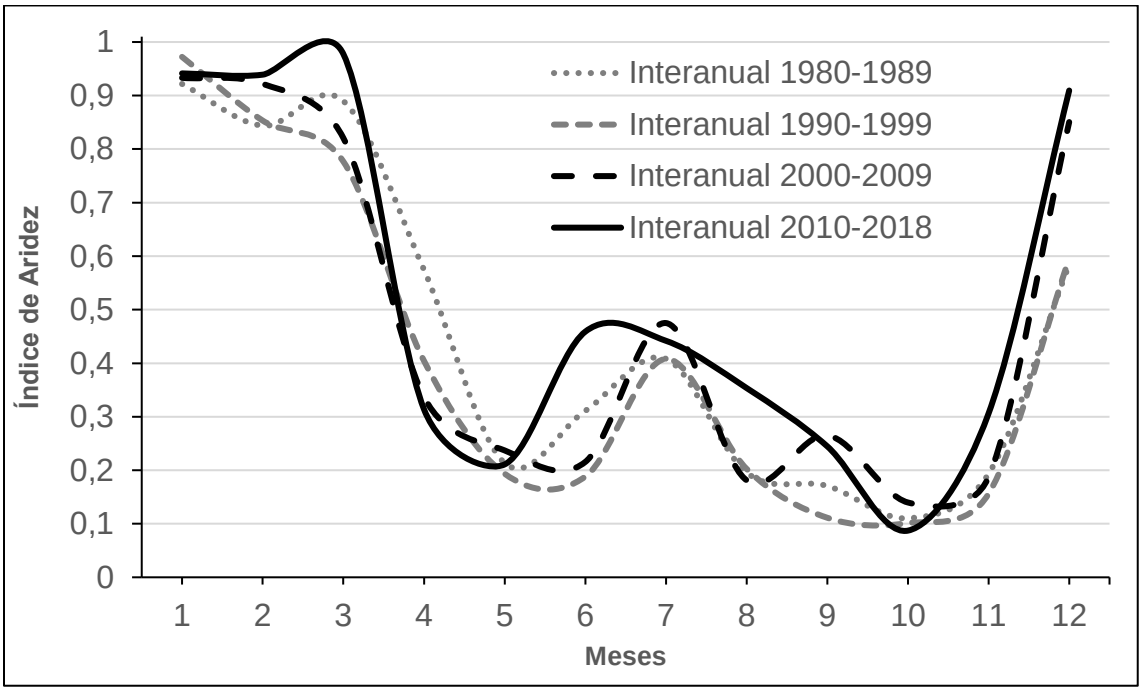

Figura 24. Comportamiento del índice de aridez medio mensual interanual por décadas en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018.
Meses: 1-enero, 12-diciembre.

El IA no mostró diferencias en su comportamiento mensual, que en todos los casos fue contario a las fluctuaciones de la precipitación, siendo generalmente el mes de marzo el más deficitario, mientras el mes de octubre registró los mayores excedentes de agua (Figura 24) lo que espacialmente también puede verse en los mapas de las Figuras 19 a 22 en que se aprecia que en el período diciembre-marzo hay déficit de agua y de septiembre-noviembre se dan excedentes que en ocasiones incluyen al mes de agosto.

El índice de aridez a nivel interanual arrojó valores que indican una perceptible reducción entre los 1980's y los 1990's pero que caracterizan un aumento progresivo y sostenido a partir de éste período, lo que se traduce en que durante el lapso analizado la aridez aumentó respecto al inicio del ejercicio de estimación, pasando de 0,34 a 0,38 acercándose a niveles que apuntan a que se presentará

déficit hídrico dentro de la siguiente década si la tendencia se mantiene, pues se ha dado un aumento del 35,7% en su promedio interanual durante los últimos 28 años (Tabla 7).

Producción de Agua por Balance Hídrico Superficial

Si bien a nivel mensual no se registraron diferencias significativas en torno a la producción de agua en la cuenca del río Gran Sevilla (P>0,05); lo cual es comprensible dado el patrón generalmente bimodal de las precipitaciones que afectan los niveles de producción mensual (Figura 25); se aprecian cambios en la oferta total y el rendimiento hídrico interanual en cada uno de los períodos (Tabla 8).

Tabla 8. Oferta y rendimiento hídrico interanuales estimados para la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018 a partir de balance hídrico superficial.

Período	**Precipitación** *(mm/año)*	**Evapotranspiración Real** *(mm/año)*	**Escorrentía** *(mm/año)*	**Oferta hídrica** *(Millones de m³/año)*	**Rendimiento hídrico** *(L/s/Km²)*
1980-1989	1568,70	874,8	693,21	675,38	21,97
1990-1999	1866,11	941,27	924,02	900,26	29,28
2000-2009	1524,92	861,33	662,91	645,86	21,01
2010-2018	1380,72	774,88	605,24	589,67	19,18

En el primer período de análisis [1980-1989] se obtuvo una estimación total de 675,38 Mm^3/año, producción que se incrementa en más del 33% durante la siguiente década [1990-1999], pero que llega a un valor más bajo durante los 2000's con 645,86 Mm^3/año y continúa descendiendo durante el siguiente período [2010-2018] hasta los 589,67 Mm^3/año (Tabla 8), de este modo, si se tiene en cuenta el período total del análisis, se estima que la cuenca actualmente conserva un 87,31% de su capacidad para producir agua respecto de la década de los 1980's, o un 65,5% si se toma como punto de partida la década de los 1900's.

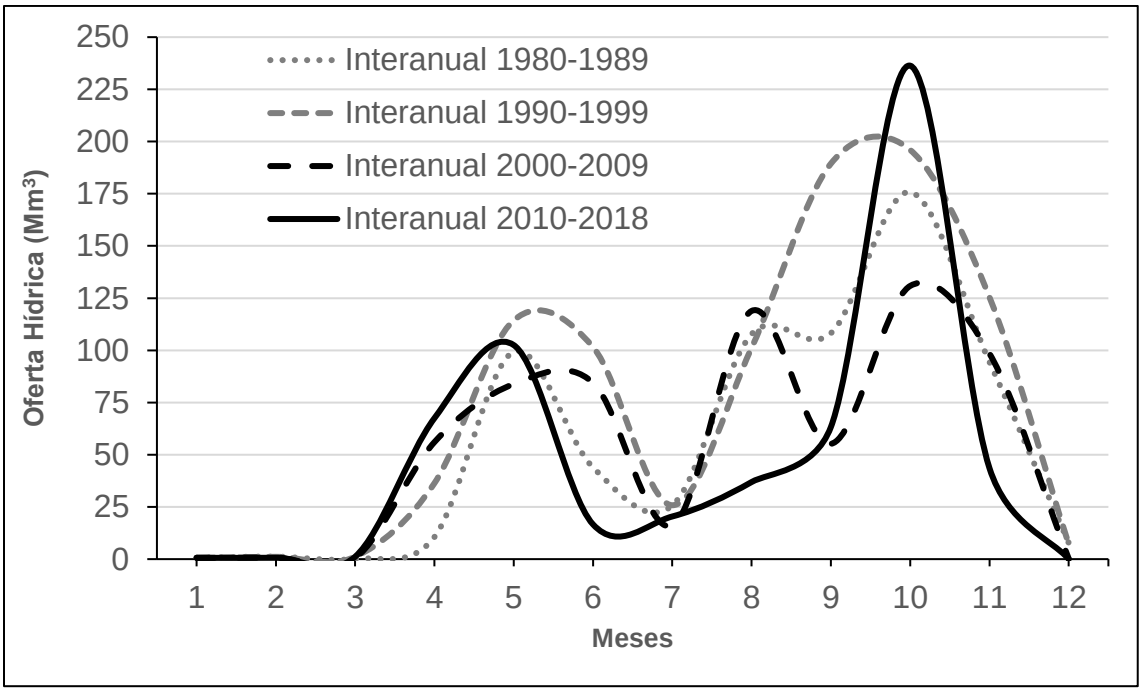

Figura 25. Comportamiento estimado de la oferta hídrica media mensual interanual decadal por balance hídrico superficial en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018.
Meses: 1-enero, 12-diciembre.

En la Figura 25 se puede observar el carácter bimodal de la producción de agua mensual interanual, con un pico máximo en el primer semestre que se presenta en mayo, con valores aproximados entre los 83 Mm^3/mes y los 115 Mm^3/mes, y durante el segundo semestre otro pico registrado en octubre que asume valores entre los 130 Mm^3/mes y 237 Mm^3/mes; siendo el período de menos producción el que va de diciembre a marzo.

Producción de Agua por Coeficiente de Escorrentía

El coeficiente de escorrentía ponderado multianual, calculado para cada década puede observarse en la Tabla 9, es apreciable el hecho de que las ligeras variaciones que manifiesta entre décadas tienen un impacto sustancial sobre las estimaciones de oferta hídrica, destacándose que en la primero y último período

analizado, la estimación es precisamente la misma, lo que apunta a que la mayor influencia en el régimen hidrológico de la cuenca lo tiene la precipitación.

Al considerar la distribución espacial, se puede observar que el coeficiente de escorrentía se mueve entre 0,1 y los 0,84 a lo largo de toda la cuenca, concentrándose los valores más altos en los lugares que circundan la falda de las montañas y los sectores por donde cursan las corrientes principales (Figura 26), mostrando variaciones importantes debidas a los cambios en las coberturas, puesto que el tipo de suelo y relieve no evolucionan en la misma escala temporal que las primeramente citadas.

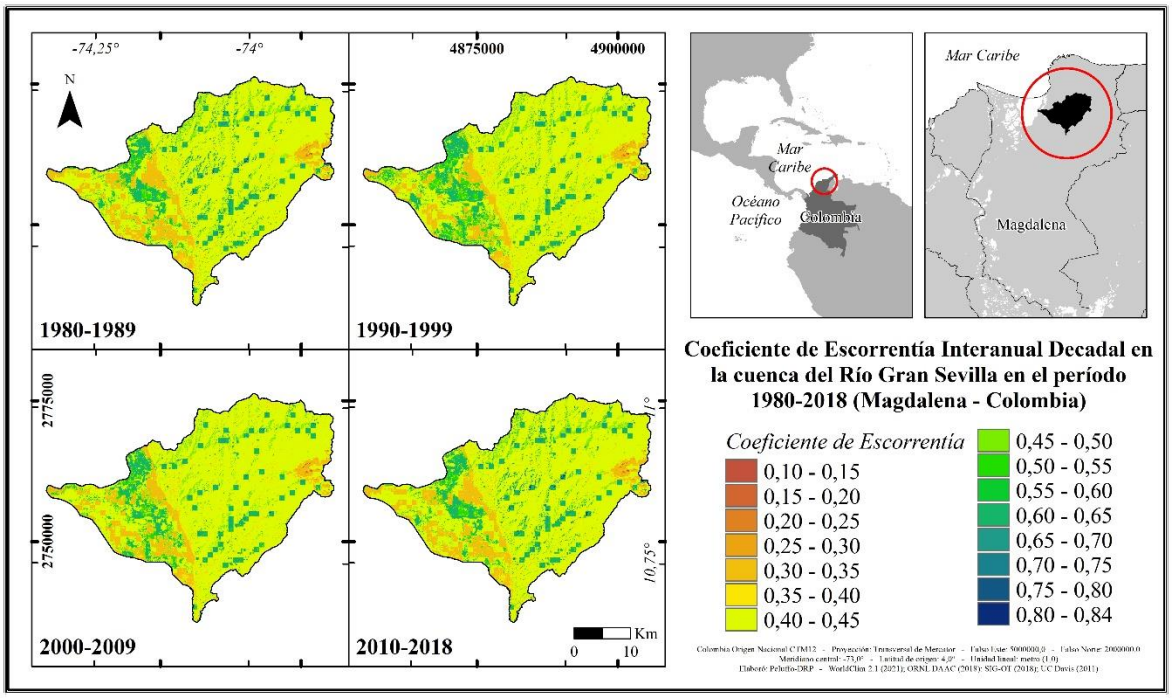

Figura 26. Distribución espacial decadal del coeficiente de escorrentía interanual en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018.

La oferta hídrica (Volumen medio escurrido) en la cuenca del río Gran Sevilla, mostró un patrón de aumento en entre la primera y segunda década analizadas [1980's a 1990's], pasando de los 658,37 Mm^3/año a los 789,6 Mm^3/año representando más del 19,9% de incremento entre un período y otro; a partir de la segunda década se hizo patente un notable decrecimiento en la producción de agua, pasando en los 2000's a 634,79 Mm^3/año y en el período 2010-2018

registrándose una caída aún más patente hasta los 579,48 Mm^3/año; estos hallazgos apuntan a que desde hace cuatro décadas se está presentando una disminución en su capacidad de producir agua, por lo que a la fecha representa un 88,02% de los volúmenes escurridos en los 1980's o un 73,39% si se considera realizar la estimación desde hace tres décadas hasta el presente (Tabla 9).

Tabla 9. Coeficiente de escorrentía ponderado, volumen medio escurrido y rendimiento hídrico decadales interanuales estimados para la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018 a partir del método racional.

Período	**Precipitación** *(mm/año)*	**Coeficiente de Escorrentía Ponderado**	**Oferta hídrica** [Volumen medio escurrido] *(Mm^3/año)*	**Rendimiento hídrico** *(L/s/Km^2)*
1980-1989	1568,70	0,43077030960113	658,37	21,41
1990-1999	1866,11	0,43429541768958	789,60	25,68
2000-2009	1524,92	0,42726737282659	634,79	20,65
2010-2018	1380,72	0,43077030960113	579,48	18,85

La oferta hídrica (Volumen medio escurrido) mensual interanual mostró un patrón de comportamiento coincidente con el régimen de precipitaciones en los cuatro períodos de tiempo analizados (Figura 27); registrando dos picos de importancia, el primero hacia mayo-junio con valores entre 79,3 Mm^3/mes y 96,3 Mm^3/mes; y un segundo pico de mayor producción en septiembre-octubre con valores entre 64,7 Mm^3/mes y 149,2 Mm^3/mes.

En el apartado espacial, se destacan dos zonas importantes, una hacia las zonas altas de la cuenca en que se dan los valores más altos de escurrimiento y un marcado cambio en la zona circundante de la falda montañosa a partir del cual ocurren los valores más bajos de producción hídrica (Figuras 27 a 30), lo que además de ser un efecto de la pendiente del terreno, obedece al efecto de la predominancia de las coberturas boscosas en las zonas altas y a la reiterada transformación paisajística en las partes bajas de la cuenca, en las que además de cultivos, y zonas pastosas, se aprecia una acentuada tendencia a la expansión de las áreas urbanas.

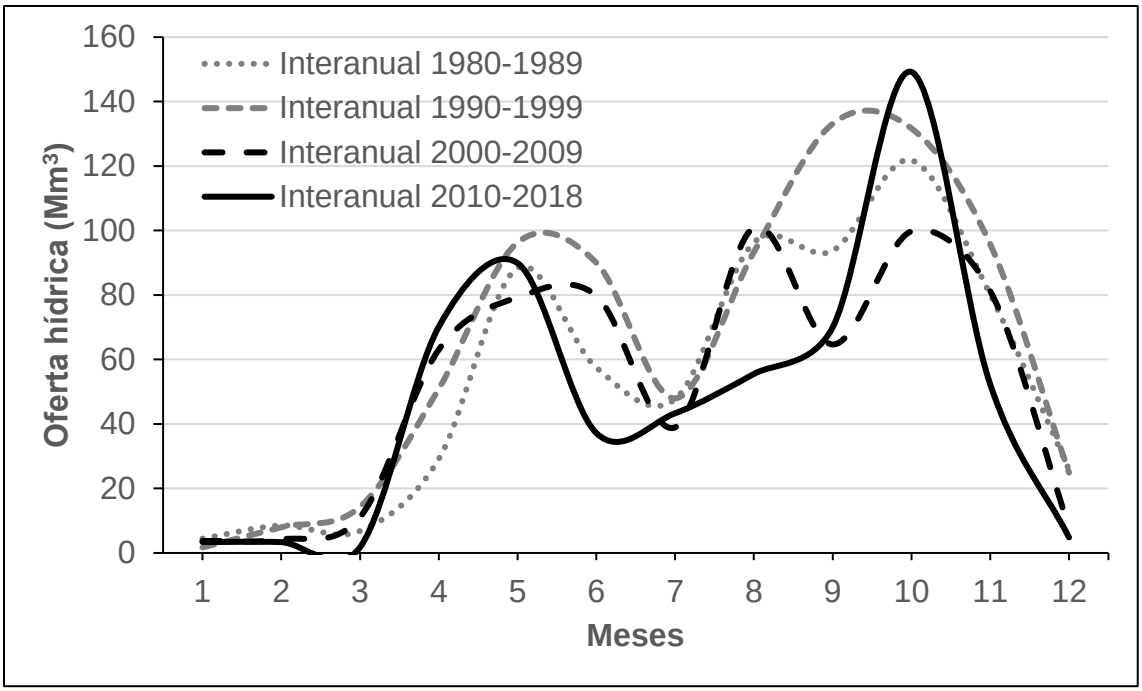

Figura 27. Comportamiento estimado de la oferta hídrica media mensual interanual decadal por método racional en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018.
Meses: 1-enero, 12-diciembre.

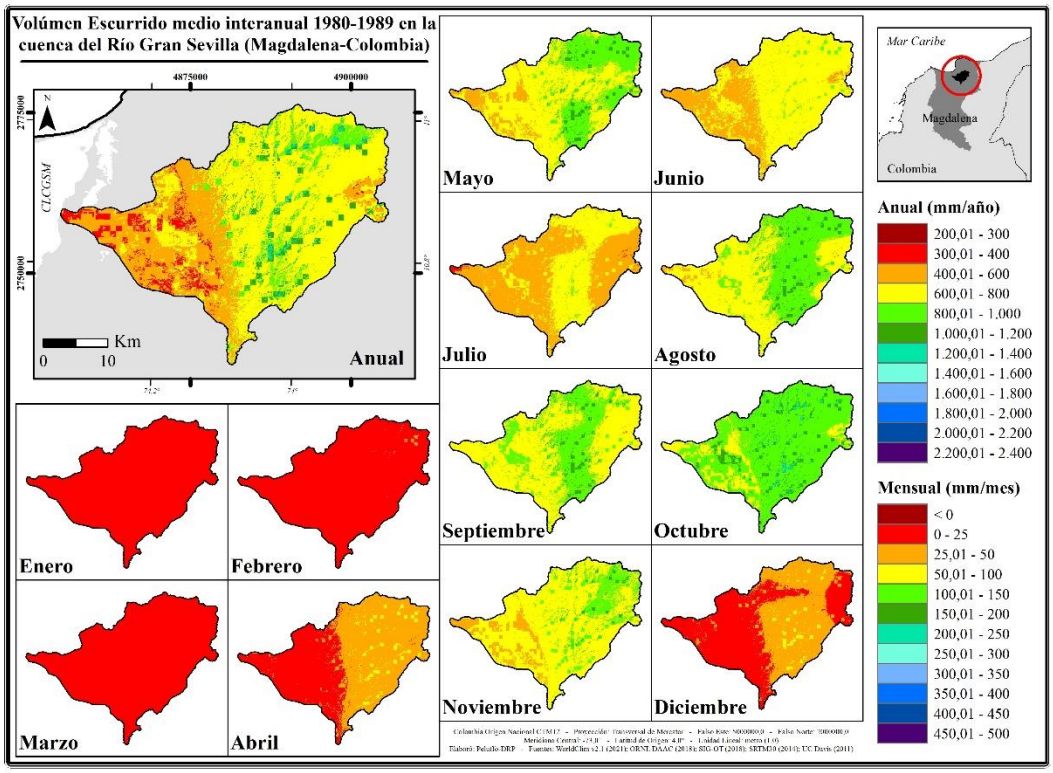

Figura 28. Distribución espacial del volumen medio anual y mensual interanual escurrido en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-1989.

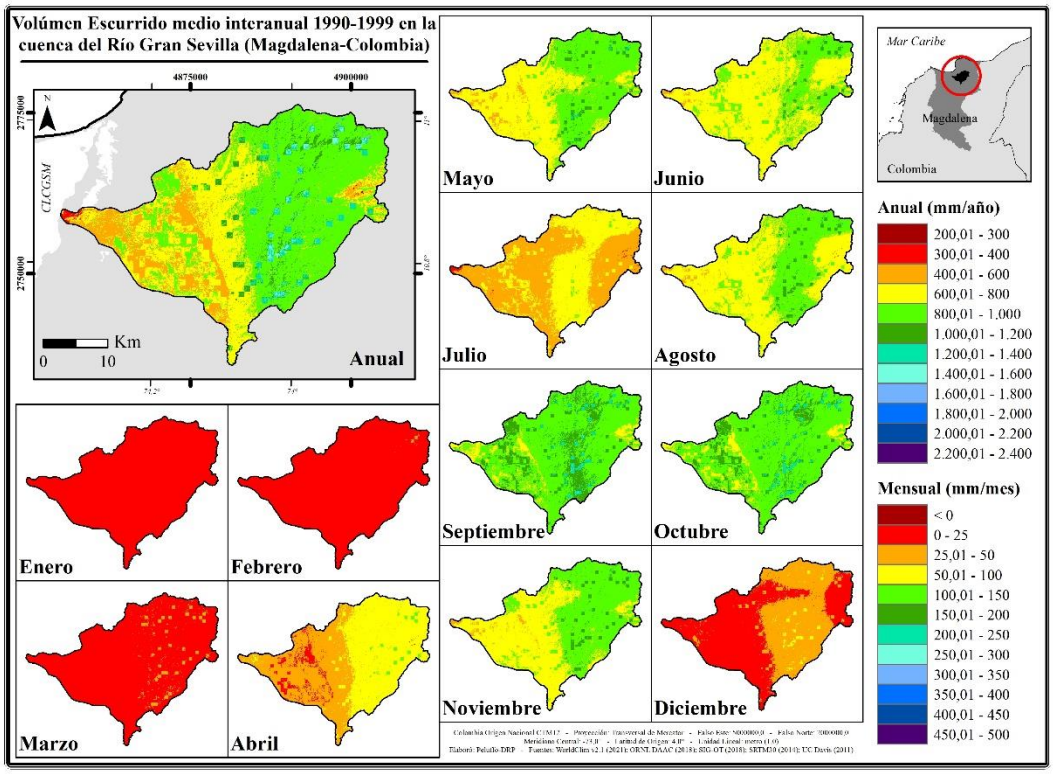

Figura 29. Distribución espacial del volumen medio anual y mensual interanual escurrido en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1990-1999.

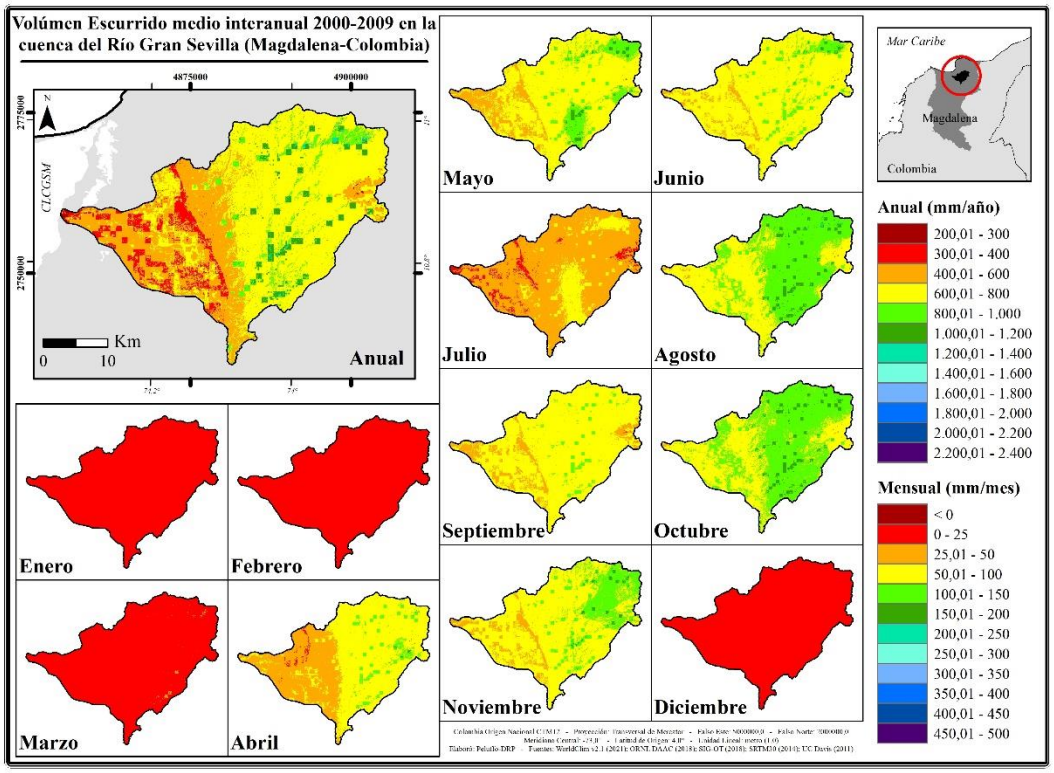

Figura 30. Distribución espacial del volumen medio anual y mensual interanual escurrido en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2000-2009.

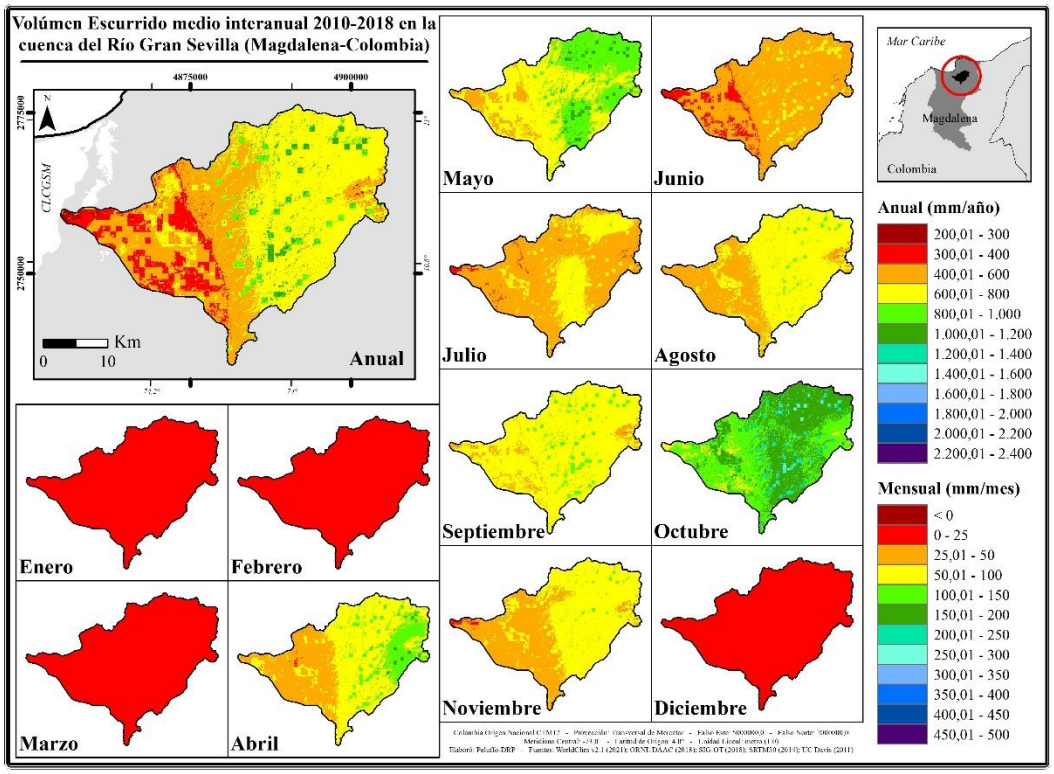

Figura 31. Distribución espacial del volumen medio anual y mensual interanual escurrido en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 2010-2018.

Demanda del Recurso Hídrico (Objetivo Específico 3)

Demanda Hídrica Total por Factor de Coberturas

La estimación de la demanda interanual para cada período consideró el uso de las coberturas “Artificializadas”, al estar asociadas de manera patente a la intervención antrópica además de que acumulan las presiones sobre el recurso hídrico superficial de la cuenca; los cálculos de área se efectuaron en la plataforma SIG y se basaron en el sistema de coordenadas estandarizado para el país [CTM12 – Colombia Origen Nacional] compatible con la proyección Transversal de Mercator.

La revisión basada en el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2010a, 2015, 2019) permitió el cálculo del factor de demanda por hectárea para cada tipo de cobertura y posteriormente la demanda en cada período como se muestra en la Tabla 10.

Con arreglo a las estimaciones realizadas, durante el período 1980-1989 se registró una demanda media total interanual por factor de coberturas de 360,38 Mm^3/año, durante la década de los 1990's se presentó un aumento del 14,15% llegando a los 411,38 Mm^3/año; y en el período siguiente [2000-2009] una reducción hasta los 348,7 Mm^3/año; para luego registrar otro aumento hasta los 392,57 Mm^3/año en el último lapso de tiempo analizado (Tabla 10); lo que indica un comportamiento fluctuante (Figura 28) que aparenta corresponderse con los abruptos cambios en el régimen de precipitaciones que ocurren en la cuenca (Tablas 9 y 10).

Tabla 10. Demanda hídrica calculada por tipo de coberturas para la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018.

Cobertura	**Factor de demanda** *(Mm^3/ha/año)*	**Demanda hídrica estimada** *(Millones de m^3/año)*			
		1980-1989	**1990-1999**	**2000-2009**	**2010-2018**
1.1.1. Tejido urbano continuo	0,0497850044738402	10,11	12,34	15,34	17,76
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	0,0159677826352625	76,62	110,60	99,01	136,47
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	0,0221108448926830	1,39	61,56	32,69	0,37
2.3.1. Pastos limpios	0,0127351899738352	1,29	0,00	0,01	0,23
2.3.2. Pastos arbolados	0,0127351899738352	29,69	15,61	15,42	13,51
2.3.3. Pastos enmalezados	0,0127351899738352	44,71	41,65	61,64	49,15
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	0,0127351899738352	0,02	0,19	16,09	7,78
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0,0127351899738352	24,44	7,01	0,85	7,29
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	0,0127351899738352	172,11	162,41	107,66	160,01
Total		**360,38**	**411,38**	**348,70**	**392,57**

Por regla general las coberturas que más demandaron agua en la cuenca del río Gran Sevilla, en orden descendente fueron: El mosaico de pastos con espacios naturales, los cultivos permanentes herbáceos, los pastos enmalezados y los pastos arbolados, efecto explicado por las grandes proporciones de superficie que ocupan, mismo motivo por el que no clasifica en este ranking el tejido urbano continuo a pesar de poseer el mayor factor de demanda (Tabla 10).

Las coberturas demandantes por lo general tendieron a oscilar en sus valores de demanda a lo largo del tiempo total analizado diferenciándose el tejido urbano continuo con un aumento década a década, iniciando con más de 10 Mm^3/año y con un registro casi 18 Mm^3/año al finalizar el ejercicio; y los pastos arbolados también destacaron por mantener una demanda decreciente período a período (Tabla 10).

Índice de Escasez

El índice de escasez calculado a partir de balance hídrico superficial registró valores entre 45,7% y 66,57% (Figura 32), lo que se traduce en que la cuenca mantiene una alta demanda de agua a lo largo de las décadas, con un solo cambio de condición en el período 1990-1999, en que la demanda fue apreciable (Tabla 11) a razón de que en esta década ocurrió la mayor oferta hídrica y una media interanual de precipitación más alta (Tablas 9 y 11).

Cuando se considera el método racional, se observa que el índice de escasez no manifiesta cambios significativos que lo muevan de categoría, manteniéndose durante las cuatro décadas como “Alta demanda” (Tabla 11) mostrando variaciones entre 52,1% y 67,75% en el último período analizado (Figura 32).

Tabla 11. Índice de escasez para la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018.

Método	Período	Oferta (*Mm³/año*)	Demanda (*Mm³/año*)	Índice de Escasez		
				IE	*Color*	*Descripción*
Balance hídrico	1980 - 1989	675,38	360,38	53,36%		Demanda Alta
	1990 - 1999	900,26	411,38	45,70%		Demanda Apreciable
	2000 - 2009	645,86	348,70	53,99%		Demanda Alta
	2010 - 2018	589,67	392,57	66,57%		Demanda Alta
Racional	1980 - 1989	658,37	360,38	54,74%		Demanda Alta
	1990 - 1999	789,60	411,38	52,10%		Demanda Alta
	2000 - 2009	634,79	348,70	54,93%		Demanda Alta
	2010 - 2018	579,48	392,57	67,75%		Demanda Alta

Fuente: Clasificación del IE y coloraciones Resolución 865 de 2004.

El IE en general tuvo un comportamiento entre décadas contrario a la oferta hídrica, registrando su mayor valor justo en el momento en que la oferta es más baja [2010-2018] y su menor valor cuando la oferta alcanza los mayores registros para este estudio [1990-1999], frente a la demanda hídrica parece tener un patrón independiente, por lo que se infiere que éste índice es sensible a valores altos de oferta hídrica (Figura 32).

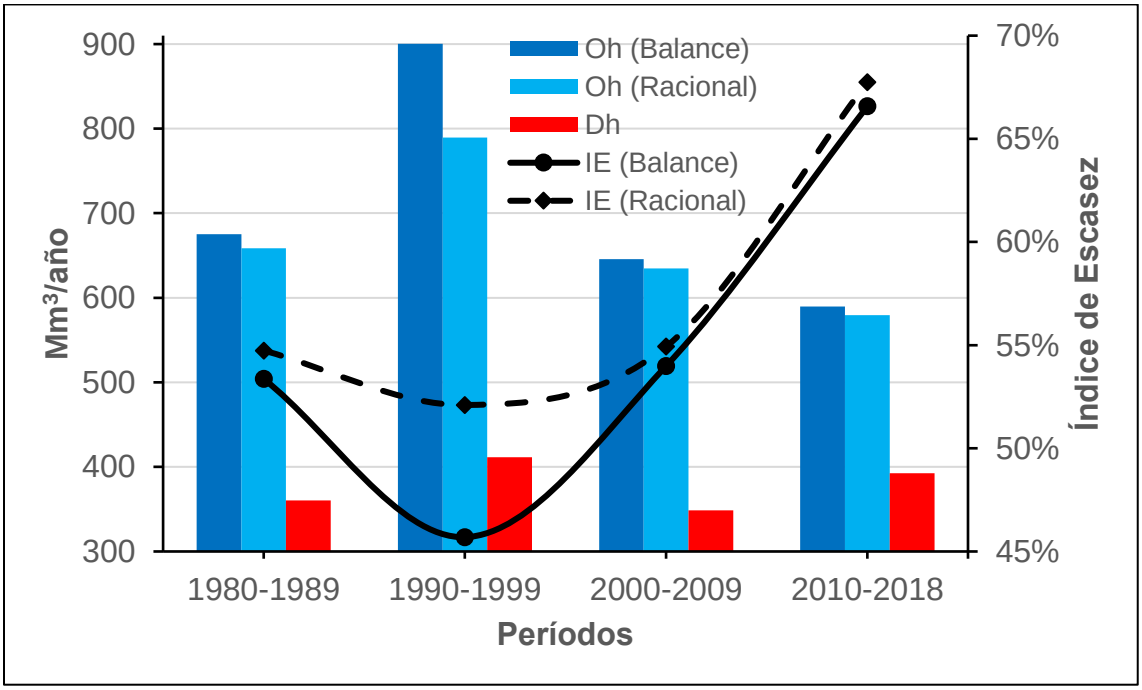

Figura 32. Comportamiento de la oferta hídrica, la demanda hídrica y el índice de escasez interanuales decadales en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018.

DISCUSIÓN

La clasificación no supervisada se realizó con base en productos [imágenes multiespectrales] de los satélites Landsat 5 para los períodos 1980-1989, 1990-1999 y 2000-2009, y en el caso del período 2010-2018 se usó el satélite Landsat 8, evitando deliberadamente a Landsat 7 debido al problema del “bandeo” o “gaps” que este presenta (González Velázquez, 2018), decisión tomada al probar varias rutinas que aportaban soluciones poco efectivas y, después de constatar que la calidad de las escenas y la resolución espacial brindada por Landsat 5 hacían de sus productos un remplazo óptimo para los efectos y alcances de éste trabajo, el mismo “salto” de satélite se pudo ver en el trabajo de Suarez Soto (2019).

En el presente trabajo se encontró reducción de pastos y aumento de bosques a diferencia de Suarez Soto (2019), quien halló la tendencia contraria, aunque hay que destacar que el mencionado autor no aplicó el estándar *CORINE Land Cover*, el porcentaje de nubes y sombras son muy altos en algunos de sus años analizados, lo que podría haber enmascarado alguno de sus resultados a este respecto y, no consideró una amplitud temporal constante entre los períodos de estudio.

Se observó aumento de coberturas artificiales en detrimento de las naturales con el consiguiente incremento de la fragmentación, con una notoria distinción en los mapas de la mitad más alta de la cuenca respecto de la más baja (Figura 2), tendiendo a un estado de conservación diferente en ambas zonas; siendo la sección alta la menos intervenida, posiblemente debido a dificultades inherentes al acceso, en especial en época lluviosa, lo que aumentaría el costo económico de su modificación para adaptarla a usos agrícolas o de otro tipo [artificial].

La diferenciación de los indicadores asociados a la complejidad paisajística apuntan a que las zonas intervenidas son menos complejas que las naturales en todos períodos analizados (comparación del *IF*), mientras que se apreció el mantenimiento de la complejidad estructural de la cuenca en su totalidad (comparación de la *DF*), ésto induce a afirmar que los cambios paisajísticos que se presentan en una cuenca de gran tamaño no son apreciables a gran escala, y esto puede deberse a que el *IF*

es más sensible a pequeña escala que la *DF,* por lo que se deduce que el *IF* es un indicativo más certero del nivel de la interacción humana con el paisaje (Vila Subirós et al., 2006).

Para estimar el efecto de las coberturas sobre la oferta hídrica, se hizo necesario comparar las metodologías expuestas: Por un lado el balance hídrico que considera la escorrentía superficial, y por otro, el método racional que se basa en el coeficiente de escorrentía, que a su vez tiene en cuenta el efecto de las coberturas; al observar las estimaciones de producción efectuadas, es notoria la variación en la cantidad total de agua entre ambos enfoques, debido a que la cuenca en la totalidad de los períodos analizados muestra reducción de la producción estimada cuando se tiene en cuenta el efecto de las coberturas, el tipo hidrológico de suelo y la pendiente; lo anterior se manifiesta en términos numéricos de la siguiente manera:

En la década de los 1980's se presenta una diferencia en la producción neta de agua del 2,23% pasando de 675,38 Mm^3 anuales por balance hídrico a 660,3 Mm^3/año por método racional; la mayor reducción se manifestó en la segunda década analizada [1990's], en que la producción pasó de 900,26 Mm^3/año por balance hídrico a 788,05 Mm^3/año por método racional representando un 12,46%; durante el tercer período [2000's] la variación fue de 1,72% con valores de 645,86 Mm^3/año por balance hídrico y 634,74 Mm^3 anuales por método racional; durante el último período analizado [2010-2018] fue registrada la menor variación en la producción media interanual con 1,48% exhibiendo valores en el orden de los 589,67 Mm^3/año por balance hídrico y 579,48 Mm^3 anuales por método racional (Tabla 11, Figura 32).

Bajo las dos modelaciones el resultado generalizado es que la cuenca está perdiendo capacidad para producir agua a largo plazo (décadas o espacios de tiempo superiores), similar a lo reportado por Pérez Cutillas et al., (2018) y Mendoza et al., (2002); cuando se combina este comportamiento con el de la demanda aumenta el índice de escasez del recurso hídrico (Tabla 11), en especial en las

secciones media y baja, lugares que presentan los mayores cambios en las coberturas naturales y notable presencia de bosque fragmentado.

La respuesta ante las transición de cobertura natural a artificial suele destacarse por el aumento de los caudales y de la capacidad de escurrimiento de dichas áreas debió a la degradación del suelo que conduce a la perdida de retención hídrica (Suarez Soto, 2019), como suele suceder en sectores urbanizados o muy intervenidos (Rey Valencia & Zambrano Nájera, 2018), sin embargo tal efecto no fue observado pues el presente estudio consideró una escala espacial y temporal más amplia que enmascara tal comportamiento al igual que su contraparte en la que el incremento de las coberturas boscosas disminuye el caudal porque el servicio de regulación hídrica se ve favorecido (Aguayo et al., 2016; Jullian et al., 2018; Pérez Cutillas et al., 2018), ya que la mayor producción de agua por lo general se da en las zonas boscosas de la cuenca (Duque Yaguache & Vázquez Zambrano, 2015), adicionalmente hay que anotar que el enfoque del presente trabajo estuvo en la producción neta de agua y no en el régimen de caudal, de haber sido así se hubiese aportado una matriz más robusta de conclusiones respecto de la cuenca bajo estudio.

El rendimiento hídrico de la cuenta manifestó diferencias entre ambos métodos, viéndose reducido en las estimaciones racionales frente a las hechas por balance hídrico, para los 1980's la disminución fue de 2,53%; en la década de los 1990's se redujo un 12,29%; para los 2000's fue de 1,73% y en el período 2010-2018 fue de 1,74%, sin embargo, el mayor impacto de las cobertura en las dinámicas hídricas de una cuenca se aprecia más notoriamente en la capacidad de retención hídrica que en el rendimiento, lo cual es soportado por otros autores (Jullian et al., 2018; Ochoa-Tocachi et al., 2016) y explica la tendencia de otros estudios a enfocarse en el régimen de caudales (Aguayo et al., 2016; Burbano-Girón et al., 2016; García Olmos, 2006; Pérez Cutillas et al., 2018).

Respecto a las disimilitudes en las estimaciones hechas para el período 1990-1999, que suelen manifestarse como un cambio abrupto en los valores frente a los demás

rangos de tiempo analizados, hay que aclarar que en dicho lapso se presentaron anomalías en el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (*ENSO*, por sus siglas en inglés) que tuvieron efecto sobre las precipitaciones, específicamente en los años 1991, 1997 y 1999 en los que hubo eventos extremos que condujeron a que la década en cuestión fuera significativamente atípica (Restrepo et al., 2014, 2019) y aunque La Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge no encontró correlación entre los cambios en las coberturas y el fenómeno *ENSO* (CVS, 2017 en Suarez Soto, 2019) es importante destacar éstas anomalías, pues hacen que la década de los 1990's no sea punto de partida idóneo para comparar estimaciones.

La acción antropogénica hace variar el régimen hídrico (Ochoa-Tocachi et al., 2016), en efecto se ha expresado con anterioridad que cualquier cambio en la vegetación incide en los procesos hidrológicos (Valencia-Leguizamón & Tobón, 2017), este tipo de procesos pueden apreciarse a pequeña escala en un lapso temporal relativamente inmediato a través de la evaluación de la respuesta hídrica de la cuenca, pero no pueden verse tan evidentemente a macroescala espacial y/o temporal (Aguayo et al., 2016); en el presente estudio se tuvo en cuenta una escala de trabajo sumamente grande [974,282 km^2] en la cual no fue posible la determinación de efectos notorios de baja intensidad, ni tampoco el hallazgo de correlación entre los factores del balance hídrico y las métricas paisajísticas ($P>0,05$), sin embargo, es de destacar que Burbano-Girón et al. (2016) reportó relación entre el tamaño de las cuencas y el nivel de complejidad de su red hídrica con las variables que rigen su caudal a distintas escalas temporales; Suarez Soto (2019) encontró correlación entre las variables climáticas y las dinámicas de cobertura, aunque Burbano-Girón et al. (2016) afirma que la escorrentía está más asociada a la precipitación, ésta última conclusión más parecida a la expuesta en el presente documento en donde se encontró que las variables climáticas tienen sus propias tendencias y van en caminos independientes al comportamiento de la paisajísticas.

Para concluir, cuando en la cuenca del río Gran Sevilla se tienen en cuenta las dinámicas paisajísticas, las características hídricas del suelo y la pendiente, la estimación del agua producida se reduce entre un 1,48% y un 2,23%; las métricas paisajísticas no guardan asociación con las climáticas.

Se puede afirmar que desde 1980 hasta el 2018 la cuenca redujo su producción de agua en al menos un 12% bajo cualquiera de las modelaciones realizadas, lo que representa una pérdida aproximada de 85,7 millones de metros cúbicos anuales de agua por balance hídrico o 79,3 Mm^3/año si se considera el efecto de las coberturas, el tipo hidrológico de suelo y la pendiente de la cuenca; éste es un indicativo de la tendencia a largo plazo que lleva la cuenca hacia la degradación de su capacidad de captación y retención de agua en parte por efecto de la acción humana y como consecuencia del cambio climático.

Se recomienda la realización de estudios similares al presente para llegar a una mejor comprensión de las dinámicas paisajísticas de las cuencas tropicales en torno a la interacción de las coberturas vegetales y usos del suelo con las dinámicas hídricas, teniendo en cuenta las dificultades inherentes a la observación de los fenómenos a gran escala espacial y temporal.

Se propone realizar estimaciones anuales de las variables respuesta, fraccionar la cuenca en subunidades que faciliten la observación de eventos a pequeña escala, evaluar dos o más cuencas con regímenes climáticos similares para distinguir mejor el efecto de la composición vegetal, incluir de manera más precisa el efecto del suelo sobre régimen hídrico y solventar la probable falta de datos de futuros trabajos a través de monitoreo en campo.

Muchas gracias…

REFERENCIAS

Acuña Caro, C. A. (2013). Identificación De Áreas Prioritarias De Conservación Enfocadas Hacia La Conectividad Estructural Del Corredor Encenillo (Municipios De La Calera, Guasca, Sopo, Sesquilé, Guatavita), Cundinamarca [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana]. In *Journal of Chemical Information and Modeling*. https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/9796

Aguayo, M., Stehr, A., & Link, O. (2016). Respuesta hidrológica de una cuenca de meso escala frente a futuros escenarios de expansión forestal. *Revista de Geografia Norte Grande*, *65*, 197–214. https://doi.org/10.4067/s0718-34022016000300010

Aguirre Gómez, R., & Morales Manilla, L. M. (2012). Análisis espectral del arrecife coralino de Cayos Arcas, Campeche, México. *Investigaciones Geográficas*, *57*, 7. https://doi.org/10.14350/rig.30078

Alarcón-Hincapié, J., Zafra-Mejía, C., & Echeverri-Prieto, L. (2019). Cambio climático y recursos hídricos en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, *22*(2). https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1368

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration (Guidelines for computing crop water requirements)* (FAO Irrigation and Drainage Paper 56). https://www.researchgate.net/publication/235704197_Crop_evapotranspiration-Guidelines_for_computing_crop_water_requirements-FAO_Irrigation_and_drainage_paper_56

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Estudio FAO Riego y Drenaje 56). https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm

Álvarez Villa, O. D., Vélez Upegui, J. I., & Poveda Jaramillo, G. (2008). *Nuevos campos de precipitación promedio anual en Colombia*. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7789

Aponte Pérez, L., & Galeano Franco, L. (2017). *Analisis Multitemporal De Los Cambios En Los Usos Del Suelo Y Su Influencia En La Oferta Hidrica Superficial En La Microcuenca La Teneria Del Municipio De La Playa De Belén Norte De Santander* [Tesis de pregrado, Universidad Franciso de Paula Santander Ocaña]. http://repositorio.ufpso.edu.co/xmlui/handle/123456789/1682

Arévalo Uribe, D. (2012). *Una Mirada a la Agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica* (Reporte 2012). https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/hh_colombia_6b.pdf

Arias Hernández, J. R., & Lugo De La Hortúa, P. (2015). Análisis multitemporal de la transformación en la cobertura boscosa del parque nacional natural Tinigua y su área de influencia [Tesis de pregrado, Universidad de La Salle]. In *Universidad de La Salle*. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/114/

Bae, J., & Ryu, Y. (2015). Land use and land cover changes explain spatial and temporal variations of the soil organic carbon stocks in a constructed urban park. *Landscape and Urban Planning*, *136*, 57–67. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.11.015

Bakker, W. H., Feringa, W., Gieske, A. S. M., Gorte, B. G. H., Grabmaier, K. A., Hecker, C. A., Horn, J. A., Huurneman, G. C., Janssen, L. L. F., Kerle, N., van der Meer, F. D., Parodi, G. N., Pohl, C., Reeves, C. v., van Ruitenbeek, F. J., Schetselaar, E. M., Tempfli, K., Weir, M. J. C., Westinga, E., & Woldai, T. (2009). *Principles of Remote Sensing: An introductory texbook* (K. Tempfli, N. Kerle, G. C. Huurneman, & L. L. F. Janssen, Eds.; 4th ed.). The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC).

Budyko, M. I., & Miller, D. H. (1974). *Climate and Life* (Academic Press, Ed.; 18th ed.). Academic Press INC.

Burbano-Girón, J., Domínguez, E., & Barón-Ruiz, O. (2016). Análisis de la relación entre variables morfométricas y biofísicas en la estimación de características probabilísticas para la oferta hídrica superficial en Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *40*(156), 514–526. https://doi.org/10.18257/raccefyn.291

Cabezas Gaviria, A., & Ospina Montealegre, R. (2010). Análisis del paisaje y de su relación con la regeneración del roble (Quercus Humboldtii Bonpl.) en el Municipio de Popayán, Departamento del Cauca. *Colombia Forestal*, *13*(2), 189–199. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2010.2.a01

Campuzano, C. P., Roldán Pérez, G., Guhl Nanneti, E., & Sandoval Pedroza, J. M. (2012). Una visión al estado del recurso hídrico en Colombia. In J. P. Laclette, P. Zúñiga, B. Jiménez Cisneros, & J. Galizia Tundisi (Eds.), *Diagnóstico del Agua en las Américas* (pp. 195–225). Foro Consultivo Científico y Tecnológico. https://www.agua.org.mx/wp-content/uploads/2012/03/Libro_Diagnostico_del_Agua_en_las_Americas.pdf

Carabias, J., & Landa, R. (2005). *Agua, medioambiente y sociedad: Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México* (1st ed.). Universidad Nacional Autónoma México, Colegio de Arronte, Fundación Gonzalo Río. https://agua.org.mx/biblioteca/agua-medio-ambiente-y-sociedad-hacia-la-gestion-integral-de-los-recursos-hidricos-en-mexico-refe/

Castellanos-M, C. A., Chamarravi, N., Castañeda, E., Galvis, F., & Cepeda, E. (2011). Variación espacio-temporal de la cobertura vegetal en la microcuenca El Llanito, Santander, Colombia. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, *15*(2), 60–68. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-30682011000200004

Castillo, I. M., & Rodríguez, M. Á. (2017). Dinámica multitemporal de las coberturas y el espejo de agua en la laguna de Fúquene. *Revista Mutis*, *7*(1). https://doi.org/10.21789/22561498.1183

Contreras Silva, A. I. (2011). *Clasificación de fondos bénticos en arrecifes de coral mediante imágenes satelitales, Banco Chinchorro, México* [Tesis de maestría, Centro de investigación en geografía y geomática "Ing. Jorge L. Tamayo" A.C.]. https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/22/1/34-2011-Tesis-Contreras Silva%2C Ameris Ixchel-Maestra en Geomática.pdf

CORPAMAG. (2015). *Elaboración del inventario de la oferta y disponibilidad del recurso hídrico de las cuencas de los ríos Piedras, Manzanares, Frío, Aracataca, Tucurinca y Fundación, en el departamento del Magdalena, como base para su reglamentación*.

CORPAMAG. (2016). *Estudio base para la reglamentación de corrientes de los ríos Buritaca, Gaira, Toribio, Córdoba, Orihueca y Sevilla, a partir de la oferta y disponibilidad del recurso hídrico (Contrato de consultoría número 215 del 2015)*. https://www.corpamag.gov.co/archivos/POMCAS/Est_Base_Reglamentacion_Corrientes.pdf

Dang, A. N., & Kawasaki, A. (2017). Integrating biophysical and socio-economic factors for land-use and land-cover change projection in agricultural economic regions. *Ecological Modelling*, *344*, 29–37. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.11.004

Delgado Lindeman, S. P., & Quintana Canabal, C. A. (2014). *Determinación del índice de escasez en la cuenca del rio Guachaca en el Departamento del Magdalena* [Tesis de pregrado, Universidad de Cartagena]. https://repositorio.unicartagena.edu.co/handle/11227/544

Díaz Caravantes, R. E., Bravo Peña, L. C., Alatorre Cejudo, L. C., & Sánchez Flores, E. (2013). Presión antropogénica sobre el agua subterránea en México: una aproximación geográfica. *Investigaciones Geográficas*, *82*, 93–103. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112013000300007&script=sci_abstract

Dudula, J., & Randhir, T. O. (2016). Modeling the influence of climate change on watershed systems: Adaptation through targeted practices. *Journal of Hydrology*, *541*, 703–713. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.020

Duque Yaguache, L. F., & Vázquez Zambrano, R. F. (2015). Modelación de la oferta hídrica en una cuenca de montaña tropical en función de su cobertura del suelo. *Aqua-LAC*, *7*(1), 63–73. https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2015-v7-1-08

EROS, & USGS. (2018). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. In *Earth Resources Observation and Science (EROS) Center*. U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.5066/F7PR7TFT

Fattorelli, S., & Fernández, P. C. (2011). *Diseño Hidrológico* (Edición digital, Ed.; 2nd ed.). Water assessment and advisory global network. https://www.academia.edu/9251651/Diseño_Hidrológico_EDICION_DIGITAL_C_D_I_N_C_L_U_I_D_O

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, *37*(12), 4302–4315. https://doi.org/10.1002/joc.5086

García Olmos, C. F. (2006). Regulación hídrica bajo tres coberturas vegetales en la cuenca del Rio San Cristóbal, Bogotá D.C. *Colombia Forestal*, *10*(20), 127. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2007.1.a07

Giri, C., Pengra, B., Long, J., & Loveland, T. R. (2013). Next generation of global land cover characterization, mapping, and monitoring. *International Journal of*

Applied Earth Observation and Geoinformation, *25*(1), 30–37. https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.03.005

Gómez Ángel, Á. M. (2009). *Estudio Multitemporal de la Dinámica de Transformación Espacial de la Cobertura por Crecimiento Urbano en una Zona de la Localidad de Suba, Bogota-Colombia en el Período 1955 - 2006* [Pregrado, Pontificia Universidad Javeriana]. https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=3906

González Velázquez, A. (2018). *Desarrollo de una aplicación para la reparación de huecos (gapfilling) de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+* [Maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente - ITESCO]. https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2819018

Gutiérrez Rojas, Y. A. (2009). *Uso del suelo, vegetación ribereña y calidad del agua de la microcuenca del río Gaira, Santa Marta, Colombia.* [Maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza - CATIE]. https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5630

Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., & Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, *34*(3), 623–642. https://doi.org/10.1002/joc.3711

Hobbs, R. (1997). Future landscapes and the future of landscape ecology. *Landscape and Urban Planning*, *37*(1–2), 1–9. https://doi.org/10.1016/S0169-2046(96)00364-7

Huisman, O., & de By, R. A. (2009). *Principles of Geographic Information Systems: An introductory textbook* (4th ed.). International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC). https://www.researchgate.net/publication/307855423

IDEAM. (2010a). *Estudio Nacional del Agua 2010*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/19713

IDEAM. (2010b). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. https://www.researchgate.net/publication/303960063

IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/20541

IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. https://cta.org.co/biblionet/estudio-nacional-del-agua-2018/

IDEAM, IGAC, & CORMAGDALENA. (2008). *Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena - Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia escala 1:100.000*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena. http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=11419

Jullian, C., Nahuelhual, L., Mazzorana, B., & Aguayo, M. (2018). Assessment of the ecosystem service of water regulation under scenarios of conservation of native vegetation and expansion of forest plantations in south-central Chile. *Bosque*, *39*(2), 277–289. https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000200277

Liding, C., Yang, L., Yihe, L., Xiaoming, F., & Bojie, F. (2008). Pattern analysis in landscape ecology: progress, challenges and outlook. *Acta Ecologica Sinica*, *28*(11), 5521–5531. https://doi.org/10.1016/s1872-2032(09)60011-1

Mas, J.-F., & Correa Sandoval, J. (2000). Análisis de la fragmentación del paisaje en el área protegida “Los Petenes”, Campeche, México. *Investigaciones Geográficasicas*, *43*, 42–59. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112000000300004

Mejía Ramírez, J. A. (2016). *Análisis multitemporal utilizando técnicas de teledetección de la pérdida de cobertura vegetal por causa de la minería ilegal en el Bajo Cauca Antioqueño* [Especialización, Universidad Militar Nueva Granada]. https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/15543

Mendoza, M., Bocco, G., López Granados, E., & Bravo, M. (2002). Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, *49*, 92–117. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112002000300007&nrm=iso

Mendoza Riaño, G. E., & García Blanco, K. P. (2011). Análisis multitemporal de uso y cobertura del suelo en el Municipio de Manaure–Guajira-Colombia, Implementando imágenes Landsat. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, 6442–6449. https://1library.co/document/zpv6w80z-analisis-multitemporal-cobertura-municipio-manaure-colombia-implementando-imagenes.html

Mongua Lucero, L. (2017). *Análisis multitemporal del cambio en la cobertura y usos del suelo para evaluar el impacto de la minería y su influencia en la producción de sedimentos por medio de la herramienta ArcSwat en la cuenca del río San Juan* [Especialización, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito]. https://1library.co/document/y814r1rz-analisis-multitemporal-cobertura-mineria-influencia-produccion-sedimentos-herramienta.html

Monsalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería* (Alfaomega, Ed.; 2nd ed.). Escuela colombiana de ingenierías.

Morales-Hernández, J. C., Carrillo-González, F. M., Farfán-Molina, L. M., & Cornejo-López, V. M. (2016). Cambio de cobertura vegetal en la región de Bahía de Banderas, México. *Caldasia*, *38*(1), 17–30. https://doi.org/10.15446/caldasia.v38n1.57831

Morláns, M. C. (2009). Estructura del paisaje (Matriz, parches, bordes, corredores) sus funciones, fragmentación del hábitat y su efecto borde. In Editorial Científica Universitaria (Ed.), *Área ecología* (p. 12). Universidad Nacional de Catamarca. http://www.editorial.unca.edu.ar/Publicacione on line/Ecologia/imagenes/pdf/004-estructuradepaisaje.pdf

Mussetta, P. C. (2013). El agua en discordia, balance cualitativo en Latinoamérica. *Gestión y Ambiente, Universidad Nacional de Colombia*, *16*(1), 113–127. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/70685

Nolasco, M., Willington, E. A., & Bocco, M. (2014). Clasificación del uso de suelo en agricultura a partir de series temporales de imágenes LANDSAT. *Sexto Congreso Argentino de AgroInformática - CAI*, 64–73. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/41984

Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., de Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C. A., Acosta, L., Villazón, M., Guallpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., & Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, *30*(22), 4074–4089. https://doi.org/10.1002/hyp.10980

Padilla Nieto, T. E., & Salazar Arcila, L. F. (2015). *Análisis multitemporal del cambio en las coberturas de la tierra por cultivos para agrocombustibles y sus posibles efectos en la biodiversidad en un transecto del norte de la Región Natural*

Andina y del Caribe colombiano [Pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. http://hdl.handle.net/11349/4592

Palacios Bermúdez, E. (2015). *Análisis Multitemporal en la Cobertura Boscosa de la Zona Norte del Departamento del Chocó, 1990 - 2014* [Especialización, Universidad de Manizales]. https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/2459

Pascual Aguilar, J. A., Rubio, J. L., Andreu, V., Campo, J., González, O., & Gimeno, E. (2010). Size of drainage area and hydrologic connectivity in the stromflow generation in Mediterranean semi-arid catchments. Corraixet catchment. *Pirineos*, *165*(165), 179–192. https://doi.org/10.3989/Pirineos.2010.165009

Pérez Cutillas, P., Cataldo, M. F., Zema, D. A., de Vente, J., & Boix-Fayos, C. (2018). Efectos de la revegetación a escala de cuenca sobre el caudal y la evapotranspiración en ambiente mediterráneo. Cuenca del Taibilla (SE de España). *BOSQUE*, *39*(1), 119–129. https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000100119

Ramírez Zapata, A. (2015). *Análisis multitemporal mediante sensores remotos de cobertura de la tierra para el periodo de tiempo 1999 - 2011 en el municipio de San Jacinto, Bolívar* [Especialización, Universidad Militar Nueva Granada]. http://hdl.handle.net/10654/6318

Rehman, S., & Siddiqi, A. H. (2009). Wavelet based hurst exponent and fractal dimensional analysis of Saudi climatic dynamics. *Chaos, Solitons and Fractals*, *40*(3), 1081–1090. https://doi.org/10.1016/j.chaos.2007.08.063

Resolución 865 de 2004, (2004). Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Diario Oficial No. 45.630, 4 de agosto de 2004 https://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Resolucion865_20040722.htm

Restrepo, J. C., Higgins, A., Escobar, J., Ospino, S., & Hoyos, N. (2019). Contribution of low-frequency climatic-oceanic oscillations to streamflow variability in small, coastal rivers of the Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia). *Hydrology and Earth System Sciences*, *23*(5), 2379–2400. https://doi.org/10.5194/hess-23-2379-2019

Restrepo, J. C., Ortíz, J. C., Pierini, J., Schrottke, K., Maza, M., Otero, L., & Aguirre, J. (2014). Freshwater discharge into the Caribbean Sea from the rivers of Northwestern South America (Colombia): Magnitude, variability and recent changes. *Journal of Hydrology*, *509*, 266–281. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.045

Rey Valencia, D. M., & Zambrano Nájera, J. D. C. (2018). Estudio de la respuesta hidrológica en la cuenca urbana de montaña San Luis-Palogrande. *Revista UIS Ingenierías*, *17*(1), 115–126. https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018011

Rocchini, D., Petras, V., Petrasova, A., Horning, N., Furtkevicova, L., Neteler, M., Leutner, B., & Wegmann, M. (2017). Open data and open source for remote sensing training in ecology. *Ecological Informatics*, *40*, 57–61. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.05.004

Rodríguez Martín, J. (2014). *Correccion atmosferica de imagenes de satelite por metodos de aprendizaje automatico* [Doctorado, Universidad de Valladolid]. https://doi.org/10.35376/10324/9820

Ross, C. W., Prihodko, L., Anchang, J., Kumar, S., Ji, W., & Hanan, N. P. (2018). HYSOGs250m, global gridded hydrologic soil groups for curve-number-based runoff modeling. *Scientific Data*, *5*, 180091. https://doi.org/10.1038/sdata.2018.91

Russell, K. L., Vietz, G. J., & Fletcher, T. D. (2017). Global sediment yields from urban and urbanizing watersheds. *Earth-Science Reviews*, *168*, 73–80. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.001

Sánchez San Román, F. J. (2017). Hidrología Superficial y Subterránea. In *Hidrología Superficial y Subterránea* (1st ed.). Createspace Independent Publishing Platform. https://hidrologia.usal.es/

Sendra, V., Camacho, F., Sánchez, J., Jiménez-Muñoz, J. C., & García-Haro, F. J. (2015). Método para la corrección atmosférica de imágenes Landsat. In J. Bustamante Díaz, R. Díaz-Delgado, D. Aragonés Borrego, I. Afán Asencio, & D. García (Eds.), *Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos - Libro de actas del XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección* (pp. 484–487). Laboratorio de SIG y Teledetección de la Estación Biológica de Doñana (LAST-EBD), Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Asociación Española de Teledetección. http://www.aet.org.es/congresos/xvi/XVI_Congreso_AET_actas.pdf

Severiche Sierra, C. A., Barreto Lezama, A. J., & Acevedo Barrios, R. L. (2013). Efecto de las Lluvias sobre la Calidad del Agua en La Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *AVANCES Investigación En Ingeniería*, *10*(1), 58–67. https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/2727/2147

Shroder, J. F. (2014). Watersheds of Want. In *Natural Resources in Afghanistan* (pp. 138–180). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800135-6.00005-2

Suarez Soto, N. (2019). *Análisis espacio temporal del uso del suelo y sus efectos en el clima local y la oferta hídrica en la cuenca del río Canalete, Córdoba - Colombia* [Maestría, Universidad de Córdoba]. https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/2970

Trabucco, A., & Zomer, R. J. (2019). Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration (ET0) Climate Database v2. *CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI)*, *January*, 10. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7504448.v3

Treviño Garza, E. J., Muñoz Robles, C. A., Cavazos Camacho, C., & Barajas Chávez, L. (2002). Evaluación del flujo hídrico superficial en la Sierra de San Carlos, Tamaulipas. *Ciencia UANL*, *5*(4), 525–530. https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/247468

UNESCO. (2014). *Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2014: agua y energía, datos y estadísticas*. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000226961_spa

Valencia-Leguizamón, J., & Tobón, C. (2017). Influencia de la vegetación en el funcionamiento hidrológico de cuencas de humedales de alta montaña tropical. *Ecosistemas*, *26*(2), 10–17. https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-2.02

Venema, H. D., Calamai, P. H., & Fieguth, P. (2005). Forest structure optimization using evolutionary programming and landscape ecology metrics. *European Journal of Operational Research*, *164*(2), 423–439. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.11.011

Vila Subirós, J., Varga Linde, D., Llausàs Pascual, A., & Ribas Palom, A. (2006). Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology). Una interpretación desde la geografía. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, *48*, 151–166. https://www.researchgate.net/publication/39107731_Conceptos_y_metodos_fundamentales_en_ecologia_del_paisaje_landscape_ecology_Una_interpretacion_desde_la_geografia

Viloria De la Hoz, J. (2009). *Historia empresarial del guineo: Empresas y empresarios bananeros en el departamento del Magdalena, 1870-1930* (No. 23; Cuadernos de Historia Económica y Empresarial). https://doi.org/10.32468/chee.23

Vogl, A. L., Goldstein, J. H., Daily, G. C., Vira, B., Bremer, L., McDonald, R. I., Shemie, D., Tellman, B., & Cassin, J. (2017). Mainstreaming investments in

watershed services to enhance water security: Barriers and opportunities. *Environmental Science and Policy*, *75*, 19–27. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.05.007

Wu, J. (2008). Landscape Ecology. In *Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set* (pp. 2103–2108). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00864-8

Xing, H., Chen, J., Wu, H., Zhang, J., Li, S., & Liu, B. (2017). A service relation model for web-based land cover change detection. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *132*, 20–32. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.08.007

Zhang, H. K., & Roy, D. P. (2017). Using the 500 m MODIS land cover product to derive a consistent continental scale 30 m Landsat land cover classification. *Remote Sensing of Environment*, *197*, 15–34. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.024

ANEXOS

Anexo 1. Porcentaje de coberturas decadales *CORINE Land Cover* registradas en la cuenca del río Gran Sevilla en el período 1980-2018

Tipo de cobertura	Cobertura	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2018
Artificializada	1.1.1. Tejido urbano continuo	0,21%	0,25%	0,32%	0,37%
	2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	4,93%	7,11%	6,36%	8,77%
	2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	0,06%	2,86%	1,52%	0,02%
	2.3.1. Pastos limpios	0,10%	0,00%	0,00%	0,02%
	2.3.2. Pastos arbolados	2,39%	1,26%	1,24%	1,09%
	2.3.3. Pastos enmalezados	3,60%	3,36%	4,97%	3,96%
	2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	0,00%	0,02%	1,30%	0,63%
	2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1,97%	0,57%	0,07%	0,59%
	2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	13,87%	13,09%	8,68%	12,90%
Natural	3.1.1. Bosque denso	32,72%	30,29%	29,21%	33,76%
	3.1.3. Bosque fragmentado	7,11%	15,25%	12,59%	14,03%
	3.2.1. Herbazal	5,84%	5,90%	7,19%	5,16%
	3.2.2. Arbustal	25,81%	19,40%	26,10%	17,40%
	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	0,01%	0,00%	0,05%	0,06%
Otro	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	0,27%	0,11%	0,10%	0,26%
	4.1.1. Zonas Pantanosas	0,26%	0,00%	0,00%	0,07%
	4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	0,60%	0,41%	0,00%	0,60%
	5.1.1. Ríos (50 m)	0,04%	0,01%	0,05%	0,00%
	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	0,21%	0,13%	0,26%	0,33%

Fuente: Estimaciones propias; porcentajes basados en un área total de 974,282 km^2.