



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

**MAESTRÍA PROFESIONAL EN GESTIÓN Y MANEJO DE CUENCAS
HIDROGRÁFICAS**

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

**EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DE RÍO GRANDE-
PANAMÁ Y PROPUESTA DE ESTRATEGÍA DE GESTIÓN FRENTE AL CAMBIO
CLIMÁTICO**

JOSÉ MARÍA GUARDIA ESCOBAR

TURRIALBA, COSTA RICA

AÑO 2017

Este trabajo de graduación ha sido aceptado en su presente forma por la División de Educación y el Programa de Posgrado del CATIE y aprobado por el Comité Asesor del estudiante, como requisito para optar por el grado de

División de Educación
Máster en Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas

FIRMANTES:



Sergio Velásquez

Sergio Velásquez, M.Sc.
Director del Trabajo de Graduación

Ney Ríos

Ney Ríos, M.Sc.
Segundo lector

Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo

Isabel A. Gutiérrez-Montes

Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.
Decana del Programa de Posgrado

José María Guardia Escobar

José María Guardia Escobar
Candidato

Programa de Posgrado

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos que nos dieron su apoyo y comprensión al momento de emprender esta iniciativa.

A familiares y amigos con quienes hemos compartido momentos prósperos y adversos.

A nuestro padre eterno "Dios" que nos ha dado la vida y permitido vivirla con las personas que más hemos querido.

A todos los que he tenido la fortuna de encontrar en el camino de la vida.

"Porque todo lo que Dios creó es bueno y nada es de desecharse, si se toma con acción de gracias; porque por la palabra de Dios y por la oración es santificado." 1 Timoteo 4:4-5

AGRADECIMIENTO

Al MSc. Sergio Velásquez Mazariegos, por toda la orientación y conocimiento compartido durante este trabajo.

Al PhD. Jorge Faustino por toda la comprensión y docencia durante el desarrollo de la maestría.

Al MSc. José Ney Ríos, por los consejos y experiencia al igual que por su atención de forma oportuna a nuestras consultas.

Al cuerpo docente y equipo administrativo de CATIE que nos dieron la oportunidad de participar en esta primera maestría virtual.

A los compañeros del curso con quienes tuvimos la dicha trabajar en equipo durante el proceso académico.

A todas las personas que nos han apoyado siempre de forma desinteresada y con quienes comparto en común principios y metas.

Mi más sincero agradecimiento.

CONTENIDO

INDICE

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO.....	v
LISTA DE ABREVIATURAS Y UNIDADES	x
RESUMEN	xii
SUMMARY.....	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3. IMPORTANCIA.....	4
1.4. OBJETIVOS	6
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	6
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
2. REVISION DE LITERATURA Y MARCO REFERENCIAL	6
2.1. EL CICLO HIDROLÓGICO.....	6
2.2. MODELOS HIDROLOGICOS	8
2.3. CAMBIO CLIMÁTICO.....	9
2.3.1. ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO	10
2.4. MORFOMETRIA DE CUENCA	11
2.4.1. CARACTERISTICAS MORFORMETRICA CUENCA DE RÍO GRANDE.....	11
2.4.2. RELACIÓN DE ALTURA Y DISTRIBUCION ALTITUDINAL.....	11
2.4.3. ANALISIS DE FORMA	13
2.4.4. PERFIL Y PENDIENTE PROMEDIO DEL CAUCE.....	13
2.4.5. PARAMETROS RELATIVOS AL DRENAJE.....	14

2.5. USO DE SUELO ACTUAL Y CAMBIO DE USO DE SUELO.....	14
2.6. ESCASEZ Y DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO	15
3. METODOLOGIA	18
3.1. CARACTERISTICA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	18
3.1.1. TOPOGRAFÍA.....	19
3.1.2. CLIMA.....	19
3.1.3. HIDROLOGÍA.....	24
3.1.4. GEOLOGIA.	26
3.1.5. CAPACIDAD DE USO DE LA TIERRA.....	28
3.1.6. ASPECTOS SOCIECONÓMICOS	30
3.2. DATOS DE ENTRADA AL MODELO	35
3.2.1. INSUMOS PARA LA MODELACIÓN	36
3.3. MODELACIÓN DE ESCENARIOS.....	40
3.4. CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	46
3.5. DEMANDA DEL RECURSO HIDRICO EN LA CUENCA.....	54
4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	57
4.1. BALANCE HÍDRICO CUENCA DE RÍO GRANDE LÍNEA BASE 1980-2015	58
4.2. BALANCE HÍDRICO CUENCA DE RÍO GRANDE RCP 2.6 (2016-2070)	59
4.3. BALANCE HÍDRICO CUENCA DE RÍO GRANDE RCP 8.5 (2016-2070)	60
4.4. COMPARACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO LINEA BASE – ESCENARIOS	62
4.5. DISPONIBILIDAD Y ESCASEZ DEL RECURSO HIDRICO	70
4.6. CONCLUSIONES	73
4.7. RECOMENDACIONES.....	75
5. BIBLIOGRAFIA.....	76

Figuras

Figura 1. Evolución de la concentración de CO ₂ , por escenario hasta el 2300, Fuente: OECC, 2013	10
Figura 2. Localización Regional de la Cuenca de Río Grande	18
Figura 3. Topografía, cuenca de Río Grande.....	19
Figura 4. Tipos de Clima Según Mckay.....	20
Figura 5. Subcuencas, Estaciones Meteorológicas e Hidrométricas, Cuenca Río Grande....	26
Figura 6. Formaciones Geológicas, cuenca de Río Grande.....	28

Figura 7. Capacidad Agrológica de los Suelos.....	30
Figura 8. Densidad y Distribución de la Población.....	33
Figura 9. Flujograma del proceso de modelación.....	35
Figura 10. Insumos ingresados al modelo SWAT.....	38
Figura 11. Escenarios de uso de la tierra y cobertura vegetal Años: 2000 – 2010 - 2070 .	43
Figura 12. Desempeño del modelo CCSM4 vs datos observados en la cuenca y registros históricos.....	43
Figura 13. Diagrama del Balance Hídrico en la cuenca de río Grande. Línea Base.....	59
Figura 14. Diagrama del Balance Hídrico en la cuenca de río Grande. Escenario RCP 2.6.	60
Figura 15. Diagrama del Balance Hídrico en la cuenca de río Grande. Escenario RCP 8.5.	62
Figura 16. Cambios en las variables del balance hídrico. Precipitación y evapotranspiración.....	67
Figura 17. Cambios en las variables del balance hídrico. Escorrentía superficial y flujo lateral.....	68
Figura 18. Cambios en la producción de agua y el caudal promedio anual.....	69
Figura 19. Disponibilidad de agua en la cuenca. Línea base y escenarios.....	71
Figura 20. Escasez del recurso hídrico en la cuenca, Línea base y escenarios.....	73

Gráficas

Gráfica 1 Curva Hipsométrica de la cuenca del Río Grande.....	12
Gráfica 2 Frecuencia de Altitud de la Cuenca de Río Grande.....	12
Gráfica 3 Perfil Altitudinal del Cauce de Río Grande.....	14
Gráfica 4 Climograma, cuenca de Río Grande.....	22
Gráfica 5 Numero de Lugar Poblado por Corregimiento.....	32
Gráfica 6 Estaciones climáticas por años de registro.	39
Gráfica 7 Estaciones hidrológicas por años de registro.	40
Gráfica 8 Comparación de uso de la tierra y cobertura vegetal: 2000-2010-2070.....	41
Gráfica 9 Precipitación total anual por estación – línea base y escenario de C.C.....	45
Gráfica 10 Caudales calibrados en la estación Río Grande 1983 - 2001.....	50
Gráfica 11 Caudales validados en la estación Río Grande 2001 - 2014.....	51
Gráfica 12 Caudales calibrados en la estación El Cortezo 1983 - 2014.....	51
Gráfica 13 Caudales validados en la estación El Cortezo 2011 – 2014.....	52
Gráfica 14 Caudales calibrados en la estación Cañaverál 1983 - 2010.....	52
Gráfica 15 Caudales validados en la estación Cañaverál 2001 – 2010.....	53
Gráfica 16 Caudales calibrados en la estación Murcielaguero 1983 - 2008.....	53
Gráfica 17 Caudales validados en la estación Murcielaguero 2001 – 2008.....	54
Gráfica 18 Uso de agua concesionada por subcuenca estado vigente (m ³ /s).....	56
Gráfica 19 Uso de agua concesionada por subcuenca en proceso de tramite (m ³ /s).....	57
Gráfica 20 Cambios en la precipitación. Línea base – Escenarios de cambio climático.....	63
Gráfica 21 Cambios en la escorrentía. Línea base – Escenarios de cambio climático.....	64

Gráfica 22 Cambios en la evapotranspiración. Línea base – Escenarios de cambio climático	65
Gráfica 23 Cambios en la producción de agua. Línea base – Escenarios de cambio climático	65
Gráfica 24 Cambios en el caudal promedio mensual. Línea base – Escenarios de cambio climático	66

Tablas

Tabla 1. Categorías del Índice de Escasez.....	17
Tabla 2. Lista de estaciones meteorológicas utilizadas, Cuenca 134.....	21
Tabla 3. Lista de estaciones meteorológicas utilizadas, Cuencas 136 y 105.....	21
Tabla 4. Distribución porcentual de precipitación media, periodo 1980-2015	22
Tabla 5. Temperatura media mensual, Periodo 1980-2015	22
Tabla 6. Promedio mensual de Humedad Relativa, Periodo 1980-2015	23
Tabla 7. Radiación Solar, Periodo 1980-2015	23
Tabla 8. Velocidad del viento, Periodo 1980-2015	23
Tabla 9. Características morfométricas, subcuencas de Río Grande	24
Tabla 10. Lista de Estaciones Hidrométricas en la Cuenca 134.....	25
Tabla 11. Caudales promedio mensuales y máximos en la estación Zaratí.....	25
Tabla 12. Caudales promedio mensuales y máximos en la estación Cañaverel.....	25
Tabla 13. Caudales promedio mensuales y máximos en la estación Río Grande	25
Tabla 14. Caudales promedio mensuales y máximos en la estación El Cortezo	26
Tabla 15. Geología de la cuenca de Río Grande, Formaciones Sedimentarias.....	26
Tabla 16. Geología de la cuenca de Río Grande, Formaciones Volcánicas	27
Tabla 17. Geología de la cuenca de Río Grande, Formaciones Plutónicas.....	27
Tabla 18. Capacidad Agrológica de los Suelos, Cuenca Río Grande.....	28
Tabla 19. Población y Viviendas en la cuenca de Río Grande, Según Censo de 2010.....	31
Tabla 20. Principales rubros del sector primario, cuenca de Río Grande.....	34
Tabla 21. Pendiente superficial del terreno (%)	36
Tabla 22. Característica de los suelos en base a perfiles	37
Tabla 23. Categorías de uso de la tierra y cobertura vegetal.....	37
Tabla 24. Categorías de uso de la tierra y cobertura vegetal (Bosque y No bosque).....	40
Tabla 25. Matriz de transición de cambio de uso del suelo 2000-2010	42
Tabla 26. Variación de precipitación entre línea base y escenarios de cambio climático, Cuenca 134	44
Tabla 27. Variación de precipitación entre línea base y escenarios de cambio climático, Cuenca 136	44
Tabla 28. Variación de precipitación entre línea base y escenarios de cambio climático, Cuenca 105	44

Tabla 29. Variación de temperatura media entre línea base y escenarios de cambio climático, cuenca 134.....	45
Tabla 30. Variación de temperatura media entre línea base y escenarios de cambio climático, cuenca 136.....	46
Tabla 31. Variación de temperatura media entre línea base y escenarios de cambio climático, cuenca 105.....	46
Tabla 32. Evaluación de la calibración a través de NSE, PBIAS y RSR.....	47
Tabla 33. Parámetros más sensibles de la calibración por orden de jerarquía	48
Tabla 34. Resultados de la calibración por estación.....	49
Tabla 35. Caudales totales con registros formales por uso en estado vigente hasta 2016	55
Tabla 36. Caudales totales con registros formales por uso en proceso de trámite hasta 2016	57
Tabla 37. Balance Hídrico Cuenca Río Grande, Periodo 1980-2015 (Línea Base)	58
Tabla 38. Balance Hídrico Cuenca Río Grande, Periodo 2016-2070 (Escenario 2.6).....	59
Tabla 39. Balance Hídrico Cuenca Río Grande, Periodo 2016-2070 (Escenario 8.5).....	61
Tabla 40. Periodos considerados dentro de la línea base y escenarios.....	62
Tabla 41. Disponibilidad de Agua en la Cuenca de Río Grande (m ³ /s).....	70
Tabla 42. Índice de Escasez Hídrica en la Cuenca de Río Grande (%)	72

LISTA DE ABREVIATURAS Y UNIDADES

C°	Grados Centígrados
ANAM	Autoridad Nacional del Ambiente
AR5	Vías de Concentración Representativas
AR5IPCC	Quinto Informe de Evaluación del Grupo de Expertos sobre el Cambio Climático
CARTAP	Catastro Rural de Tierras y Aguas de Panamá
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
CMNUCC	Convención Marco sobre el Cambio Climático
Csl	Pendiente del cauce en metros
Ct	Coeficiente de Torrencialidad
Dep	Profundidad del cauce en metro
ETESA	Empresa de Transmisión Eléctrica S.A
ETP	Evapotranspiración Potencial
ETR	Evapotranspiración Real
hab/km ²	Habitantes por kilómetro cuadrado
HRU	Unidades de Respuesta Hidrológicas
Ia	Índice de alargamiento
IDIAP	Instituto de Investigaciones Agropecuaria
Ie	Índice de Escasez
IHMEA	Instituto de Hidrología. Meteorología y Estudios Ambientales
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INEC	Insitituto Nacional de Estadística y Censo
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
IRHE	Instituto de Recursos Hidraulicos y Electrificación
kc	Coeficiente de Compacidad
kf	Factor de Forma
km	Kilómetros
km ²	Kilómetros cuadrados
l/seg	Litros por segundo
Len	Longitud del cauce en kilómetros
m/s	Metros por segundo
m ³ /s	Metros cúbicos por segundo
MED	Modelo de Elevación Digital
MIAMBIENTE	Ministerio de Ambiente
MJ/m ² /día	Megajoul por metro cuadrado por día
mm	Milímetros
MOLUSCE	Método para Evaluar el Cambio de Uso de la Tierra
Msnm	Metros sobre el nivel medio del mar
NCAR	Centro Nacional de Investigación Atmosférica
NSE	Nash - Sutcliffe (Eficiencia del modelo hidrológico)
OMM	Organización Meteorológica Mundial

PBIAS	Bias Porcentaje de Sesgo
PNGIRH	Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico
RCP's	Vias de Concentración de Gases Efecto Invernadero
RPCP	Región Pacífico Central de Panamá
SIG	Sistema de Información Geográfica
SII	Longitud de la Pendiente en metro
Slo	Pendiente de la Cuenca en Porcentaje (%)
SRTM	Misión Topográfica Shuttle Radar
SWAT	Herramienta para la Evaluación del Suelo y el Agua
Tc	Tiempo de Concentración
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
W/m ²	Unidad de Energia por Cantidad de Área
Wid	Ancho del cauce en metro

RESUMEN

Dentro del proceso de gestión integrada del recurso hídrico la cuenca hidrográfica constituye la principal unidad de intervención, al evaluar el potencial de sus recursos se busca que los tomadores de decisión dispongan de bases confiables que ayuden a identificar medidas correctoras que faciliten la gestión de las principales demandas.

Los modelos hidrológicos constituyen en la actualidad, una de las principales herramientas para generar información y conocer el estado del recurso hídrico, la capacidad de modelar escenarios considerando distintos actores y posibles impactos hacen de su uso un recurso valioso y necesario dentro de la gestión de cuencas.

El estudio se realizó en la cuenca de río Grande, cuya superficie es de 2384.2 km² donde el 51% del uso de la tierra corresponde a cobertura vegetal y 49% a otros usos de suelo. Es una de la diez (10) cuencas prioritarias de Panamá, cuyas sendas de desarrollo económico podrían estar marcadas por fuertes demandas futuras de agua considerando una serie de escenarios basados en usos actuales y futuros.

Para conocer el estado actual del recurso hídrico en la cuenca se utilizó la herramienta SWAT (Soils & Water Assessment Tool) al ser un modelo hidrológico semidistribuido permitió estimar balances hídricos a nivel espacial en trece (13) subcuencas de la cuenca principal. El modelo permitió evaluar escenarios al 2070 con posibles impactos del cambio climático para bajas emisiones (RCP 2.6) y altas emisiones (RCP 8.5) considerando variaciones en los parámetros precipitación y temperatura obtenidas del modelo climático global (CCSM4), además de cambios en el uso de la tierra a partir de transiciones potenciales. Los resultados del análisis del balance hídrico bajo escenarios de cambio climático, revelaron que para escenarios futuros en la temporada seca (diciembre – abril) habrá un incremento en las lluvias y en la temporada lluviosa (mayo-noviembre) los registros de precipitación serán más bajos que la normal, en cuanto a la tendencia a bajas y altas emisiones las condiciones de la cuenca son sensibles a medidas de mitigación.

El análisis de demandas de uso de agua en la cuenca, se hizo en base a registros formales de concesiones de agua tramitados en la Dirección de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográfica del Ministerio de Ambiente. Se clasifica como demandas vigentes a las extracciones actuales de agua y demandas en trámite a las que están en proceso de solicitud y no extraen agua de la cuenca. Entre los principales usos de agua en la cuenca están por orden de prioridad, el doméstico, agrícola, pecuario, turístico, industrial y generación eléctrica.

Para evaluar la disponibilidad y escasez de agua en la cuenca se estimó la disponibilidad a partir de volumen medio anual de escurrimiento en la salida de la cuenca menos el volumen actual comprometido aguas abajo. El análisis de disponibilidad de agua en la cuenca identificó que más del 35% de la superficie de la cuenca de río Grande no cuenta con disponibilidad del recurso hídrico. En cuanto a la escasez de agua en la cuenca los resultados muestran que el porcentaje de la oferta hídrica utilizado es bajo y no se experimentan presiones importantes en el recurso hídrico.

SUMMARY

Within the process of integrated management of water resources, the River Basin constitutes the main intervention unit, when it comes to evaluate the potential of its resources, it is sought that decision makers have reliable bases that help identify corrective measures that eases the management of the main demands.

Nowadays hydrological models constitute one of the main tools to generate information and conglomerate the current state of the water resource, the ability to model scenarios considering distinct factors and possible impacts to their use a valuable and essential resource regarding watershed management.

The study was performed in the Río Grande basin, whose surface area its 2384.2km² in which 51% of land use belongs to vegetative cover, and 49% to other soil uses. It is one of the ten (10) most important watersheds in Panama, whose paths of economic development may be subject for high future water demands, considering a series of scenarios based on actual and future use.

To get to know the current state of the hydric resource in the basin, the tool SWAT (Soil and Water Assessment Tool) was implemented, by being a hydrological model semi-distributed it allowed us to estimate water balances at spatial levels in 13 (thirteen) sub-basins of the main watershed.

The model permitted to evaluate scenarios until the year 2070 with possible impacts of climate change for low emissions (RCP 2.6) and high emissions (RCP 8.5) considering variations in the rainfall and temperature parameters obtained by the global climate model (CCSM4), in addition to changes in the land use from potential transitions. The results of the analysis of water balance under climate change scenarios, revealed that for future scenarios in the dry season (December – April) it will be an increase in rainfall and in the rainy season (May – November) the records in rain will be lower than usual, regarding the low trend and high emissions the conditions of the basin are sensitive to mitigation measures.

The analysis on use of water demand in the watershed it's made based on formal records of water concessions from the Directorate of Integrated Management of Hydrological Basins of the Ministry of Environment, classified as current demands that correspond to sites where water is currently extracted and demands in paper work status which are in process and do not extract water from the basin. Among the main uses of water in the basin are in order of priority, domestic use, agricultural use, livestock use touristic use, industrial and electricity generation use.

To evaluate the availability and scarcity of water in the basin, it was estimated that the availability from the average annual volume of runoff at the outlet of the basin minus the current volume compromised low waters. The analysis of availability of water in the basin, identifies that more than 35% of the surface of the watershed of Río Grande does not count on availability of the water resource. As for the scarcity of water in the basin, the results show that percentages of water supply offer are low, as in function of these, there is no significant pressure on the water resource.

1. INTRODUCCIÓN

Como unidad natural de intervención, en el manejo del recurso hídrico, la cuenca es un sistema dividido en distintas unidades fisiográficas que tienen comportamientos hidrológicos similares. El uso de modelos hidrológicos aporta de manera significativa al proceso de gestión del recurso hídrico, permiten conocer el estado de conservación de la cuenca y evaluar los impactos que en estas se dan por procesos naturales o por influencia de la actividad humana.

Los distintos procesos hidrológicos que forman parte del ciclo del agua tienen mucha influencia en la escorrentía superficial, la infiltración, el almacenamiento y el flujo lateral, los modelos hidrológicos buscan siempre simular la relación entrada-salida (precipitación-escorrentía).

La cuenca de Río Grande en Panamá tiene una superficie de 2384.2 km², por su tamaño se considera una cuenca intermedia-grande, la forman importantes ríos, en la parte alta nacen los ríos Chico, Coclé del sur y río Grande que son los que reciben las altas precipitaciones 3129.1 mm provenientes de la Cordillera Central. En el tramo medio de la cuenca se encuentran los ríos Zaratí, Churubé y Olá con precipitaciones promedios de 1885.8 mm reciben aportes de las subcuencas altas y confluyen con el río principal, abastecen importantes fuentes para uso doméstico (plantas potabilizadoras), uso agropecuario (sistemas de riego) y uso industrial (ingenios azucareros). El tramo bajo de la cuenca, lo forma las subcuencas de río Pocrí, Chorrera, Hondo y la desembocadura del río Grande en la Bahía de Parita las precipitaciones promedian los 1428 mm, en este tramo, se dan importantes concesiones de agua para uso industrial, acuícola, agrícola y del sector hotelero.

Para garantizar la administración eficiente y el uso sostenido del recurso hídrico, se requiere conocer la disponibilidad y la demanda de agua, a partir de esto establecer lineamientos que permitan gestionar su uso y atender las necesidades actuales generalmente asociadas a la escasez. Los cambios en el régimen hídrico, producto de la variabilidad climática y la contaminación ambiental a causa de malas prácticas, provocan la disminución de la disponibilidad hídrica, causando conflictos entre usuarios.

En ese sentido y con el fin de garantizar el uso del recurso hídrico, prioritariamente para el consumo humano, la producción agropecuaria y los otros usos, se requiere evaluar la disponibilidad actual y futura del agua en la cuenca mediante el uso de un modelo hidrológico, calibrado y validado que proporcione resultados confiables; partiendo de estos se logren establecer juicios y conclusiones razonables sobre el verdadero estado del recurso hídrico en la cuenca.

Se empleó un modelo semidistribuido que considera la estructura conceptual, la cual refleja los procesos físicos significativos a través de ecuaciones matemáticas semiempíricas. Los parámetros de estas ecuaciones se determinan por medio de la calibración. Tiene la

característica de ser flexible ante la variación espacial de todos los parámetros y divide el área de la cuenca en celdas. La distribución espacial que resulta corresponde a unidades de respuesta hidrológicas (HRU), las que depende del uso de la tierra, el tipo de suelo y la pendiente superficial del terreno.

1.1. ANTECEDENTES

Lo expresado en el Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos 2010-2030, presenta estrategias que abordan de forma nacional los principales problemas y desafíos de Panamá con relación al recurso hídrico, desde la perspectiva de la sostenibilidad, el desarrollo, la sociedad, la vulnerabilidad, el cambio climático, la institucionalidad y la gobernabilidad (ANAM, 2011).

El Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (PNGIRH), constituye un instrumento rector de todos los planes nacionales y locales que han de llevarse en el país identifica una serie de acciones a implementar y especifica hacia quienes van dirigidas.

Entre las acciones del PNGIRH se identificaron diez (10) cuencas prioritarias en Panamá, siendo la cuenca N° 134 de Río Grande, ubicada en el Pacífico Central una de estas. Las líneas de acción a ejecutar van desde la realización de estudios de línea base, la restauración ecológica, programas de educación ambiental, incentivar la participación comunitaria, desarrollar programas para el fortalecimiento institucional e implementar medidas de adaptación frente al cambio climático.

Los criterios utilizados para la selección de las cuencas prioritarias se hicieron en base a la concentración de la población, demandas de agua, escenarios conflictivos y vulnerabilidad ante el cambio climático. Con la elaboración del balance hídrico en estas diez cuencas en el 2008, se concluyó que solo la cuenca N°136 del río Antón presentaba déficit de agua y el resto de las cuencas (N° 102 río Chiriquí Viejo, N°106 río Chico, N°108 río Chiriquí, N°126 entre el Tonosí y La Villa, N°128 La Villa, N°132 río Santa María, N°134 río Grande, N°146 río Pacora y N°148 río Bayano), presentaban disponibilidad.

Al evaluar los registros de las estaciones hidrográficas que se encuentran dentro de las diez (10) cuencas, se comprobó que algunas cuencas presentan problemas de disponibilidad de agua durante el verano. El PNGIRH proyectó en las diez (10) cuencas lo que podría ser la demanda futura de agua a veinte (20) años, considerando una serie de escenarios basados en usos actuales y futuros, los que podrían darse mediante las diferentes sendas de desarrollo económico del país (continuismo, sostenibilidad, implosión). La proyección concluyó que el uso del recurso hídrico, para generación eléctrica es el escenario que marcó la mayor demanda. (ANAM, 2011)

Al hacer referencia al uso del agua en la cuenca de Río Grande es aprovechada para uno de los sistemas de riego más importante del país (Sistema de Riego El Caño), la principal

actividad económica en la cuenca es la ganadería extensiva y la agricultura, en esta última se presentan cultivos multivariados entre los que sobresalen, la producción de caña de azúcar por parte de ingenios azucareros, hortalizas, gramas, pastos, cultivo de arroz y frutales, existen concesiones para uso industrial (Nestle, Azucarera La Estrella) y usos acuícolas (fincas camaroneras).

Entre los problemas identificados en la cuenca están la presión a los bosques de manglar y galería, las inundaciones recurrentes por el desvío del cauce del Río Chico, la degradación del suelo, pérdidas de cobertura boscosa, mala planificación urbana, desnutrición infantil y altos índice de pobreza, deslizamientos y contaminación del agua por uso de agroquímicos, proliferación de porquerizas y gallineras y los vacíos institucionales para fortalecer la cultura ambiental. (ANAM, 2008).

En la cuenca de Río Grande se han elaborado oficialmente dos (2) balances hídricos, el primero en 1996 por el entonces Instituto de Recursos Hidráulicos y Electrificación (IRHE) y el segundo por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) a solicitud de la Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM) en el 2008.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Conocer el estado actual del recurso hídrico en la cuenca N°134 de Río Grande ubicada en la Región Pacífico Central de Panamá (RPCP), permite determinar acciones tendientes a ser incluidas en los procesos que se den por mejorar la gestión del recurso hídrico y hacer frente a los embates que puede ocasionar el cambio climático.

Para un adecuado aprovechamiento del recurso hídrico en la cuenca N°134 se requiere un análisis de oferta y demanda del agua, considerando los usos actuales y las demandas futuras.

La presión al recurso hídrico en la cuenca de Río Grande para satisfacer demandas relacionadas a proyectos de riego y generación eléctrica deben ser tomadas en cuenta, a fin de garantizar el uso, prioritariamente para el consumo humano y la producción agropecuaria, tal como lo indican las normativas vigentes.

Considerando que el balance hídrico realizado en el 2008 no identificó déficit de agua en la cuenca de Río Grande y la inconsistencia con los registros medidos por las estaciones hidrográficas que indican problemas de disponibilidad del recurso hídrico durante los meses de verano (ANAM, 2011), es pertinente conocer la demanda hídrica actual y a futuro a manera que los resultados sirvan de fundamento para implementar la nueva cartera de proyectos que serán incluidos entre las acciones correctoras a seguir para la gestión del recursos hídrico dentro de las diez (10) cuencas prioritarias de Panamá.

Uno de los lineamientos señalados dentro de las medidas de intervención por parte de las instituciones del estado y contemplado en el Plan Nacional de Gestión Integrada de

Recursos Hídricos 2010-2030 tiene que ver con desarrollar programas para el fortalecimiento de medidas de adaptación al cambio climático.

Por consiguiente, el presente estudio aportará resultados de gran importancia y persigue entre sus alcances:

- a) Obtener información que puede ser empleada en los estudios que buscan garantizar el abastecimiento de agua potable en la cuenca.
- b) Ampliar la línea base utilizada en las distintas acciones vinculadas con la instrumentación de políticas ambientales que busquen favorecer una mayor planificación del recurso hídrico.
- c) Diagnosticar medidas correctoras que aseguren un uso racional del recurso hídrico a nivel espacial y temporal.
- d) Diseñar propuestas estratégicas de gestión, para la rehabilitación de cuencas en espacios geográficos concretos.

1.3. IMPORTANCIA

A falta de información referente al estado actual del recurso hídrico en la región Pacífico Central de Panamá, es necesario generar datos que aporten resultados confiables para evaluar las condiciones de las cuencas que integran esta región, de esta manera se llega a obtener beneficios que pueden ser retroactivos de forma práctica a la gestión del recurso hídrico.

Existen en la actualidad modelos hidrológicos automatizados que permiten estimar la disponibilidad del recurso hídrico en una cuenca a exentas de situaciones que impidan disponer de la totalidad de los datos requeridos generalmente por métodos convencionales, una de las bondades de los modelos hidrológicos consiste en hacer análisis distribuidos espacialmente en la cuenca.

Para los balances hídricos previos realizados en la cuenca N°134 en el año 1996 y 2008 se emplearon métodos convencionales, el primero (IRHE, 1996) utilizó la metodología de balance hídrico superficial el cual se basa en los registros de precipitación y caudales medidos como los principales parámetros hidrológicos del balance, estimando pérdidas por evapotranspiración a partir de registros de estaciones Tipo "A" que miden de manera directa, posteriormente por diferencias de alturas se estima la evapotranspiración potencial (ETP) para el resto de la cuenca utilizando la correlación lineal entre dos estaciones.

Para obtener las pérdidas de agua en la cuenca por evapotranspiración, proceso donde el agua regresa a la atmósfera por la evaporación directa de la superficie del suelo y transpiración de las plantas se utilizó el método de Penman modificado, a partir de este se obtiene la evapotranspiración potencial (ETP) luego para pasar a la evapotranspiración real (ETR) se utiliza el diagrama de Holdridge.

El balance realizado por el en IMTA para el 2008 se basa en la ecuación de continuidad en donde la variación del volumen en el tiempo, es función del volumen entrante menos el volumen que sale del sistema (sistema hidrológico, cuenca, lago, etc.).

Ambos balances con distintos métodos permitieron conocer el estado actual del recurso hídrico en la cuenca N°134 para distintos periodos de años. El método que estima el balance hídrico superficial (IRHE, 1996), generó resultados del recurso hídrico en los seis (6) principales afluentes del Río Grande. Mientras que el método que estima el balance hídrico mediante la ecuación de continuidad (IMTA, 2008) permitió solo conocer el estado del recurso hídrico a nivel de toda la cuenca.

Considerando que la gestión del recurso hídrico depende de la relación de oferta y demanda en una cuenca, al utilizar un modelo hidrológico semidistribuido que evalúen a nivel espacial la oferta y demanda de agua se obtendrá información confiable que permite estimar la disponibilidad actual de agua en la cuenca y conocer los posibles impactos a futuro mediante condiciones de distintos escenarios de cambio climático.

Con el uso de los Sistemas de Información Geográficos (SIG) es posible procesar de forma automatizada los modelos de elevación digital (MED), al delimitar el parte aguas de la cuenca de Río Grande, se comprobó que en el balance hídrico (IRHE, 1996) se anexaron áreas de aportes que pertenecían a la cuenca de Río Veraguas (101) a las subcuenca de Río Chico y San Antonio, las superficies anexadas presentan un régimen de precipitación por el orden de los 3142.8 mm propio de la vertiente Caribe, a partir de este hallazgo queda en evidencia que los aportes de estas áreas influyeron en los resultados del balance.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la oferta y demanda del recurso hídrico en la cuenca N°134 del Río Grande, evaluando la disponibilidad actual y futura de agua.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el estado actual de la disponibilidad de agua en la cuenca hidrográfica N°134 del Río Grande
- Analizar la oferta y demanda del agua en la cuenca hidrográfica N°134 del Río Grande
- Conocer los posibles impactos del cambio climático en el recurso hídrico de la cuenca, bajo condiciones de escenarios adversos y favorables

2. REVISION DE LITERATURA Y MARCO REFERENCIAL

El balance hídrico permite conocer la disponibilidad del agua dentro de una cuenca, es fundamental para conseguir un uso más racional de los recursos hídricos tanto nivel espacial como temporal.

Ayuda a entender los cambios que se producen en los regímenes de ríos, lagos y cuencas hidrográficas, su conocimiento es muy importante para el estudio del ciclo hidrológico.

Con los resultados del balance hídrico es posible comparar la disponibilidad del recurso hídrico con que cuenta un determinado sistema en diferentes periodos de tiempo permitiendo obtener de forma indirecta cualquier componente desconocido por diferencia de los componentes conocidos, (UNESCO, 1981).

2.1. EL CICLO HIDROLÓGICO

Se denomina ciclo hidrológico al conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado sólido, líquido gaseoso, como en su forma agua superficial, agua subterránea. Es completamente irregular y contra esas irregularidades lucha el ser humano. Como todo ciclo no tiene ni principio ni fin, su descripción puede comenzar en cualquier punto (Villón, 2011).

Los componentes del ciclo hidrológico se describen a continuación:

- **Precipitación**

Es el resultado del enfriamiento del vapor de agua, producto de la evapotranspiración, cuando es levantado por las masas de aire caliente que al contacto con el aire frío de los niveles superiores de la atmosfera se condensa, precipitando a la tierra en forma de lluvia (Raasveldt et al 1957).

- **Evaporación y Evapotranspiración**

Proceso por el cual el agua pasa del estado líquido en que se encuentran en los almacenamientos, conducciones, en el suelo, en las capas cercanas a la superficie, al estado gaseoso y se transfiere a la atmosfera. (Aparicio, 1989).

Es una etapa permanente del ciclo hidrológico se da en todo momento y en toda superficie húmeda, es un fenómeno puramente físico, existe otra evaporación provocada por la actividad de las plantas que recibe el nombre de evapotranspiración. (Raasveldt et al 1957).

- **Infiltración y Percolación**

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del suelo hacia el interior de este. Físicamente significa velocidad de entrada del agua hacia el interior del suelo. La infiltración de agua que profundiza en el perfil del suelo, se denomina percolación y se conoce en dos formas, flujo subsuperficial y agua freática y subterránea. (Raasveldt et al 1957)

- **Escorrentía**

Se da cuando la velocidad de caída del agua es mayor que la velocidad de infiltración, en el caso contrario se produce almacenamiento de agua el cual sustenta la continuidad del caudal. (Raasveldt et al 1957)

- **Flujo Lateral**

Agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos, fluye subsuperficialmente y alimenta las quebradas y los ríos, es calculado con la percolación hasta los dos (2) metros de profundidad, mediante un modelo de almacenamiento cinético que usa la ecuación de las masas o también llamada ecuación de la continuidad, establece que para cualquier volumen y en cualquier periodo de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionadas, por la variación del volumen de agua almacenada. (UNESCO, 1981).

Balance hídrico es la cuantificación de los parámetros involucrados en el ciclo hidrológico de un determinado cuerpo de agua, sirve para conocer el movimiento del agua en diferentes estados. La estimación es compleja por la falta de medidas directas y la distribución espacial de las variables. Se estima mediante la siguiente expresión:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Donde:

SW_t =	Contenido final de agua en el suelo (mm)
SW_0 =	Contenido inicial de agua del suelo en un día i (mm)
R_{day} =	Cantidad de precipitación en un día i (mm)
Q_{surf} =	Cantidad de escorrentía de la superficie en un día i (mm)
E_a =	Cantidad de evapotranspiración en un día i (mm)
W_{seep} =	Cantidad agua percolada en un día i (mm)
Q_{gw} =	Cantidad de flujo subterráneo en un día i (mm)

Uno de los parámetros prioritarios dentro del balance hídrico es la precipitación que en términos físico es el resultado del enfriamiento del vapor de agua producto de la evapotranspiración, cuando lo levantan las masas de aire caliente que al entrar en contacto con el aire frío de los niveles superiores de la atmósfera se condensa para luego precipitarse en forma de lluvia, esto constituye la principal entrada de agua a la tierra.

Otro factor de gran importancia es la interceptación que corresponde al proceso mediante el cual la lluvia es atrapada y retenida por el follaje, cuando la lluvia se produce, parte de esta es retenida en la copa de los árboles, una porción se evapora y el resto pasa al suelo.

Dentro del balance hídrico también es importante considerar los procesos de infiltración que se da cuando el agua penetra desde la superficie del suelo hacia el interior de este, aquí adquiere un lugar importante la escorrentía, ya que se da cuando la velocidad de caída del agua es mayor que la capacidad de infiltración de los suelos. Cuando la escorrentía disminuye se produce almacenamiento de agua el cual es la base para la continuidad del caudal.

2.2. MODELOS HIDROLOGICOS

Un modelo hidrológico es una representación simplificada de un sistema natural muy complejo. Un sistema natural suma elementos los cuales definen relaciones temporales entre la entrada y la salida del sistema. Los sistemas hidrológicos forman parte de los sistemas naturales (Bloeschl et al 1995).

Los modelos hidrológicos son representaciones matemáticas del flujo de agua y sus componentes, en alguna parte del ambiente superficial y subterráneo (Maidment, 1996).

Se clasifican en modelos 3D y 2D dependiendo de su componente espacial, esto hace que sean categorizados en modelos especiales para: cuencas, canales y secciones de ríos, acuíferos, lagos y estuarios. (Birkel, 2008).

Existen dos categorías generales

- Material

Representación física de la cuenca con propiedades similares a las del prototipo, simuladores de lluvia y cuencas experimentales.

- Formal

Abstracción matemática que preserva las propiedades estructurales importantes de la cuenca se le llama modelo matemático.

2.3. CAMBIO CLIMÁTICO

Se entiende por clima el comportamiento medio observado a través de los años, de las variables meteorológicas que describen el estado del tiempo (IPCC, 1995).

Cuando ese comportamiento cambia de manera permanente, se dice que ha ocurrido un cambio climático. El clima regula las actividades agropecuarias, la oferta hídrica, la cobertura vegetal, el hábitat de especies animales y vegetales, los hábitos de las personas y en casos de cambio extremo, incrementa la vulnerabilidad por el aumento de sequías, inundaciones, incendios forestales, tormentas, heladas, y otros tantos relacionados con el estado del tiempo (Magaña, et al. 2004).

El cambio climático es una variación estadísticamente significativa, ya sea de las condiciones climáticas medias o de su variabilidad, que se mantiene durante un periodo prolongado (generalmente durante decenios o por más tiempo). El cambio del clima puede deberse a procesos naturales internos o a un forzamiento externo, a cambios duraderos en la composición de la atmósfera o modificaciones en el uso del suelo, resultado de las actividades humanas (IPCC, 1995).

La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como el "cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial y que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables".

La CMNUCC hace distinción entre "cambio climático", atribuible a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera y "variabilidad del clima", atribuible a causas naturales (IPCC, 2013).

En el quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (AR5-IPCC), se establece que el nivel de riesgo ante el cambio climático en sistemas físicos como ríos y lagos, las inundaciones y/o sequías en Centro y Sudamérica,

es considerado como bajo actualmente, sin embargo se indica que hacia el 2080 podrá aumentar a niveles alto o muy alto, limitando en gran medida las capacidades adicionales necesarias para que la adaptación logre reducir el riesgo. (IPCC, 2013).

2.3.1. ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Las proyecciones climáticas sirven a menudo como materia prima para la construcción de escenarios climáticos, pero los escenarios climáticos requieren información adicional, por ejemplo, acerca del clima observado en un momento determinado. Un escenario de cambio climático es la diferencia entre un escenario climático y el clima actual (IPCC, 2001).

Un escenario climático es una representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basada en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construye para ser utilizada de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico y que sirve a menudo de insumo para las simulaciones de los impactos (IPCC, 2001).

Para evaluar los impactos del cambio climático actual se utilizan las AR5, denominados "Vías de Concentración Representativas", por sus siglas en inglés RCP's, describen líneas de concentración de gases efecto invernadero y concentraciones de aerosoles que junto al cambio de uso de suelo, permiten obtener resultados climáticos. Las RCP's son caracterizadas por el forzamiento radiactivo producido a finales del siglo XIX, el forzamiento radiactivo es el calor extra de la baja atmosfera que será retenido por efecto de los gases efecto invernadero adicionales, es medido en unidades de energía por cantidad de área W/m².

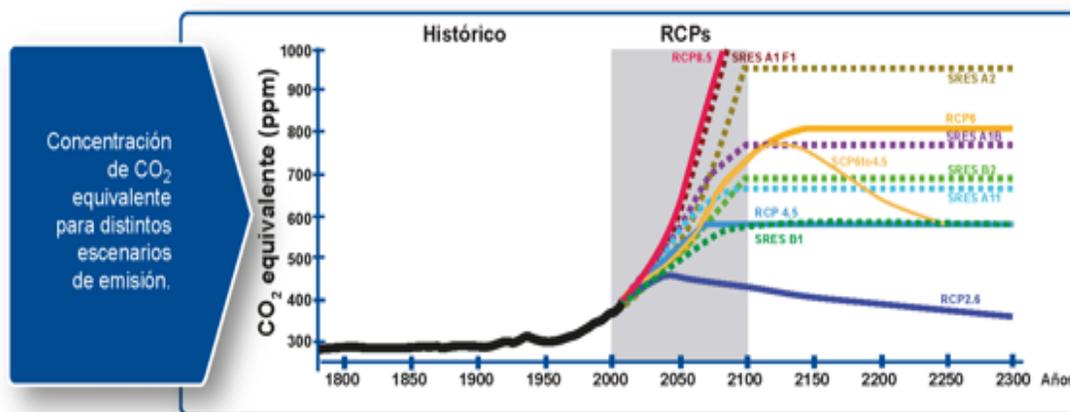


Figura 1. Evolución de la concentración de CO₂, por escenario hasta el 2300, Fuente: OECC, 2013

A pesar de que en las distintas regiones los cambios en la precipitación no serán uniformes, existe confianza que hacia el 2080, bajo el escenario RCP 8.5 (que corresponde a un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero), los valores anuales de precipitación tiendan a aumentar en muchas regiones húmedas de latitudes medias (IPCC, 2013).

2.4. MORFOMETRIA DE CUENCA

2.4.1. CARACTERISTICAS MORFORMETRICA CUENCA DE RÍO GRANDE

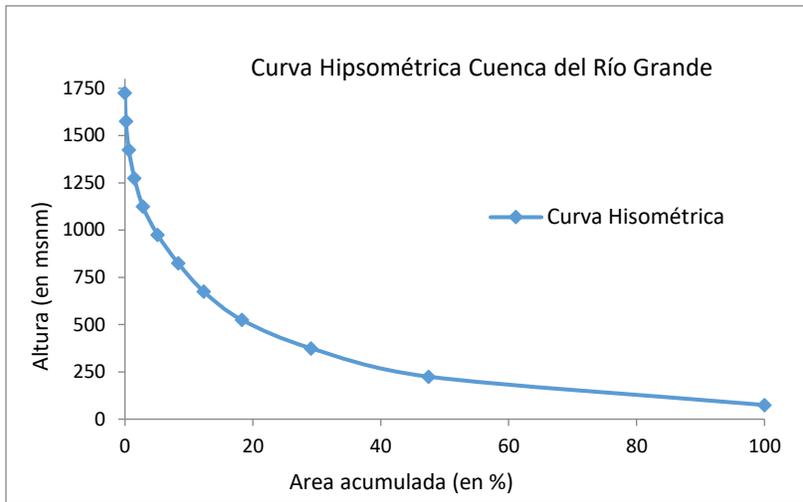
El río Grande realiza un recorrido total de 97.2 km en sentido oeste-este para después cambiar de dirección hacia el sur, su curso sirve de límite entre los distritos de Natá, Olá, La Pintada y Penonomé, los mayores aporte los recibe por los afluentes localizados en su margen Este entre los que se puede mencionar los ríos; Potrero, Perekabé, Pinta Vieja, Marica, El Chorro, Cañazuela, Zaratí, Chorrera, Honda, Las Lajas. Por su margen Oeste recibe las aguas de los ríos; Chico, Olá y Pocrí, nace a una altura de 1542 msnm en el Cerro Pixvae, sus aguas desemboca en la Bahía de Parita en el Océano Pacífico, la cuenca tiene una superficie total de 2384.2 km².

2.4.2. RELACIÓN DE ALTURA Y DISTRIBUCION ALTITUDINAL

La altura promedio determinada es de 248.2 msnm con una mínima de 2 en el área de la desembocadura en los manglares de Arenas Blanca, la altura máxima de la cuenca alcanza 1688 msnm en Cerro Pixvae en la Cordillera Central. La gran variación de altura da origen a diversos tipos morfológicos de suelo y de vegetación que varían entre el bosque pluvial montano bajo y el bosque seco tropical.

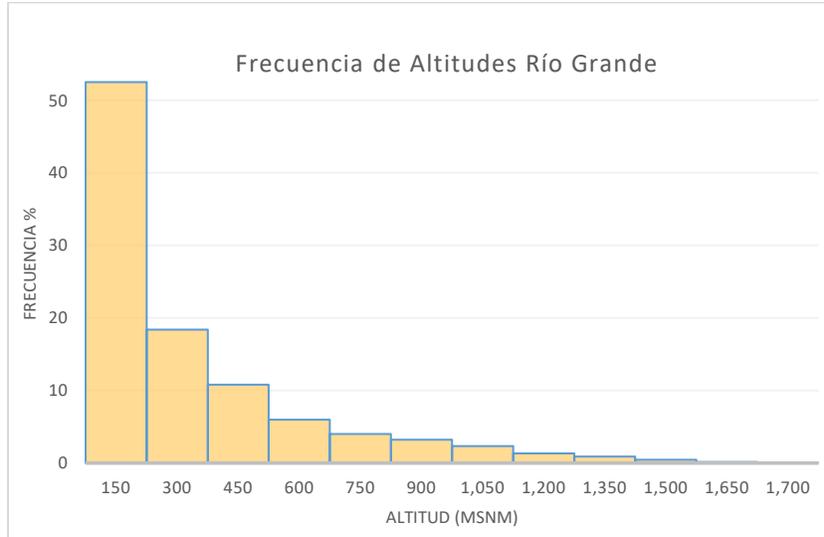
La curva hipsométrica presenta la relación entre la altura promedio y la mediana de elevación que corresponde a la cota sobre la cual se encuentra el 50% del área de la cuenca, como lo muestra la gráfica la altura 50% se encuentra en el punto 248.2 msnm, lo que indica que el 50% de la superficie de la cuenca se encuentra bajo esa altura.

Los resultados de la curva hipsométrica indican que la cuenca de río Grande está en una fase de vejez.



Gráfica 1 Curva Hipsométrica de la cuenca del Río Grande

La distribución de las alturas de una cuenca indica algunas características como el devenir de los caudales en la sección fluvial y en los puntos de concentración. La grafica de frecuencia de altitudes indica que el 52.5% de la superficie (1251.7 km²), presentan elevaciones que están entre 0 y 150 msnm, 29.2% de la superficie (696.2 km²) se encuentra en elevaciones que están entre los 300 y 450 msnm.



Gráfica 2 Frecuencia de Altitud de la Cuenca de Río Grande

2.4.3. ANALISIS DE FORMA

La forma determina la manera en la que el escurrimiento superficial llega al cauce principal desde el nacimiento hasta la desembocadura, es un factor importante en el tiempo de concentración de la escorrentía.

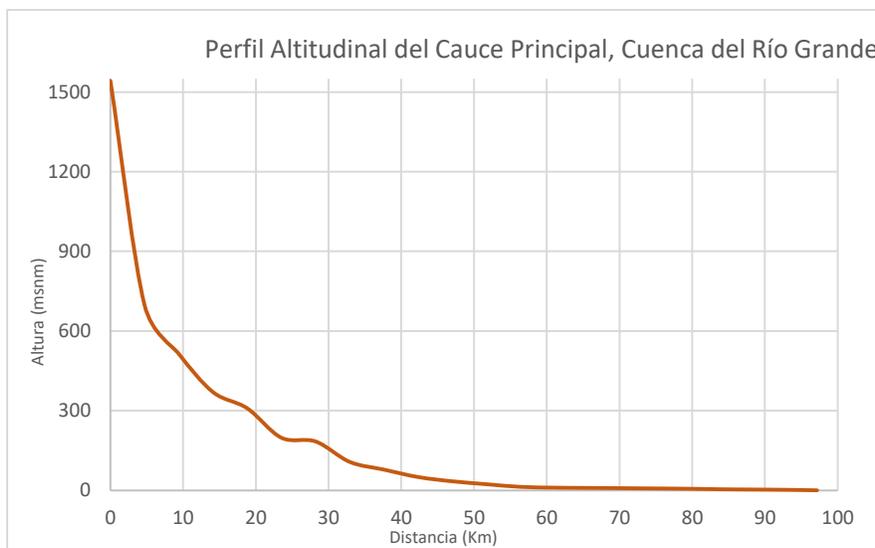
El factor de forma (k_f) es un valor que está determinado por la relación del ancho promedio y la longitud axial de la cuenca. Para la cuenca del río Grande se determinó un factor de forma de 0.25 que la clasifica dentro de cuencas alargadas, se obtuvo en base a una longitud axial de 97.16 km y a una superficie de 2384.2 km², el resultado indica que la probabilidad de que se presente una crecida en un área de tamaño significativo en la cuenca es baja y se reduce considerablemente el riesgo de torrencialidad.

El coeficiente de compacidad (k_c) relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo se relaciona con la torrencialidad de la cuenca y con el tiempo de concentración. Para un perímetro de 296.30 km se determinó el valor de 1.69 que indica que se trata de una cuenca de una forma oval oblonga a rectangular oblonga, tiene un tiempo de concentración medio, presenta frecuencia de torrencialidad media tal como casos de inundación y desbordes y otros fenómenos asociados a la torrencialidad.

El índice de alargamiento (I_a) corresponde a la relación entre la longitud máxima y el ancho máximo medido perpendicularmente, dio un valor de 1.21 para una longitud máxima de 97.16 km y un ancho máximo de 80.2 km que indica que se trata de una cuenca moderadamente alargada.

2.4.4. PERFIL Y PENDIENTE PROMEDIO DEL CAUCE

La pendiente promedio de la cuenca del río Grande es de 16.7%. Anteriormente se indicó que la longitud del cauce principal es la distancia desde el nacimiento del río hasta la desembocadura, en el caso del río Grande esta distancia es de 97.2 km, la pendiente promedio del cauce a través de todo el recorrido es de 0.02 m/m mientras que la altura promedio es de 70 m.



Gráfica 3 Perfil Altitudinal del Cauze de Río Grande

2.4.5. PARAMETROS RELATIVOS AL DRENAJE

La cuenca del río Grande es una cuenca del orden 6 según el método de Strahler, los cursos de agua de orden 1 suman 775.26 kilómetros, la densidad de drenaje (Dd) para estos cursos es de 0.33 Km/Km² y el coeficiente de torrencialidad (Ct) es de 0.19 corrientes por km².

El tiempo de concentración (Tc) corresponde al tiempo que requiere el agua para recorrer los 97.2 km de longitud, se estimó utilizando la fórmula de Kirpich (California) en 21.35 horas, lo que indica que las descargas de agua son relativamente lenta dentro de la cuenca.

2.5. USO DE SUELO ACTUAL Y CAMBIO DE USO DE SUELO

La superficie terrestre o la cobertura de suelo de la tierra y sus cambios, constituyen un componente importante para un gran número de procesos biofísicos que participan en el cambio global. La cobertura del suelo ha sido definida por muchos atributos de la superficie de suelo de la Tierra y su inmediata sub-superficie: incluyendo la biota, suelo, topografía, superficie, agua subterránea y las estructuras antropogénicas (Turner, 2006).

La conversión de la cubierta terrestre constituye el reemplazo de un tipo de cobertura por otro y es medida por una transición de una categoría de cubierta de suelo a otra, como es el caso de la expansión agrícola, la deforestación, o el cambio en la extensión urbana. Cualquiera sea el cambio en la cobertura de suelo, ello conlleva cambios en la diversidad biótica, productividad primaria actual y potencial, calidad de los suelos, escorrentía y tasas de sedimentación, así como otros atributos de la superficie terrestre (DeFries et al., 2004).

La cubierta del suelo y sus cambios son fuentes y sumideros para la mayoría de los materiales y flujos de energía que sostienen la biosfera y la geosfera, incluyendo trazas de las emisiones de gas y el ciclo hidrológico (Meyer et al., 1998; Kabat et al., 2004; Canadell et al., 2006).

Los cambios en la cobertura del suelo contemporáneos son generados principalmente por la actividad humana, actividad dirigida a la presión de la superficie terrestre para satisfacer alguna necesidad, requerimiento individual o de la sociedad, como la agricultura (Cassman et al., 2005).

2.6. ESCASEZ Y DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO

Las cuencas hidrográficas brindan un flujo de bienes y servicios ambientales que son importante preservar, la disponibilidad de estos bienes son necesarios para que un territorio alcance metas económicas, sociales y ambientales (WRI, 2003).

Además de ser un valioso elemento de consumo humano y de bienestar para los seres vivos es importante en la producción de distintos sectores de la economía, razón por la que se hace necesario disponer de un indicador de su estado y que a la vez permita conocer la magnitud de su oferta por unidad hidrológica como su relación con la demanda existente, esta relación se conoce como "Índice de Escasez". (IHMEA, 2004).

En los casos donde la demanda de agua represente más del 20% de la oferta disponible en una unidad hidrológica. El índice de escasez "Ie" permite que se puedan activar las señales necesarias para implementar las acciones tendientes a la gestión del recurso hídrico.

La precisión de este indicador va a depender de la disponibilidad de registros históricos de caudales y de la información detallada de los sitios de demanda de agua por uso o actividad económica, la disponibilidad de esta información no impide que el índice sea aplicado en sitios donde no se pueda contar con esta información en estos casos se pueden utilizar criterios de regionalización, espacialización de la información hidrológica que son avalados por organismos internacionales (UNESCO, OMM).

En función de esto es imprescindible conocer la cantidad de agua disponible ofrecida por la fuente abastecedora como los niveles de demanda además de las condiciones necesarias para mantener el estado de salud de la fuente (caudal ecológico). Lo que significa que además de interpretar la disponibilidad de agua en función del consumo, en la fuente abastecedora debe quedar remanentes de agua que garanticen los caudales mínimos históricos que garanticen la salud del ecosistema.

El índice de escasez se establece en función de la siguiente relación:

$$I_e = \frac{D}{O_n} \times 100\%$$

Donde:

I_e Índice de Escasez (%)

D Demanda de agua (m³)

O_n Oferta hídrica superficial neta (m³)

La oferta hídrica superficial neta es el resultado de la siguiente expresión:

$$O_N = O_t \times R_e \times R_f$$

Donde:

O_t Oferta hídrica superficial total (m³)

R_e Factor de reducción para mantener el régimen del estiaje (m³)

R_f Factor de reducción para protección de fuentes frágiles (m³)

Lo planteado en la formula anterior indica que el índice de escasez requiere de cuatro elementos conceptuales, tres de ellos están relacionados con las categorías de oferta hídrica superficial y el restante con el agua demandada por los distintos usos.

Valoración del Índice de Escasez

Existe escasez de agua cuando el agua que se toma de la fuente causa conflictos entre el abastecimiento para consumo humano, los servicios ecosistémicos y los otros usos.

A nivel mundial se han establecido cuatro (4) categorías con umbrales definidos según el nivel crítico de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico.

Tabla 1. Categorías del Índice de Escasez

Categoría del Índice de Escasez (Ie)	Porcentaje de la Oferta Hídrica Utilizada	Color	Explicación
Alto	> 40 %	Rojo	Existe fuerte presión sobre el recurso hídrico, denota una urgencia máxima por el ordenamiento de la oferta y la demanda. En estos casos la baja disponibilidad del agua es un factor limitador del desarrollo económico.
Medio	20 - 40 %	Naranja	Cuando los límites de presión exigen entre el 20 y el 40% de la oferta hídrica disponible es necesario el ordenamiento tanto de la oferta como de la demanda. Es menester asignar prioridades a los distintos usos y prestar particular atención a los ecosistemas acuáticos, para garantizar que reciban el aporte hídrico requerido para su existencia. Se necesitan inversiones para mejorar la eficiencia en la utilización del recurso hídrico
Moderado	10 - 20 %	Amarillo	Indica que la disponibilidad de agua se está convirtiendo en un factor limitante del desarrollo
Bajo	< 10 %	Verde	No se experimentan presiones importantes sobre el recurso hídrico

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IHMEA, 2004

Disponibilidad del Recurso Hídrico

La disponibilidad de agua en una cuenca se ve afectada por factores naturales y antrópicos, las alteraciones no solo afectan la cantidad sino también la disponibilidad y la funcionalidad ecosistémica del recurso.

Para calcular la disponibilidad del recurso hídrico se tomó como referencia la metodología ajustada en la "Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-200 para la Conservación del Recurso Agua", que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, en este sentido se tomó como referencia la relación de la fórmula que establece:

$$Disp (m^3) = Vesc (m^3) - Vcomp (m^3)$$

Donde:

$Disp (m^3)$ = Disponibilidad media anual de agua superficial en la cuenca

$Vesc (m^3)$ = Volumen medio anual de escurrimiento en la salida de la cuenca

$Vcomp (m^3)$ = Volumen actual comprometido aguas abajo

La expresión V_{esc} (m^3) se obtienen de la "Producción de Agua" de cada subcuenca la cual es estimada por SWAT mediante la interrelación de variables del balance hídrico (flujo base, flujo lateral y escurrimiento superficial). Mientras que V_{comp} (m^3) corresponde al "Volumen de Agua Concesionada" en la subcuenca. Dentro de este volumen concesionado no se deben considerar los usos no consuntivos.

3. METODOLOGIA

3.1. CARACTERISTICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca hidrográfica del río Grande se localiza en la vertiente pacífica de la Región Central de Panamá, es jurisdicción de los distritos de Penonomé, Natá, La Pintada, Olá, Aguadulce y Antón los que administrativamente forman parte de la provincia de Coclé y del distrito de Calobre que es parte de la provincia de Veraguas. Se ubica dentro de las coordenadas planas extremas siguientes:

Norte	961660	Este	595164
Sur	904597	Oeste	516042

El área total de la cuenca hidrográfica es de 2384.2 km², por la extensión de su superficie es considera una cuenca intermedia - grande, el río nace a una altura de 1542 msnm, con el nombre de Río Grande, su cauce principal tiene una longitud de 97.2 km hace un recorrido en sentido oeste-este para después cambiar de dirección hacia el sur, avanzando de noreste a suroeste hasta desembocar en la Bahía de Parita.



Figura 2. Localización Regional de la Cuenca de Río Grande

3.1.1. TOPOGRAFÍA

En cuanto a las formas del relieve el 45% de la cuenca de Río Grande corresponde a regiones bajas y planicies litorales, este tipo de relieve presenta elevaciones entre 0 a 100 msnm. Dentro de estas formas de relieve están las subcuencas de Río Hondo, Río Pocrí, el tramo bajo de río Chico, Río Olá y Churubé, Río La Chorrera y el tramo bajo del Río Zaratí.

Los cerros y colinas son otra formas de relieve presente en la cuenca, sus elevaciones van desde los 200 a 800 msnm, ocupan 48% de la superficie, las subcuencas que se caracterizan por este relieve son el tramo alto de Río Chico, las partes medias de los ríos Grande, El Harino y El Potrero y la parte alta de los ríos Coclé del Sur y Zaratí.

Las regiones de montañas son las que menos superficie ocupan dentro de la cuenca con elevaciones que van desde 1200 a 2200 msnm, representan el 7% de la superficie, entre las subcuencas que tienen estas formas de relieve están las partes altas de Río Grande, El Harino y río El Potrero.

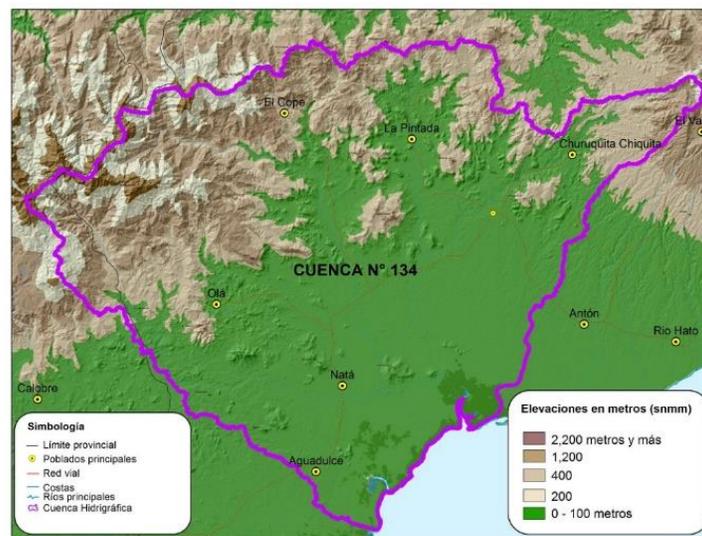


Figura 3. Topografía, cuenca de Río Grande

3.1.2. CLIMA

El clima de una región está condicionado por distintos elementos, entre los que están la temperatura, las precipitaciones, la presión atmosférica y los vientos. Estos elementos varían de una región a otra y su variación se da por factores como la distancia al Ecuador, la altitud y la distancia al mar. Conocer las principales características de estos elementos ayuda a interpretar las condiciones climáticas existentes en el área de la cuenca.



Figura 4. Tipos de Clima Según Mckay

De acuerdo al sistema de clasificación de Mckay, el 59% de la cuenca de Río Grande se encuentra dentro del Clima Tropical con estación Seca Prolongada, este tipo de clima presenta temperaturas medias que van de 27 a 28 °C, los registros pluviométricos son inferiores a 2500 mm considerados los más bajos de todo el país, presenta fuertes vientos, nubosidad media y alta, humedad relativa baja y fuerte evaporación.

El clima Subecuatorial con estación seca ocupa el 36% de la cuenca, es el clima predominante en Panamá, es cálido con predominio anuales de temperaturas que van desde 26.5 a 27.5 °C, se encuentra en las tierras bajas y montañosas, los niveles de precipitación son elevados, cercanos o superiores a los 2500 mm y alcanza los 3519, es un clima de extensión seca corta y acentuada con tres a cuatro meses de duración.

Dentro de la cuenca también se presenta el clima Tropical de Montaña Baja, representa el 3% de la superficie total de la cuenca, es un clima fresco muy lluvioso sin estación seca, en alturas de 1450 msnm la temperatura promedio anual llega a 18°C y los totales pluviométricos anuales a 3710 mm.

El Clima Tropical Oceánico tiene influencia en la cuenca, se extiende en las tierras bajas de la vertiente del Caribe, los promedios anuales de temperatura ascienden a los 25 y 27°C los totales de precipitación son elevados llegan a alcanzar los 4365 mm, este clima no posee estación seca y en todos los meses caen más de 100 mm de lluvia. (ATLAS AMBIENTAL – ANAM, 2009).

Para el análisis del clima se utilizó información proveniente de estaciones meteorológicas ubicadas dentro y fuera de la cuenca, los registros pertenecen a la Gerencia de Hidrometeorología de la Empresa de Transmisión Eléctrica S.A (ETESA).

Tabla 2. Lista de estaciones meteorológicas utilizadas, Cuenca 134

Cuenca del Río Grande (134)								
Número	Nombre	Estado	Tipo de Estación	Elevación (msnm)	Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	X	Y
134-001	El Cortezo	Inactiva	CC	60	8.350	-80.600	544041.6	923013.6
134-002	El Harino	Inactiva	CC	185	8.616	-80.550	549512.8	952427.8
134-003	Río Grande	Activa	CC	20	8.417	-80.483	556914.3	930435.9
134-004	El Cope	Activa	AM	400	8.624	-80.581	546100.9	953308.4
134-005	La Pintada	Inactiva	CC	60	8.583	-80.450	560521.2	948793.7
134-008	Sonadora	Activa	CC	168	8.550	-80.333	573402.6	945165.6
134-019	Las Huacas	Activa	CC	440	8.467	-80.750	527517.6	935934.9
134-020	Río Hondo	Activa	CC	22	8.367	-80.367	569693.6	924926.7
134-021	Las Lajas	Inactiva	CC	58	8.467	-80.367	569675.8	935982.7
134-022	Puerto Posada	Activa	CC	15	8.367	-80.400	566060.2	924921
134-023	Las Sabanas	Activa	CC	700	8.567	-80.683	534883.3	946995.8
134-024	Ola	Activa	CC	100	8.417	-80.650	538529.7	930415.5
134-025	Llano Grande	Inactiva	CC	100	8.633	-80.450	560513.3	954321.7
134-026	Churuquita G.	Inactiva	CC	200	8.617	-80.267	580652	952586.5

Fuente: Empresa de Transmisión Eléctrica S.A - ETESA, Gerencia de Hidrometeorología

Tabla 3. Lista de estaciones meteorológicas utilizadas, Cuencas 136 y 105

Cuenca Río Antón (136)								
Número	Nombre	Estado	Tipo de Estación	Elevación	Latitud	Longitud	X	Y
136-001	El Valle	Activa	CC	580	8.621	-80.160	592425	953053
Cuenca Río Coclé del Norte (105)								
Número	Nombre	Estado	Tipo de Estación	Elevación	Latitud	Longitud	X	Y
105-002	Chiguirí Arriba	Activa	CC	328	8.673	-80.188	589442	958685.4
105-004	Tambo	Inactiva	CC	194	8.650	-80.283	578884.6	956231.8
105-005	Toabre	Activa	CC	354	8.641	-80.349	571624.6	955223.7
105-013	Bateales	Inactiva	CC	390	8.725	-80.566	547738.6	964476.6
105-015	Palmarazo	Inactiva	CC	348	8.733	-80.654	538057.9	965351.1

Fuente: Empresa de Transmisión Eléctrica S.A - ETESA, Gerencia de Hidrometeorología

Precipitación

La precipitación en la cuenca se divide en dos estaciones, la estación lluviosa que va de mayo a noviembre, en estos meses las lluvias más intensas se dan al final de la estación, los siete meses de la estación lluviosa concentran el 90.3% de las lluvias que caen en la cuenca, con registros mínimos en el mes de julio.

La estación seca dentro de la cuenca va desde diciembre - abril en estos cinco meses la lluvia solo representa el 9.7% del total anual, los meses de febrero y marzo son los meses más secos.

Tabla 4. Distribución porcentual de precipitación media, periodo 1980-2015

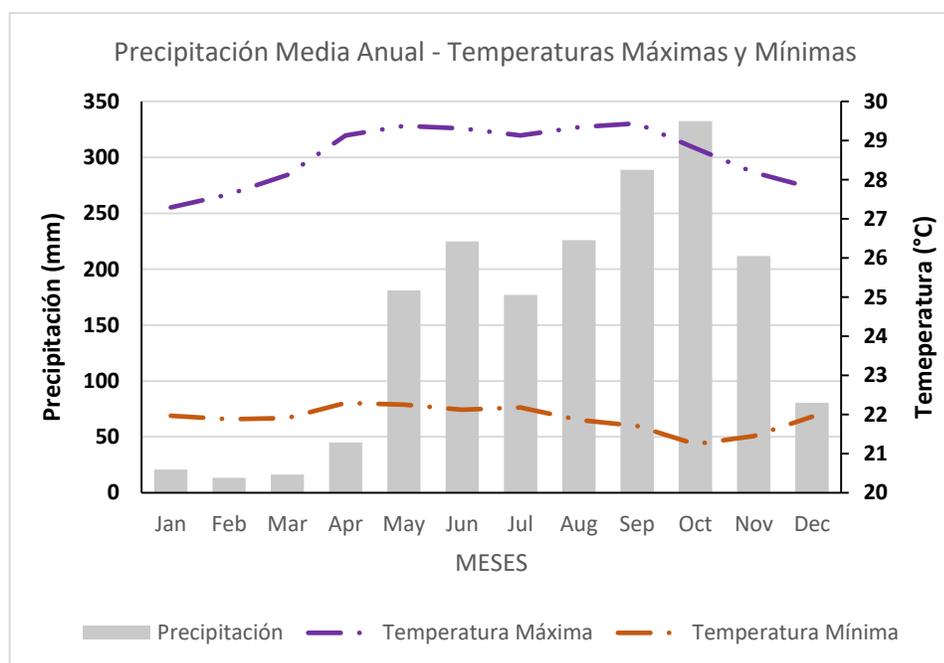
Precipitación	Meses												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Promedio Anual (mm)	20.9	13.4	16.15	44.85	181	224.8	177	226	289	332.6	211.9	80.5	1817.98
%	1.15	0.74	0.89	2.47	9.97	12.36	9.74	12.43	15.88	18.29	11.66	4.43	100.00

Temperatura

La temperatura media anual en la cuenca es de 26.3°C, los valores más altos se dan en el mes de abril 27.1°C y los valores mínimos en los meses de octubre noviembre y diciembre, la amplitud térmica mensual varía en promedio por los 6.7°C y es más acentuada entre los meses de mayo a octubre cuando inicia la estación lluviosa en la cuenca.

Tabla 5. Temperatura media mensual, Periodo 1980-2015

Temperatura °C	Meses												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
Promedio	25.8	26.0	26.7	27.1	26.9	26.5	26.3	26.3	26.0	25.9	26.0	25.8	26.3
Máxima	27.2	27.6	28.1	29.1	29.3	29.3	29.1	29.3	29.4	28.8	28.1	27.7	28.6
Mínima	21.9	21.8	21.9	22.3	22.2	22.1	22.1	21.8	21.7	21.2	21.4	21.9	21.9



Gráfica 4 Climograma, cuenca de Río Grande

Humedad Relativa

El parámetro humedad relativa guarda mucha relación con la precipitación, en la estación seca la humedad relativa disminuye y aumenta en los meses lluviosos, generalmente los meses con menor humedad relativa coinciden con los meses de menor precipitación correspondiendo a los meses de enero a abril.

Tabla 6. Promedio mensual de Humedad Relativa, Periodo 1980-2015

Humedad Relativa	Meses												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
Porcentaje (%)	76.0	73.0	71.6	74.8	82.5	85.7	84.9	85.4	86.9	87.5	86.0	81.1	81.3

Radiación Solar

Dentro de la cuenca de Río Grande la radiación solar se intensifica en los meses de la estación seca (Diciembre – Abril), al inicio de la estación seca en el mes de diciembre los valores se incrementan hasta 18 mj/m²/día y en los meses de febrero y marzo se dan las mayores intensidades 21.2 y 21.3 MJ/m²/día.

Tabla 7. Radiación Solar, Periodo 1980-2015

Radiación Solar	Meses												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
MJ/m ² /día	20.4	21.2	21.3	18.8	16.3	16.2	17.1	17.2	17.6	16.4	17.2	18.0	18.1

Vientos

La velocidad promedio del viento en la cuenca es de 0.9 m/s, estas velocidades las considera el servicio meteorológico nacional como vientos en calma. Los registros máximos de velocidades de viento se dan en los meses de enero-abril, 2.7 y 2.8 m/s característicos de la estación seca, mientras que en la estación lluviosa se registran los valores mínimos 0.3 a 0.5 m/s.

Tabla 8. Velocidad del viento, Periodo 1980-2015

Velocidad m/seg	Mes												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
Prom	1.4	1.6	1.6	1.4	0.8	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6	0.9	0.9
Max	2.3	2.7	2.8	2.3	1.2	0.8	0.9	0.8	0.7	0.8	0.8	1.5	1.5
Min	0.7	0.7	0.8	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5

3.1.3. HIDROLOGÍA

La longitud del curso principal de Río Grande es de 97.2 kilómetros, la cuenca se dividió en trece (13) subcuencas considerando los principales ríos: Río Chico, Río Grande, Río Harino, Río Potrero, Río Zaratí, Río Coclé del Sur, Río Olá, Churubé, Río La Chorrera, Río Hondo y Río Pocrí.

Tabla 9. Características morfométricas, subcuencas de Río Grande

Código	Nombre de la Subcuenca	Área de Drenaje		Parámetros morfométricos por subcuencas								
		Km ²	%	*Slo	*Len	*Sll	*Csl	*Wid	*Dep	*Elev	*ElevMin	*ElevMax
1	Río Zaratí Parte Alta	131.68	5.52	19.92	41.75	18.29	0.72	24.92	0.94	326.1	63	1054
2	Río Coclé del Sur	338.20	14.19	19.92	30.87	18.29	0.19	43.14	1.35	215.1	25	793
3	Río Zaratí Tramo Bajo	29.29	1.23	5.24	15.96	60.96	0.24	9.78	0.50	58.0	25	257
4	Río Grande Parte Alta, Río Harino y Río Potrero	492.85	20.67	29.71	50.12	15.24	0.34	53.93	1.57	497.2	25	1688
5	Río Grande Tramo Bajo	78.23	3.28	6.31	9.06	60.96	0.14	17.63	0.74	55.5	11	558
6	Río Olá y Churube	250.74	10.52	15.90	39.56	24.38	0.06	35.47	1.18	171.6	11	1128
7	Río Chico Tramo Alto y Medio	323.32	13.56	25.43	49.54	15.24	0.10	41.55	1.32	499.8	49	1738
8	Río Coclé del Sur Tramo Bajo, Confluencia Río Grande	60.22	2.53	4.06	20.15	91.44	0.10	15.07	0.67	24.5	5	198
9	Río La Chorrera	110.19	4.62	7.89	47.75	60.96	0.10	35.54	1.19	130.7	4	968
10	Río Grande Tramo Bajo, Qda Lajas	225.02	9.44	2.72	61.26	91.44	0.02	33.30	1.14	18.9	0	291
11	Río Chico Tramo Bajo	58.99	2.47	5.64	15.57	60.96	0.21	14.88	0.66	51.4	11	423
12	Río Hondo	104.78	4.39	4.38	42.23	91.44	0.05	21.19	0.84	43.4	0	376
13	Río Pocrí	180.70	7.58	4.07	45.75	91.44	0.08	29.22	1.04	28.6	0	186
SUPERFICIE TOTAL		2384.2	100									

Slo: Pendiente de la cuenca %,

Len: Longitud del cauce (km)

Sll: Longitud de la pendiente (m)

Csl: Pendiente del cauce m/m

Wid: Ancho del cauce (m)

Dep: Profundidad del cauce

Los registros de caudales en la cuenca son medidos por cuatro (4), estaciones hidrográficas propiedad de la Gerencia de Hidrometeorología de la Empresa de Transmisión Eléctrica ETESA. S.A.

Tabla 10. Lista de Estaciones Hidrométricas en la Cuenca 134

Estaciones Hidrométricas - Cuenca del Río Grande (134)								
Número	Lugar	Estado	Río	Elevación	Latitud	Longitud	X	Y
134-01-01	Río Grande	Activa	Grande	15	8.433	-80.500	555041	932239
134-02-01	El Cortezo	Activa	Chico	30	8.345	-80.611	542819	922510
134-03-01	Cañaverall	Activa	Coclé del Sur	18	8.498	-80.440	561592	939450
134-04-01	Murcielaguero	Activa	Zarató	53	8.526	-80.363	570100	942530

Fuente: Empresa de Transmisión Eléctrica S.A - ETESA, Gerencia de Hidrometeorología

La estación Zarató es la que se ubica en la parte más alta de la cuenca de río Grande, mide los caudales en el río Zarató, el caudal promedio anual en este sitio es de 5.6 m³/s, los caudales máximos se dan en los meses de la estación lluviosa específicamente en octubre y noviembre (106.6 y 78 m³/s).

Tabla 11. Caudales promedio mensuales y máximos en la estación Zarató

Caudales (m ³ /seg)	Meses Estación - 134-04-01 (Zarató) - Periodo 1980 -2015												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
Promedio	2.8	1.8	1.5	1.4	2.4	5.0	6.1	8.1	10.5	12.1	9.6	5.6	5.6
Max	53.1	9.9	10.1	9.9	32.6	32.8	52.6	71.7	74.7	106.6	78.0	73.6	50.5

La estación Cañaverall, mide los caudales del río Coclé del Sur, el caudal promedio anual en este sitio de la cuenca es de 9.0 m³/s, los caudales máximos se dan en la estación lluviosa entre los meses de junio a diciembre.

Tabla 12. Caudales promedio mensuales y máximos en la estación Cañaverall

Caudales (m ³ /seg)	Meses Estación - 134-03-01 (Cañaverall)- Periodo 1980 -2015												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
Promedio	2.7	2.1	1.6	1.4	3.2	10.0	8.4	14.3	17.0	23.1	17.6	6.4	9.0
Max	32.8	18.5	19.1	18.0	82.9	293.8	155.2	256.9	194.2	278.4	271.8	150.3	147.7

En el tramo medio de la cuenca se ubica la estación Río Grande, está en el curso principal del río Grande, el caudal promedio en este tramo de la cuenca es de 17.8 m³/s, los caudales máximos se dan entre los meses de junio a noviembre.

Tabla 13. Caudales promedio mensuales y máximos en la estación Río Grande

Caudales (m ³ /seg)	Meses Estación - 134-01-01 (Río Grande) - Periodo 1980 -2015												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
Promedio	13.5	9.2	6.7	7.1	11.0	15.6	12.5	18.9	26.7	40.0	31.4	21.5	17.8
Max	140.0	101.4	89.4	107.0	100.5	321.6	177.4	279.4	207.9	304.0	289.5	230.8	195.4

La estación El Cortezo se ubica en la parte baja de la cuenca, el caudal promedio en esta estación es de 15.4 m³/s, los caudales máximos se dan en la estación lluviosa, entre los meses de junio a noviembre.

Tabla 14. Caudales promedio mensuales y máximos en la estación El Cortezo

Caudales (m ³ /seg)	Meses Estación - 134-02-01 (El Cortezo) - Periodo 1980 -2015												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
Promedio	6.6	3.8	2.6	2.3	5.5	13.5	14.9	22.1	30.0	39.0	29.6	14.4	15.4
Max	40.2	36.5	21.9	38.9	110.0	209.3	146.5	188.2	760.7	205.8	189.6	110.0	171.5

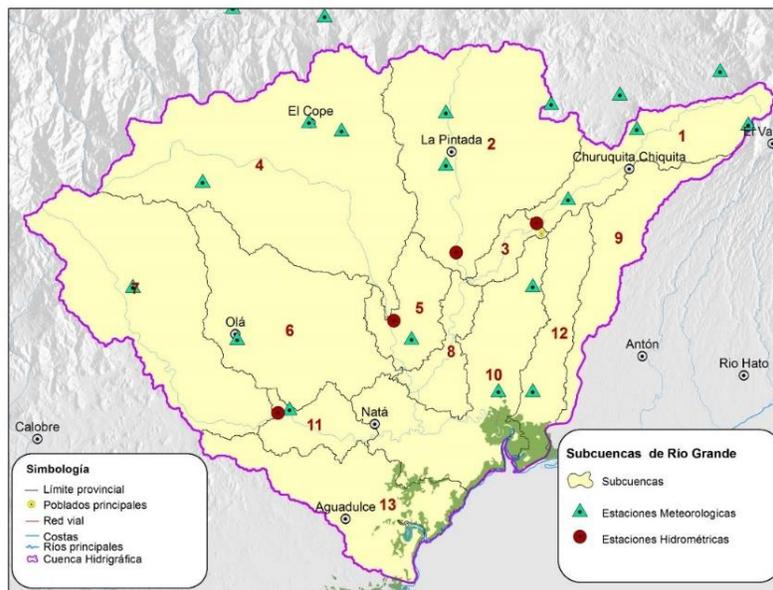


Figura 5. Subcuencas, Estaciones Meteorológicas e Hidrométricas, Cuenca Río Grande

3.1.4. GEOLOGIA.

El 35% de las formaciones geológicas de la cuenca de río Grande corresponde a material sedimentario del periodo cuaternario (QR – Aha), compuesto principalmente por conglomerados, lutitas, tobas, areniscas no consolidadas y pómez. Este tipo de formación se focaliza en el tramo bajo y sureste de la cuenca.

Tabla 15. Geología de la cuenca de Río Grande, Formaciones Sedimentarias

Geología Cuenca de Río Grande						
Formaciones Sedimentarias						
Simbología	Periodo	Grupo	Formación	Descripción	Sup Km ²	Sup (%)
QR-Aha	Cuaternario	Aguadulce	Río Hato	Conglomerado, areniscas, lutitas, tobas, areniscas no consolidadas, pómez.	826.57	34.71

Fuente: Mapa geológico de Panamá, Ministerio de Comercio e Industria, Dirección de Recursos Minerales, 1991

Las formaciones volcánicas ocupan el 65% de la superficie total de la cuenca, predominan tres (3) formaciones: Tucue (TM-CATu) que ocupa las subcuencas de Río Chico, Olá, la parte alta de Río Grande. La formación Cerro El Encanto (TM-Yen) que se distribuye por toda la subcuenca del río Coclé del Sur y la formación El Valle (TM-PL-VA) que se encuentra entre el interfluvio de las subcuencas de Coclé del Sur y Nacimiento del Río Grande. Los principales materiales que componen estas formaciones son, dacitas, andesitas, basaltos, brechas, lavas, brechas y plugs. Existen otras formaciones más focalizadas en la cuenca que ocupan menos extensión como lo son, Cerro Picacho (QPS-P) y Cerro Viejo (PI/PS-CV).

Tabla 16. Geología de la cuenca de Río Grande, Formaciones Volcánicas

Geología Cuenca 134						
Formaciones Volcánicas						
Simbología		Grupo	Formación	Descripción	Sup Km²	Sup (%)
QPS-P	Cuaternario		C. Picacho	Basaltos/andesita, conglomerados, aluviones, coluviones, lodolitas.	1.28	0.05
PI/PS-Cv			Cerro Viejo	Basaltos/andesita, amigdaloides vidriosos. Basaltos Post-ignimbriticos.	31.93	1.34
TMPL-VA	Terciario		El Valle	Dacitas, brech., plugs, fl. ignimbrit., pum., to. finas. And./bas., tob. y s.intrusivos de gra. fino	108.62	4.56
TM-Yen		La Yeguada	C. El Encanto	Dacitas, riodacitas, ignimbritas, sub-intrusivos, tobas y lavas.	611.35	25.67
TM-CATu		Cañazas	Tucué	Andesitas/basaltos, lavas, brechas, tobas y plugs.	797.22	33.48

Fuente: Mapa geológico de Panamá, Ministerio de Comercio e Industria, Dirección de Recursos Minerales, 1991

Los materiales plutónicos están presente en la cuenca Formación San Cristobal (TPL-CRI), los materiales de esta formación están compuestos por granodioritas y mangeritas.

Tabla 17. Geología de la cuenca de Río Grande, Formaciones Plutónicas

Formaciones Plutónicas						
Simbología		Grupo	Formación	Descripción	Sup Km²	Sup (%)
TPL-CRI	Terciario		San Cristobal	Granodioritas y mangeritas.	4.45	0.19

Fuente: Mapa geológico de Panamá, Ministerio de Comercio e Industria, Dirección de Recursos Minerales, 1991

En el mapa de formaciones geológicas de la cuenca de río Grande se puede visualizar la distribución espacial de los materiales geológicos.

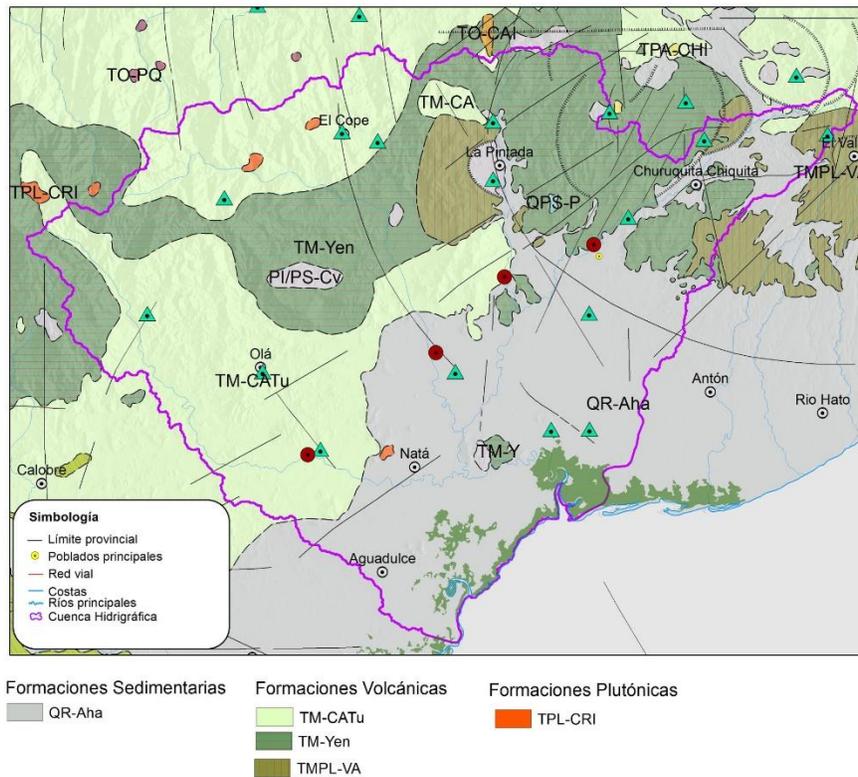


Figura 6. Formaciones Geológicas, cuenca de Río Grande

3.1.5. CAPACIDAD DE USO DE LA TIERRA

Cuando se habla de Capacidad de Uso y Aptitud, se hace referencia al Sistema de Clasificación USDA, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, donde se reconoce 8 clases de aptitudes de los suelos, que van enumeradas desde la Clase I hasta la Clase VIII.

El propósito de la clasificación por capacidad de uso es evaluar las características y propiedades permanentes de la tierra y conocer el grado de sus limitaciones, para conformar clases, mediante las cuales se pueden definir sus usos de manera que el recurso suelo conserve o incremente su calidad en el tiempo (USDA, 2008).

Tabla 18. Capacidad Agrológica de los Suelos, Cuenca Río Grande

Clases de capacidad del terreno	Superficie		Capacidad Agrológica de los Suelos
	Km ²	%	
II	149.58	6.27	Arable, algunas limitaciones en la selección de las plantas o requieren conservación moderada

Clases de capacidad del terreno	Superficie		<i>Capacidad Agrológica de los Suelos</i>
	Km ²	%	
III	266.68	11.19	Arable, severas limitaciones en la selección de las plantas, requieren conservación especial o ambas cosas
IV	247.44	10.38	Arable muy severas limitaciones en la selección de las plantas o requieren un manejo muy cuidadoso o ambas cosas
V	61.17	2.57	No arables, poco riesgo de erosión, pero con otras limitaciones, con cualidades para pastos y bosques.
VI	156.64	6.57	No arable con limitaciones severas, con cualidades para pastos bosques y tierras de reserva
VII	396.56	16.63	No arable con limitaciones muy severas; con cualidades para pastos bosques y tierras de reserva
VIII	1106.13	46.39	No arable con limitaciones que excluyen su uso para la producción de plantas comerciales, puede destinarse al esparcimiento, reserva y abastecimiento de agua, apreciación estética
Total	2384.20	100.	

Fuente: Catastro Rural de Tierras y Agua de Panamá, CARTAP, 1969.

De acuerdo a la clasificación USDA, la cuenca solo tiene el 28% de superficie con capacidad agrológica arable las que se concentran principalmente en la clase III y II, corresponde a 663.71 Km² de la superficie total. Mientras que el 72% de los suelos que suman 1720.49 Km² presentan capacidades agrológicas de suelos no arables están representados desde la clase IV a la VIII. Entre las principales limitaciones que estos suelos presentan están los procesos de erosión severa, estratos delgados con baja capacidad de retención de agua, presentan drenajes pobres y alta alcalinidad.

En el caso de los suelos V, que se ubican en la parte baja de la cuenca y ocupan 61.2 Km², corresponden a suelos sujetos a frecuentes avenidas y a problemas de erosión.

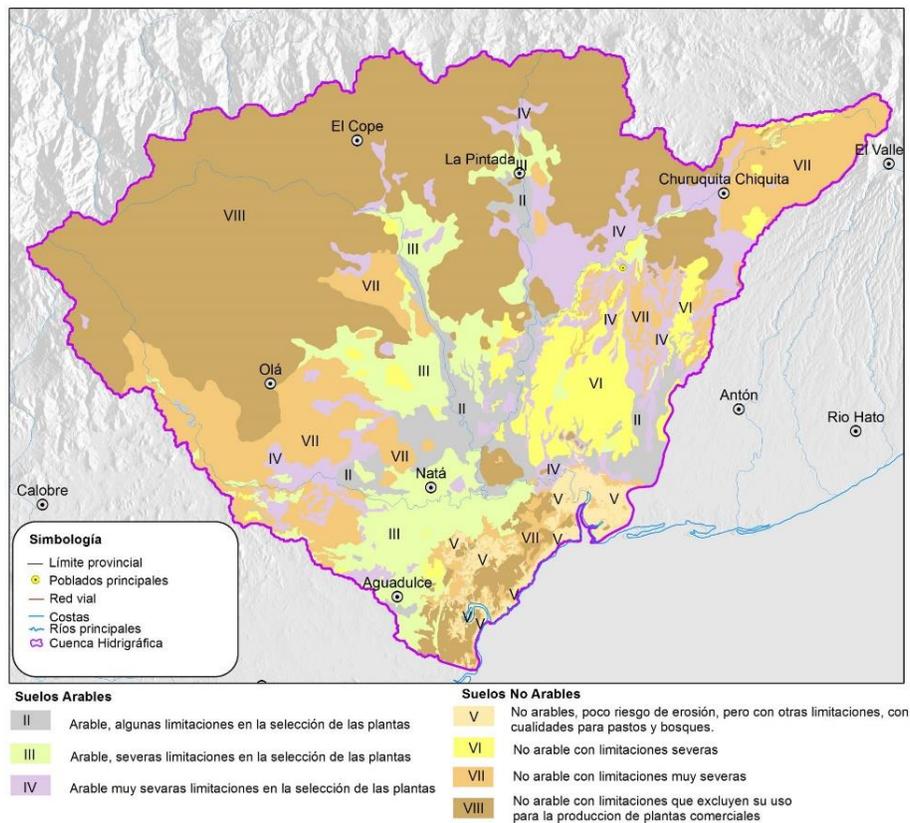


Figura 7. Capacidad Agrológica de los Suelos

3.1.6. ASPECTOS SOCIECONÓMICOS

Población de la Cuenca

El 97% de la superficie de la cuenca de río Grande se encuentra administrativamente dentro de las provincias de Coclé, el 3% restante forma parte de la provincia de Veraguas y es parte del distrito de Calobre. Según el último Censo de Población y vivienda del año 2010 la población total de la cuenca es de aproximadamente 130,392 habitantes, la que a su vez se haya distribuida en 674 lugares poblados. La cuenca tiene un total de 32,570 viviendas de las cuales 965 no tienen servicio de agua potable.

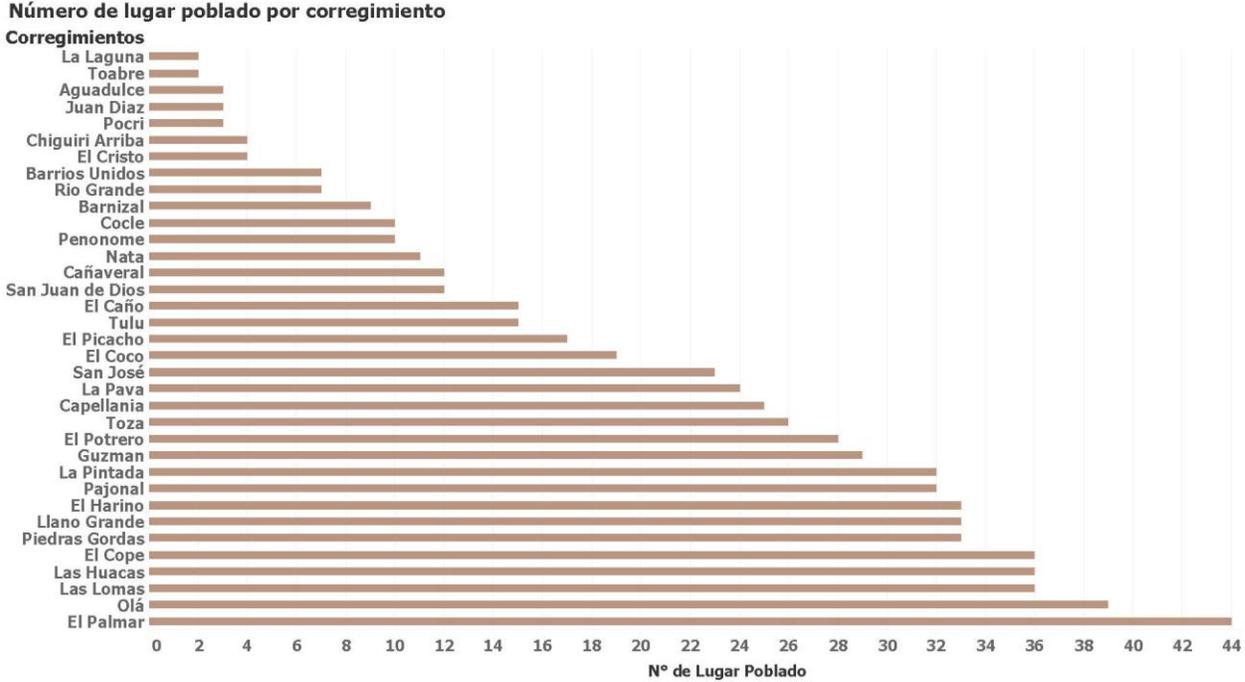
Tabla 19. Población y Viviendas en la cuenca de Río Grande, Según Censo de 2010

Distrito	Corregimiento	Superficie Km ²	N° de Lugar Poblado	Población	Hombres	Mujeres	N° Viviendas	Sin Agua Potable	Densidad (Hab/Km ²)
Calobre	Barnizal	11.07	9	158	88	70	46	9	14.3
	La Laguna	1.60	2	34	15	19	15	6	21.3
	San José	33.18	23	680	391	289	171	7	20.5
Aguadulce	Aguadulce	21.22	3	41	29	12	9	0	1.9
	Barrios Unidos	40.38	7	9357	4570	4787	2486	6	231.7
	El Cristo	16.45	4	132	67	65	43	1	8.0
	Pocri	15.39	3	12654	6296	6358	3407	14	822.2
	Juan Díaz	41.47	3	2229	1150	1079	556	42	53.8
	San Juan de Dios	29.98	12	3351	1779	1572	685	46	111.8
La Pintada	El Harino	74.26	33	4601	2355	2246	1061	43	62.0
	El Potrero	73.83	28	3165	1643	1522	828	21	42.9
	La Pintada	85.49	32	3791	1922	1869	926	43	44.3
	Las Lomas	84.08	36	2072	1135	937	504	12	24.6
	Llano Grande	80.17	33	3003	1573	1430	698	21	37.5
	Piedras Gordas	59.06	33	3073	1634	1439	698	43	52.0
Natá	Capellania	94.81	25	4504	2321	2183	1232	20	47.5
	Guzman	71.89	29	864	455	409	230	12	12.0
	Las Huacas	88.62	36	1585	851	734	359	74	17.9
	Nata	172.27	11	5989	2946	3043	1587	24	34.8
	Toza	86.56	26	2071	1077	994	572	50	23.9
	El Caño	87.58	15	3351	1680	1671	940	16	38.3
Olá	El Palmar	101.90	44	1153	617	536	301	31	11.3
	El Picacho	30.77	17	331	199	132	106	3	10.8
	La Pava	84.97	24	1444	761	683	398	22	17.0
	El Cope	74.98	36	572	323	249	138	11	7.6
	Olá	83.56	39	1419	756	663	394	20	17.0
Penonomé	El Coco	147.00	19	5605	2782	2823	1354	19	38.1
	Pajonal	127.63	32	13000	6693	6307	2899	194	101.9
	Penonome	53.71	10	21748	10538	11210	5422	14	404.9
	Río Grande	94.41	7	3117	1575	1542	839	2	33.0
	Toabre	22.12	2	351	219	132	84	4	15.9
	Tulu	70.36	15	2441	1337	1104	557	46	34.7
	Cañaveral	63.31	12	7517	3742	3775	1808	37	118.7
	Chiguirí Arriba	19.07	4	889	468	421	210	39	46.6
	Cocle	115.30	10	4100	2065	2035	1007	13	35.6
		2358.47	674	130392.00	66052.00	64340.00	32570.00	965	55.3

Fuente: Censo Nacional de Población y Vivienda, INEC.2010

La cuenca está dividida en treinta y cinco corregimientos (35), existe un promedio de veinte (20) lugares poblados por corregimiento. Los corregimientos que mayor cantidad de lugares poblados tienen son, El Palmar, Olá, Las Lomas, Las Huacas, El Copé, Piedras Gordas, Llano Grande, El Harino, Pajonal, La Pintada y Guzmán, representan el 19.2% de la población total de la cuenca, reportan más de 504 viviendas sin servicio de agua potable lo que equivale a 52% del total de las viviendas que no disponen de ese servicio.

Los corregimientos que presentan la menor cantidad de lugares poblados corresponden a La Laguna, Toabré, Aguadulce, Juan Díaz, Pocrí, Chiguirí Arriba, El Cristo, Barrios Unidos, Río Grande, Barnizal, Coclé y Penonomé, representan el 42% de la población total de la cuenca, reportan un total de 144 viviendas sin agua potable que equivale al 15% del total de viviendas que no disponen de ese servicio.



Gráfica 5 Numero de Lugar Poblado por Corregimiento.

Densidad de Población

La densidad de población en la cuenca es de 55.3 hab/Km², al analizar la densidad por corregimiento se evaluó que la cuenca presenta densidades superiores a los 800 hab/km² como el corregimiento de Pocrí distrito de Aguadulce y el corregimiento de Penonomé con densidad de población superior a 405 hab/km².

La subcuenca de río Pocrí presenta una alta densidad de población 800 hab/km², las subcuencas de los ríos Zaratí, Coclé del Sur, Quebrada Lajas, Río Grande en el tramo bajo y río Hondo presentan densidad de población de 120 a 400 hab/Km².

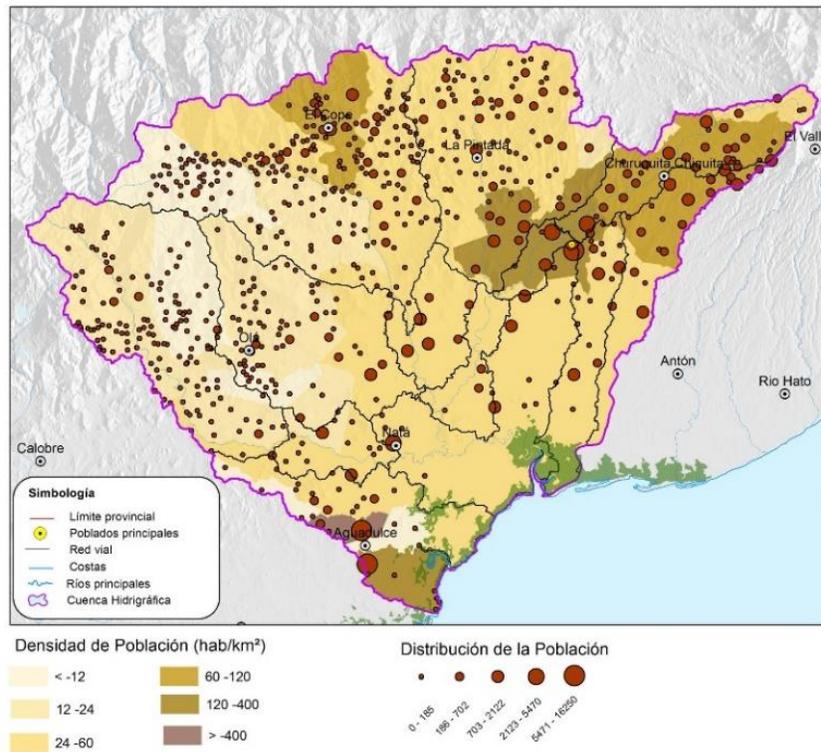


Figura 8. Densidad y Distribución de la Población

Actividades Económicas

Al evaluar la distribución de los principales núcleos poblados en la cuenca, se puede identificar subcuencas donde se concentran la mayor cantidad de población. En la subcuenca del río Zaratí se ubica Penonomé, capital de la provincia con más de 21000 habitantes. En la subcuenca de río Pocrí se localiza el poblado de Pocrí que tiene más de 12300 habitantes. Ambos centros poblados mantienen importantes actividades económicas dentro del sector público, la banca, la industria y el sector hotelero.

En el resto de la cuenca se encuentran distribuidos otros centros poblados con menor cantidad de habitantes pero de igual importancia en la economía local. Natá con 5470, habitantes ubicado en la confluencia de Río Chico y la parte baja de Río Grande, La Pintada con 1917 habitantes dentro de la subcuenca del río Coclé del Sur. El Copé con 1176 habitantes ubicado en la subcuencas que conforman los ríos Grande en la parte alta, Potrero y El Harino.

Existen lugares poblados con menor población por su importancia cultural, artesanal y ambiental son representativos en la economía de la cuenca, generan ingresos a nivel local por las actividades que realizan, bajo estas condiciones se pueden señalar comunidades como El Valle con 36 habitantes, Churuquita Grande con 1518 habitantes y El Águila Arriba con 225 habitantes.

Una de las principales actividades económica de la cuenca está relacionada al sector primario, se tratan de cultivos de arroz, caña de azúcar, cítricos, proyectos de reforestación, siembra de pastos, gramas y camaroneras.

Tabla 20. Principales rubros del sector primario, cuenca de Río Grande

Código	Nombre de la Subcuenca	Principales Rubros				
		Arroz	Caña de Azúcar	Camaroneras	Plantaciones Forestales	Cítricos
1	Río Zaratí Parte Alta				1.60	100
2	Río Coclé del Sur				8.07	
3	Río Zaratí Tramo Bajo				0.74	
4	Río Grande Parte Alta, Río Harino y Río Potrero	0.81	0.00		4.74	
5	Río Grande Tramo Bajo	26.67	4.88		0.04	
6	Río Ola y Churubé	5.08	10.69		11.77	
7	Río Chico Tramo Alto y Medio	0.00	0.00		6.30	
8	Río Coclé del Sur Tramo Bajo, Confluencia Río Grande	12.22	10.17		0.00	
9	Río La Chorrera	8.30	0.00		3.14	
10	Río Grande Tramo Bajo, Qda Lajas	14.32	55.94	43.3	55.14	
11	Río Chico Tramo Bajo	0.00	4.95		0.74	
12	Río Hondo	32.58	1.40		4.79	
13	Río Pocrí	0.00	11.97	56.7	2.92	

El cultivo de arroz se produce en mayor proporción en la subcuenca de Río Hondo y Río Grande Tramo bajo, también se produce en el Tramo bajo de Coclé del Sur y su confluencia con Río Grande. La Caña de Azúcar se produce en mayor porcentaje de superficie en la subcuenca de Río Grande tramo bajo y Quebrada Las Lajas, en la subcuenca de río Olá y Churubé y en el tramo bajo del río Coclé del Sur y su confluencia con Río Grande, en el río Pocrí también hay presencia de cultivos caña de azúcar.

En cuanto la presencia de tinas para el cultivo de camarones, estas se localizan en la parte baja de Río Grande y en la subcuenca de río Pocrí. Las Plantaciones forestales están distribuidas en todas las subcuencas siendo las más representativas las que se ubican en el tramo bajo de río Grande. La producción de cítricos es característico en la subcuenca alta de río Zaratí. La producción de Café también se da dentro de la cuenca generalmente en las partes altas de las subcuencas de Río Grande, río El Harino y río El Potrero.

3.2. DATOS DE ENTRADA AL MODELO

Para la modelación hidrológica de la cuenca de río Grande se empleó la herramienta SWAT (Soils & Water Assessment Tool) por sus siglas en inglés se define como herramienta para la evaluación del suelo y el agua, fue desarrollada por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), evalúa el impacto que tiene el uso de la tierra y la variación climática en el balance hídrico, el modelo considera procesos como escorrentía, flujo lateral, infiltración entre otros, se basa en la ecuación general del balance hídrico.

El principio del modelo SWAT es dividir la cuenca en áreas de aportes las cuales a su vez se subdividen en Unidades de Respuesta Hidrológicas (HRU), las HRUs son áreas que presentan parámetros homogéneos en cuanto a características de uso de la tierra, tipos de suelo y pendiente.

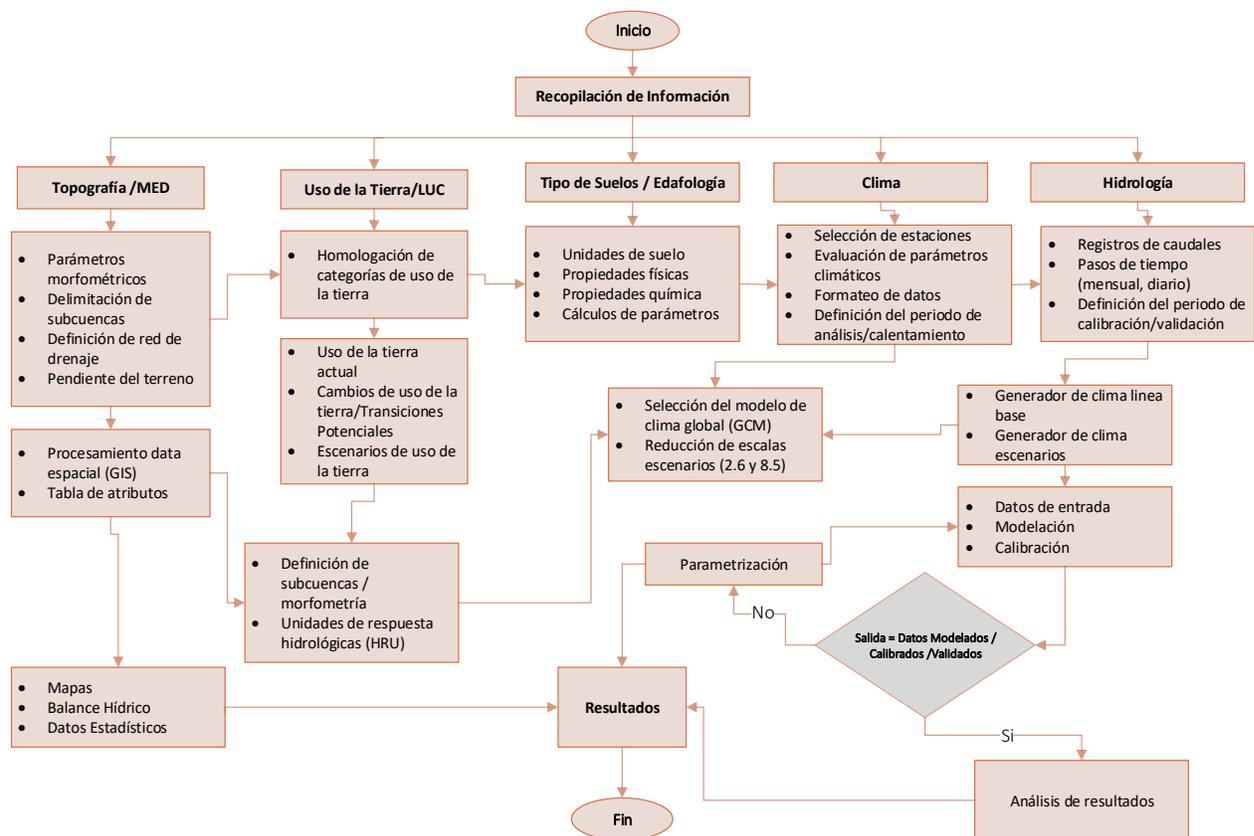


Figura 9. Flujograma del proceso de modelación

3.2.1. INSUMOS PARA LA MODELACIÓN

Se utilizó el modelo de elevación digital (MED) del proyecto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con resolución de 30 metros, perfiles de suelo del Instituto de Investigaciones Agropecuaria de Panamá (IDIAP), Uso de la Tierra y Cobertura Boscosa del Año 2010 (MIAMBIENTE), datos climáticos e hidrológicos de la Gerencia de Hidrometeorología (ETESA).

3.2.1.1 Modelo de Elevación Digital (MED)

Sirve como insumo para delimitar la cuenca, definir la red de drenaje, calcular la pendiente del terreno además de obtener parámetros morfométricos de las áreas de aporte de la cuenca, Pendiente de la cuenca (Slo), Longitud del Cauce (Len), Longitud de la pendiente (SII), Pendiente del cauce (Csl), Ancho del cauce (Wid) y profundidad del cauce (Dep).

3.2.1.2 Pendiente superficial del terreno (%)

El 32% de la superficie de la cuenca presenta terrenos planos con pendientes menores a 3%, mientras que el 28% de la superficie corresponden a terrenos ondulados con pendientes que están entre 20 a 45%. El 34% de los terrenos de la cuenca corresponden a terrenos que están entre las categorías de ligeramente ondulados a modernamente ondulados. Los terrenos con pendientes mayores a 45% solo representan el 6% de la superficie total de la cuenca.

Tabla 21. Pendiente superficial del terreno (%)

Pendiente Superficial del Terreno en Porcentaje - Cuenca 134						
Intervalo %	0 - 3	3 - 8	8 - 20	20 - 45	> - 45	Total
(Km²)	768.08	300.27	510.06	663.36	142.47	2384.24
(%)	32.21	12.59	21.39	27.82	5.98	100

Intervalos (%)	Descripción
0 - 3	Plano o casi plano
3 - 8	Ligeramente ondulado
8 - 20	Moderadamente Ondulado
20 - 45	Ondulado
> - 45	Fuertemente ondulado

3.2.1.3 Tipos de Suelo

Para definir las unidades de suelo en la cuenca el modelo requiere parámetros como profundidad, textura, erosión, clase de drenaje propiedades como alcalinidad, salinidad, conductividad hidráulica, densidad aparente entre otros. Esta información se obtuvo de perfiles de suelo levantados por el Instituto de Investigaciones Agropecuaria de Panamá (IDIAP).

Tabla 22. Característica de los suelos en base a perfiles

Textura	% Arcilla	% Limo	% Arena	Grupo Hidrológico	Horizontes	Profundidad máxima del Horizonte (mm)	USLE	UTM X	UTM Y
SL	7.7	29.0	63.3	B	5	1000	0.14	563910	931269
C	44.0	26.8	29.2	C	5	1150	0.11	553089	927507
C	50.4	13.6	36.0	D	5	1000	0.11	565162	932499
SCL	34.4	16.0	49.6	C	5	1020	0.11	564222	926724
STL	28.3	61.7	10.0	C	6	1080	0.14	555412	928862
CL	36.0	36.8	27.2	C	5	1000	0.12	558725	921188
L	25.0	33.5	41.5	C	4	1000	0.13	558718	926716
L	17.3	39.3	43.3	C	3	800	0.11	516511	935892

3.2.1.4 Uso de la Tierra y Cobertura Vegetal

Las categorías de cobertura vegetal que están presentes en la cuenca, van desde bosques maduros pasando por bosques intervenidos, humedales (manglares) y rastrojo, los usos de suelo van desde los pastos (usos agropecuarios), suelos desnudos (suelos sin vegetación), áreas pobladas y usos agropecuarios (cultivos de arroz y caña de azúcar). Las estadísticas para la cuenca indican que la cobertura vegetal representa el 51% (1220.1 km²) y los usos de suelo 49% (1164.1km²).

Tabla 23. Categorías de uso de la tierra y cobertura vegetal

<i>Uso de la Tierra y cobertura vegetal 2010, Cuenca 134</i>										
<i>Superficie</i>	B.m	B.i	Hum	Rast	Past	Agr	S.d	A.p	Ag	Total
<i>(Km²)</i>	87.7	677.7	78.9	375.9	881.5	193.2	0.3	71.4	17.6	2384.2
<i>(%)</i>	3.6	28.4	3.3	15.7	36.9	8.1	0.01	3.0	0.7	100

<i>Intervalos</i>	<i>Descripción</i>
B.m	Bosque Maduro
B.i	Bosque Intervenido
Hum	Humedales
Rast	Rastrojo
Past	Uso Agropecuario
Agr	Agricultura
S.d	Suelo Desnudo
A.p	Áreas Pobladas
Ag	Agua

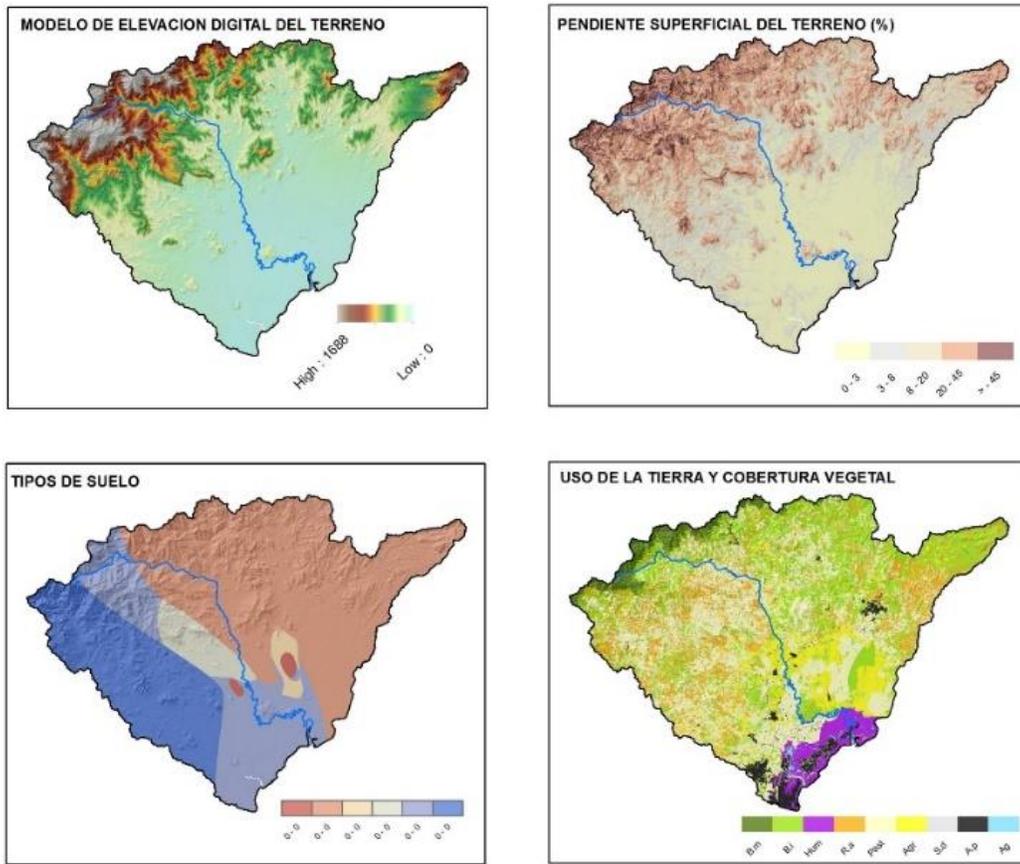
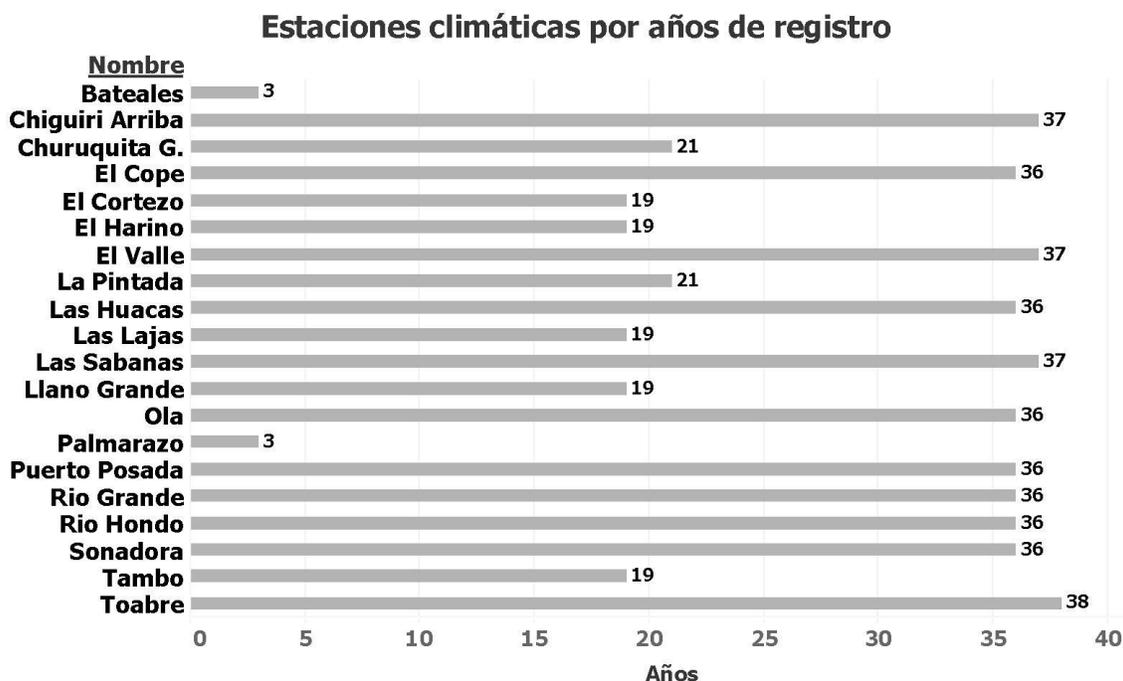


Figura 10. Insumos ingresados al modelo SWAT

3.2.1.5 Datos climáticos

Los datos climáticos ingresados al modelo corresponden a registros diarios de los parámetros: precipitación (mm), temperatura (°C), humedad relativa (%), radiación solar (mj/m²) y velocidad del viento (m/s).

Para la línea base se estableció un periodo de 36 años desde 1980 – 2015. Para la selección de las estaciones se tomó en cuenta la distribución espacial, disponibilidad de los datos y el grado de consistencia de los registros.



Gráfica 6 Estaciones climáticas por años de registro.

Se utilizaron un total de 20 estaciones de las cuales 14 están dentro de la cuenca de río Grande y 6 fuera de la cuenca. Las estaciones Palmarazo (3373.5 mm) y Bateales (2668.5 mm) pertenecen a la cuenca de río Coclé del Norte (105), son las que menos años de registros disponen (3 años) fue necesario incluirlas por la influencia que tienen sus altos registros en la parte alta de la cuenca.

Rellenos de datos faltantes

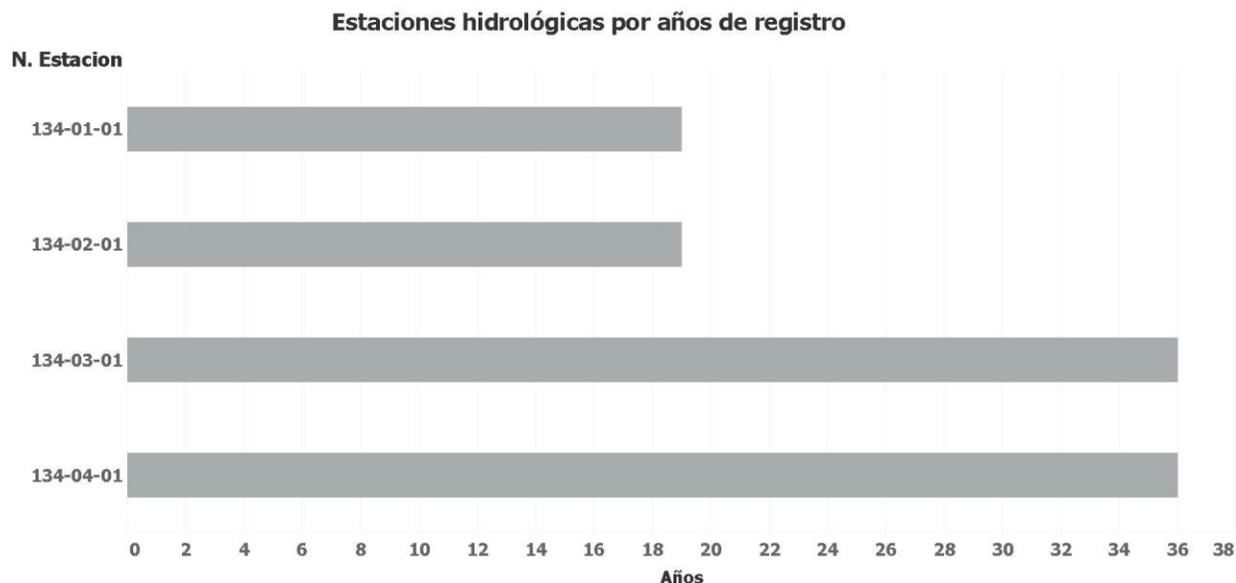
Para completar los registros faltantes de los parámetros precipitación, temperatura máxima y mínima se utilizó la aplicación RClimTools del CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical).

RClimTool ofrece diferentes opciones de análisis, diseñadas con el objetivo de brindar una aplicación que reúne todo lo necesario para llevar a cabo un estudio completo de series climatológicas. (Llanos, 2014).

Para completar los registros faltantes la aplicación requiere de una estación patrón o referencia con la mayor disponibilidad de registros completos en igual serie de tiempo que la estación a rellenar. La estación patrón debe reunir ciertas condiciones entre las que se deben considerar la proximidad, rangos de elevación y el periodo de análisis.

3.2.1.6 Datos Hidrológicos

Dentro del proceso de modelación hidrológica los registros de las estaciones climáticas son necesario en la etapa de calibración del modelo. Para la cuenca de río Grande existen cuatro (4) estaciones hidrográficas que registran los caudales en los ríos Grande (134-01-01), Chicó (134-02-01), Coclé del Sur (134-03-01), Zaratí (134-04-01).



Gráfica 7 Estaciones hidrológicas por años de registro.

3.3. MODELACIÓN DE ESCENARIOS

Para modelar escenarios futuros de cambio climático al 2070, fue necesario ajustar las variables de entrada al modelo. Los ajustes se hicieron en los insumos más sensibles correspondientes a uso de la tierra y a los parámetros climáticos precipitación y temperatura.

Uso del suelo y cambios de uso del suelo.

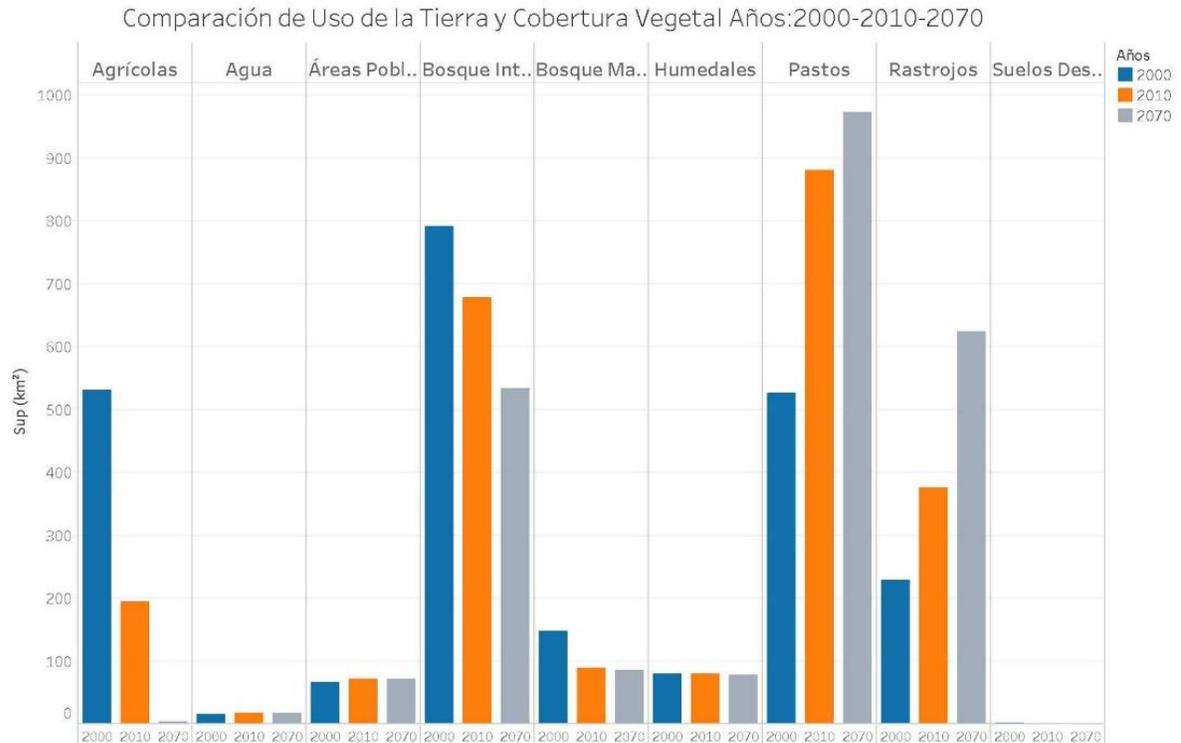
Para evaluar el cambio de uso de suelo en la cuenca se utilizó la cobertura oficial de uso de la tierra para el año 2000 y 2010 de MIAMBIENTE, a partir de ambas coberturas ya clasificadas se hizo el análisis multitemporal para las categorías bosques y no bosques.

Tabla 24. Categorías de uso de la tierra y cobertura vegetal (Bosque y No bosque)

Uso de la tierra y cobertura vegetal (bosque y no bosque) 2000 - 2010 , Cuenca 134													
Año	Superficie	Cobertura Vegetal					Otros Usos					Total	
		B.m	B.i	Hum	Rast	Total	Past	Agr	S.d	A.p	Ag		Total
2000	(Km ²)	147.5	791.4	79.3	228.1	1246.3	526.0	530.1	0.8	65.1	16.1	1137.9	2384.2
	(%)	6.2	33.2	3.3	9.6	52.3	22.1	22.2	0.0	2.7	0.7	47.7	100.0
2010	(Km ²)	87.7	677.7	78.9	375.9	1220.2	881.5	193.2	0.3	71.4	17.6	1164.0	2384.2
	(%)	3.6	28.4	3.3	15.7	51.0	36.9	8.1	0.0	3.0	0.7	48.7	100.0
2070	(Km ²)	85.8	533.7	77.1	623.4	1320.0	972.2	2.6	0.2	71.9	17.3	1064.2	2384.2
	(%)	3.6	22.4	3.2	26.1	55.4	40.8	0.1	0.0	3.0	0.7	44.6	100.0

Fuente: Datos SIG de la Autoridad Nacional del Ambiente, Año 2010

Para el año 2000 la cobertura boscosa en la cuenca registro 1246.3 km² que representaba el 52.3% de la cuenca los otros usos sumaban 1137.9 km² comparado con el total de la cuenca representan 47.7%. En el año 2010 la cobertura boscosa se estimó en 1220.2 km² los otros usos 1164.0 km².



Gráfica 8 Comparación de uso de la tierra y cobertura vegetal: 2000-2010-2070

A partir de estos resultados se estimó la tasa de deforestación en la cuenca utilizando la fórmula.

$$q = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{1/(t_2 - t_1)} - 1$$

Donde A_1 y A_2 es la cobertura boscosa en el año inicial y final, mientras $(t_2 - t_1)$ es el tiempo comprendido entre el año inicial y el año final. (FAO, 1996).

Los resultados revelan que en la cuenca de río Grande entre el 2000 y 2010 se deforestaron 2605 hectáreas lo equivalente a una tasa de cambio anual de -260.51 hectáreas por año, obteniéndose una tasa de deforestación de -0.21%.

En cuanto a la transición y cambio entre un uso de suelo a otro se muestran los porcentajes de cambio en la tabla siguiente.

Tabla 25. Matriz de transición de cambio de uso del suelo 2000-2010

Matriz de transición de cambio de uso de suelo entre 2000 y 2010										
Año inicial 2000/sup en %										
Cobertura Vegeta/Usode Suelo	B.m	B.i	Hum	Rast	Past	Agr	S.d	A.p	Ag	
Año final 2010/sup en %	<i>B.m</i>	63	1	0	1	0	0	0	0	0
	<i>B.i</i>	21	34	1	8	1	6	0	0	0
	<i>Hum</i>	0	0	76	0	1	0	17	14	0
	<i>Rast</i>	10	38	1	47	14	37	0	1	0
	<i>Past</i>	0	10	9	32	83	42	0	11	18
	<i>Agr</i>	6	16	0	11	1	14	0	0	0
	<i>S.d</i>	0	0	0	0	0	0	30	0	0
	<i>A.p</i>	0	0	10	1	1	1	5	74	28
	<i>Ag</i>	0	0	2	0	0	0	2	0	51
Cambio /Clase	37	65	23	53	17	86	24	26	46	

Escenario de uso de suelo 2070.

Para proyectar el cambio de uso de la cobertura vegetal y el lugar donde podrían darse al 2070 se utilizó el módulo "MOLUSCE" de QGIS, permite estimar las transiciones potenciales del uso del suelo, se corrió el método "Artificial Neural Network" con cincuenta y cinco (55) interacciones. Los cambios futuros son probabilidades determinadas por diferentes factores, para el análisis se consideró un solo escenario basado en las transiciones 2000-2010.

Se utilizó como variable espacial, la proximidad a carreteras, modelada con el módulo "DISTANCE" de IDRISI Terrset a partir de la red vial existente en la cuenca clasificada en tres tipos de caminos: vías principales, vías secundarias y caminos de terracerías.

Para el año 2070 la cobertura boscosa se estimó en 1320.2 km² el incremento respecto al año 2000 se puede observar en la categoría rastrojo que aumenta 16.5% respecto al año inicial.

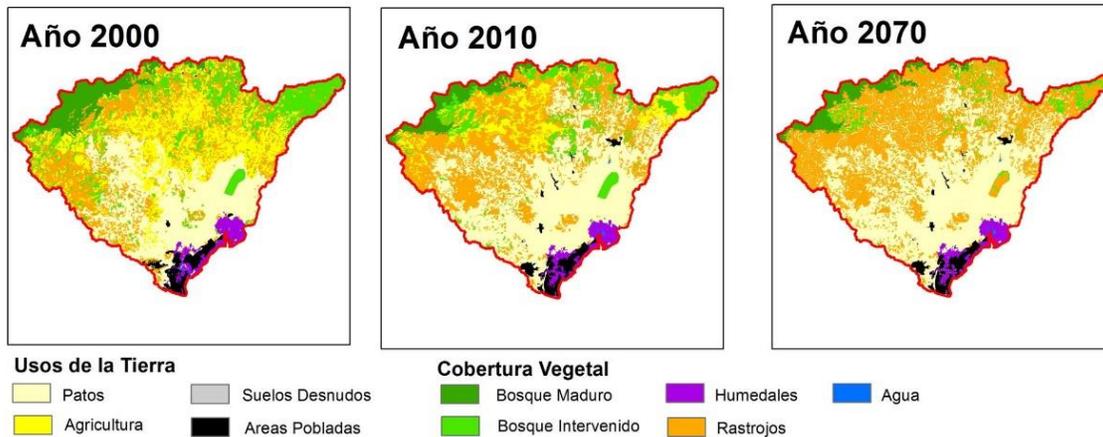


Figura 11. Escenarios de uso de la tierra y cobertura vegetal Años: 2000 – 2010 - 2070

Cambios en variables climáticas

Para evaluar los impactos en las variables precipitación y temperatura superficial del aire, se utilizó el modelo climático global (CCSM4) del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) se consideraron como escenarios los RCP 2.6 (bajas emisiones) y RCP 8.5 (altas emisiones).

Su selección respecto al resto de los modelos del CMIP5 se hizo por el buen ajuste con los datos observados en las estaciones de la cuenca y un PBIAS de -5.1% que muestra el buen desempeño y nivel de ajuste temporal.

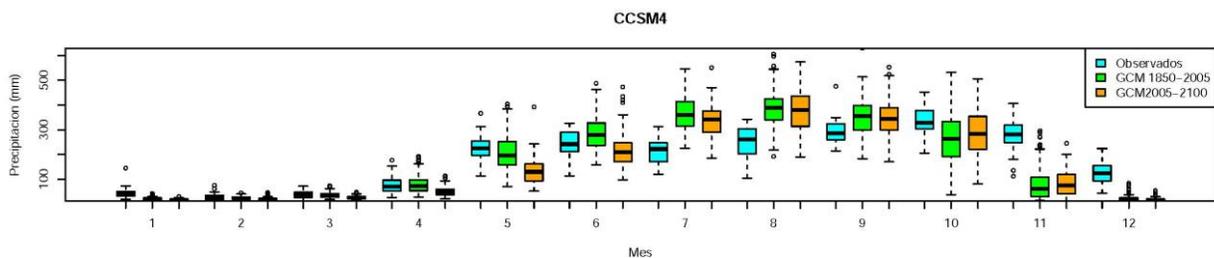


Figura 12. Desempeño del modelo CCSM4 vs datos observados en la cuenca y registros históricos

Variación de Precipitación por Escenarios

La variación en la precipitación respecto cada una de las estaciones ubicadas dentro y fuera de la cuenca mantienen la tendencia esperada por las vías de concentración representativas. Para el RCP2.6 con bajas emisiones el incremento promedio de precipitación es de 55.2 mm, para el RCP8.5 con altas emisiones ese incremento disminuye 12.4 mm.

Al evaluar la precipitación con el RCP2.6 la precipitación disminuye -21.4 mm mientras que con el RCP8.5 la disminución es de -43.1.

Tabla 26. Variación de precipitación entre línea base y escenarios de cambio climático, Cuenca 134

Cuenca del Río Grande (134)						
Número	Nombre	Precipitación (mm) Línea Base (1980-2015)	Precipitación (mm) Escenario 2.6 (2016 -2070)	Δ	Precipitación (mm) Escenario 8.5 (2016 -2070)	Δ
				Escenario 2.6 (mm)		Escenario 8.5 (mm)
134-001	El Cortezo	1248.9	1318.1	69.1	1244.0	-4.9
134-002	El Harino	1847.9	1876.6	28.7	1901.3	53.4
134-003	Río Grande	1436.2	1533.7	97.6	1484.8	48.7
134-004	El Cope	1996.7	2120.5	123.8	2049.9	53.2
134-005	La Pintada	1532.1	1607.8	75.7	1594.8	62.7
134-008	Sonadora	1811.8	1856.0	44.2	1788.1	-23.7
134-019	Las Huacas	3093.0	3108.7	15.8	3057.8	-35.2
134-020	Río Hondo	1409.9	1401.1	-8.7	1417.7	7.8
134-021	Las Lajas	1421.0	1441.4	20.4	1431.3	10.3
134-022	Puerto Posada	1471.7	1462.0	-9.7	1486.8	15.0
134-023	Las Sabanas	2420.6	2415.0	-5.6	2350.9	-69.7
134-024	Ola	1728.1	1713.3	-14.8	1775.2	47.1
134-025	Llano Grande	1669.5	1719.34	49.8	1728.3	58.8
134-026	Churuquita G.	2089.5	2057.42	-32.1	2014.8	-74.7

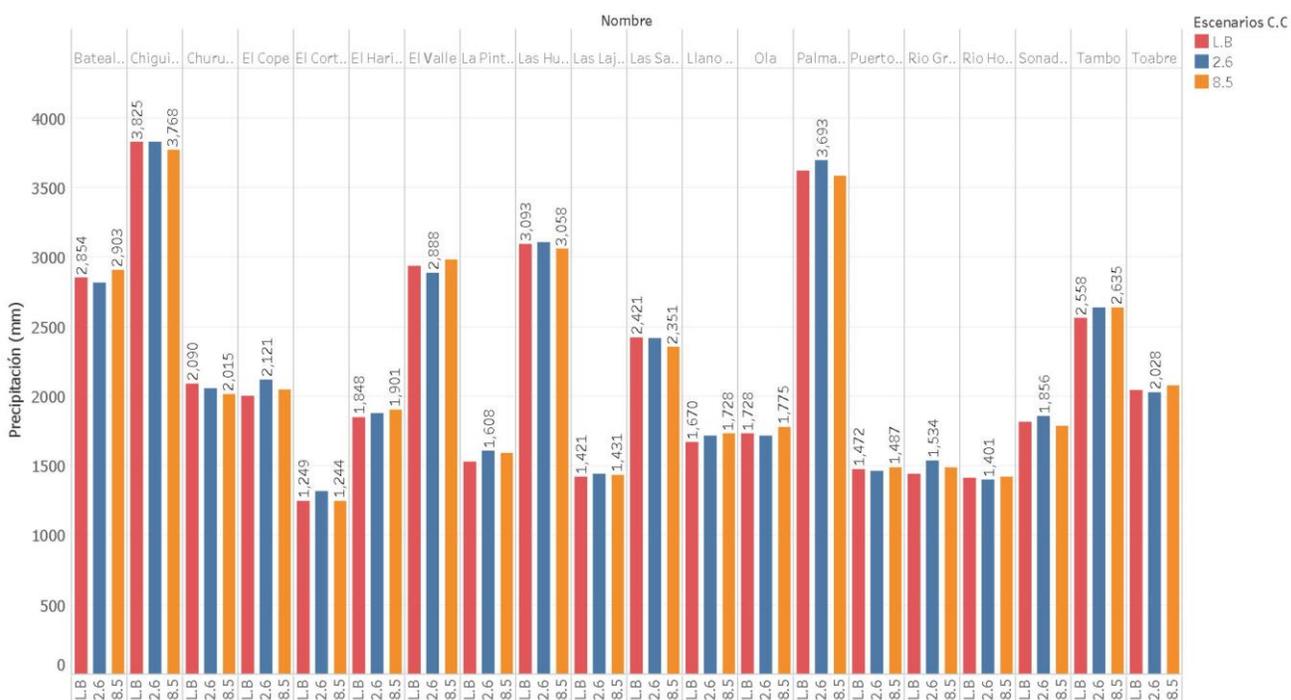
Tabla 27. Variación de precipitación entre línea base y escenarios de cambio climático, Cuenca 136

Cuenca Río Antón (136)						
Número	Nombre	Precipitación (mm) Línea Base (1980-2015)	Precipitación (mm) Escenario 2.6 (2016 -2070)	Δ	Precipitación (mm) Escenario 8.5 (2016 -2070)	Δ
				Escenario 2.6 (mm)		Escenario 8.5 (mm)
136-001	El Valle	2934.7	2888.42	-46.3	2979.6	44.9

Tabla 28. Variación de precipitación entre línea base y escenarios de cambio climático, Cuenca 105

Cuenca Río Coclé del Norte (105)						
Número	Nombre	Precipitación (mm) Línea Base (1980-2015)	Precipitación (mm) Escenario 2.6 (2016 -2070)	Δ	Precipitación (mm) Escenario 8.5 (2016 -2070)	Δ
				Escenario 2.6 (mm)		Escenario 8.5 (mm)
105-002	Chiguirri Arriba	3825.46	3829.02	3.6	3767.92	-57.5
105-004	Tambo	2558.4	2637.03	78.6	2634.91	76.5
105-005	Toabré	2043.2	2028.46	-14.7	2072.92	29.7
105-013	Bateales	2854.2	2815.00	-39.2	2902.93	48.7
105-015	Palmarazo	3619.2	3693.15	74.0	3583.31	-35.9

Precipitación Total Anual: Línea Base 1980-2015 - Escenarios de Cambio Climático 2017-2070



Gráfica 9 Precipitación total anual por estación – línea base y escenario de C.C

Variación de la temperatura por escenarios

Las variaciones del parámetro temperatura para la cuenca de río Grande indican que con el escenario RCP 2.6 aumenta la temperatura promedio 0.70°C, mientras que para el escenario RCP 8.5 la variación con respecto a la línea base es mayor 1.18°C.

Tabla 29. Variación de temperatura media entre línea base y escenarios de cambio climático, cuenca 134

Cuenca del Río Grande (134)						
Número	Nombre	Temperatura (°C) Línea Base (1980-2015)	Temperatura (°C) Escenario 2.6 (2016 -2070)	Δ	Temperatura (°C) Escenario 8.5 (2016 -2070)	Δ
				Escenario 2.6 (°C)		Escenario 8.5 (°C)
134-001	El Cortezo	27.12	27.84	0.72	27.8	0.72
134-002	El Harino	25.27	25.96	0.69	26.5	1.2
134-003	Río Grande	27.12	27.85	0.72	28.3	1.2
134-004	El Cope	28.93	29.65	0.72	30.1	1.2
134-005	La Pintada	27.13	27.85	0.72	28.3	1.2
134-008	Sonadora	27.12	27.85	0.73	28.3	1.2
134-019	Las Huacas	25.25	25.97	0.72	26.4	1.2

Cuenca del Río Grande (134)						
Número	Nombre	Temperatura (°C) Línea Base (1980-2015)	Temperatura (°C) Escenario 2.6 (2016 -2070)	Δ	Temperatura (°C) Escenario 8.5 (2016 -2070)	Δ
				Escenario 2.6 (°C)		Escenario 8.5 (°C)
134-020	Río Hondo	27.61	28.31	0.71	28.8	1.2
134-021	Las Lajas	27.12	27.84	0.72	28.3	1.2
134-022	Puerto Posada	27.65	28.35	0.71	28.8	1.2
134-023	Las Sabanas	23.71	24.40	0.69	24.9	1.2
134-024	Ola	27.11	27.82	0.71	28.3	1.2
134-025	Llano Grande	27.11	27.84	0.73	28.3	1.2
134-026	Churuquita G.	27.12	27.85	0.73	28.3	1.2

Tabla 30. Variación de temperatura media entre línea base y escenarios de cambio climático, cuenca 136

Cuenca Río Antón (136)						
Número	Nombre	Temperatura (°C) Línea Base (1980-2015)	Temperatura (°C) Escenario 2.6 (2016 -2070)	Δ	Temperatura (°C) Escenario 8.5 (2016 -2070)	Δ
				Escenario 2.6 (°C)		Escenario 8.5 (°C)
136-001	El Valle	23.12	23.81	0.69	24.3	1.2

Tabla 31. Variación de temperatura media entre línea base y escenarios de cambio climático, cuenca 105

Cuenca Río Coclé del Norte (105)						
Número	Nombre	Temperatura (°C) Línea Base (1980-2015)	Temperatura (°C) Escenario 2.6 (2016 -2070)	Δ	Temperatura (°C) Escenario 8.5 (2016 -2070)	Δ
				Escenario 2.6 (°C)		Escenario 8.5 (°C)
105-002	Chiguirí Arriba	24.75	25.46	0.71	25.95	1.2
105-004	Tambo	23.79	24.49	0.71	24.99	1.2
105-005	Toabré	25.55	26.23	0.69	26.73	1.2
105-013	Bateales	25.28	25.97	0.69	26.47	1.2
105-015	Palmarazo	25.28	25.82	0.54	26.49	1.2

3.4. CALIBRACIÓN DEL MODELO

Para calibrar el modelo se utilizó el programa SWAT-CUP que permite el ajuste de parámetros mediante procesos semi-automatizado, combina la calibración manual con la automatizada e incorpora el análisis de sensibilidad que permite focalizar la calibración y el análisis de incertidumbre que da las estadísticas para conocer la bondad de ajuste del modelo.

El grado de incertidumbre se cuantifica con la medida P-factor, el cual corresponde al porcentaje de los datos medidos dentro de una franja, de incertidumbre de la predicción de

95% (95PPU). Este valor se obtiene a partir de un muestreo Latino Hipercúbico donde se descarta el 5% de las peores simulaciones.

Otra medida que se utiliza es el factor-R, el cual corresponde al grosor promedio de la banda de incertidumbre. El factor -P oscila entre 0-100% y el factor-R entre 0 e infinito. Cuando se tiene una factor-P de 1 y un factor-R de 0, se presenta un ajuste perfecto, el grado en el cual estos valores difieren permite juzgar la fortaleza de la calibración, por tanto se tiene que encontrar un equilibrio entre ambos.

La bondad del ajuste entre estas medidas puede ser cuantificada mediante el R^2 y del coeficiente de Nash-Sutcliffe, un buen ajuste se alcanza cuando el $NS \geq 0.60$ y el $R^2 \geq 0.60$. (Velásquez, 2014).

Tabla 32. Evaluación de la calibración a través de NSE, PBIAS y RSR

Clasificación	RSR ⁽¹⁾	NSE ⁽²⁾	PBIAS (%) ⁽³⁾		
			Drenaje	Sedimento	N.P
Muy bueno	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$	$PBIAS < \pm 15$	$PBIAS < \pm 25$
Bueno	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 30$	$\pm 25 \leq PBIAS < \pm 40$
Satisfactorio	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$\pm 30 \leq PBIAS < \pm 55$	$\pm 40 \leq PBIAS < \pm 70$
Insatisfactorio	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$	$PBIAS \geq \pm 55$	$PBIAS \geq \pm 70$

(1) Error cuadrático medio de observación del radio de la desviación estándar (RSR)

(2) Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

(3) Porcentaje de Bias (PBIAS). Sesgo

Optimización de parámetros con SWAT – CUP

El modelo Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) se empleó para el análisis de sensibilidad de los parámetros, la calibración, validación y el análisis de incertidumbre. La metodología utilizada fue la sugerida por (Abbaspour, 2007).

1. Calibrar el modelo con los parámetros iniciales y graficar los valores simulados y observados en cada estación de aforo para todo el periodo de registro.
2. Con los resultados del paso anterior, dividir el periodo en periodo de calibración y periodo de validación, ambos deben tener similar número de años secos y húmedos.
3. Definir los parámetros a evaluar, generalmente son los que intervienen en los procesos de evapotranspiración, escorrentía, flujo lateral, flujo subterráneo y contenido de agua en el suelo.
4. Asignar rangos de incertidumbre a cada parámetro evaluado.
5. Calibrar el modelo (> - 1 interacción y < - 500 simulaciones), evaluar la sensibilidad de los parámetros que afectan el desempeño, usar como indicador la función objetivo (RSR, NSE y PBIAS).
6. Separar parámetros sensibles por grado de incertidumbre (p-Valor y t-Stat), evaluar la sensibilidad para el resto de los parámetros.

7. Seleccionar parámetros más sensibles en función de (p-Valor y t-Stat), agrupar por grado de sensibilidad, identificar nuevos pares de datos, realizar otra interacción para calibrar el modelo.
8. Identificar los valores óptimos según la función objetivo (RSR, NSE y PBIAS).
9. Realizar otras interacciones hasta que los rangos de los parámetros seleccionados se estabilicen.
10. Insertar los valores óptimos alcanzados al modelo hidrológico y proceder con la modelación final.

Los parámetros más sensibles que afectan el desempeño del modelo corresponden a procesos de almacenamiento de agua como: la conductividad hidráulica y la densidad aparente del suelo; procesos de infiltración del agua subterránea entre los que están: tiempo de demora para recargar los acuíferos, revalorización del agua subterránea y procesos relacionados al escurrimiento superficial: coeficiente de Manning y número de curva para la condición de humedad del suelo.

Tabla 33. Parámetros más sensibles de la calibración por orden de jerarquía

Grupo de parámetros	Parámetro/Tipo modificación	Definición y unidades	Valor por defecto		Valor ajustado	Jerarquía
			Min	Max		
Evapotranspiración	ESCO	Factor de compensación para la evaporación del suelo (fracción)	0.2	1	0.17	5
Escorrentía y Tiempo de concentración	SURLAG	Coefficiente de retardo de la escorrentía superficial (días)	0.1	24	-6.30	10
	OV_N	Coefficiente de Manning de la superficie terrestre	0.001	30	27.8	2
	CN2	Número de Curva inicial para la condición de humedad (%)	35	98	85.7	3
	CH_K	Conductividad hidráulica efectiva para canales principales (mm/h)	5	130	87.7	6
Flujo Lateral	LAT_TTIME	Tiempo de recorrido del flujo lateral (días)	5	180	0.26	9
Agua subterránea	ALPHA_BF	Factor alfa de recesión del flujo base (días)	0	1	-0.38	13
	GW_REVAP	Coefficiente de revaporización del agua subterránea (días)	0	0.2	0.06	16

Grupo de parámetros	Parámetro/Tipo modificación	Definición y unidades	Valor por defecto		Valor ajustado	Jerarquía
			Min	Max		
	GW_DELAY	Tiempo de demora para recargar el acuífero (días)	5	500	160.4	7
	GWQMN	Nivel del umbral freático para que ocurra flujo de retorno (mm)	0	2	1.21	11
	REVAPMN	Nivel del umbral freático para que ocurra revalorización (mm)	0	500	359.5	8
Rutina de Agua en el Canal	CH_N	Coefficiente de Manning para canales principales (n/a)	0	0.3	0.43	12
	ALPHA_BNK	Factor alfa de almacenamiento del flujo base	0	1	0.86	15
Agua en el Suelo	SOL_AWC	Capacidad de Campo (mm H ₂ O/mm suelo)	-0.2	0.4	0.01	14
	SOL_K	Conductividad hidráulica del suelo (mm/hr)	1	1000	157.8	1
	SOL_BD	Densidad aparente del suelo (g/cm ³)	-0.5	0.6	0.43	4
	FFCB	Almacenamiento Inicial del agua	0	1	0.8	17

Para el proceso de modelación se utilizaron tres años de calentamiento 1980-1982, la línea base comprendió el periodo 1983-2010 y la validación se realizó entre 2011-2015.

Se utilizaron cuatro (4), estaciones hidrométricas las cuales se encuentran distribuidas estratégicamente en las principales subcuencas.

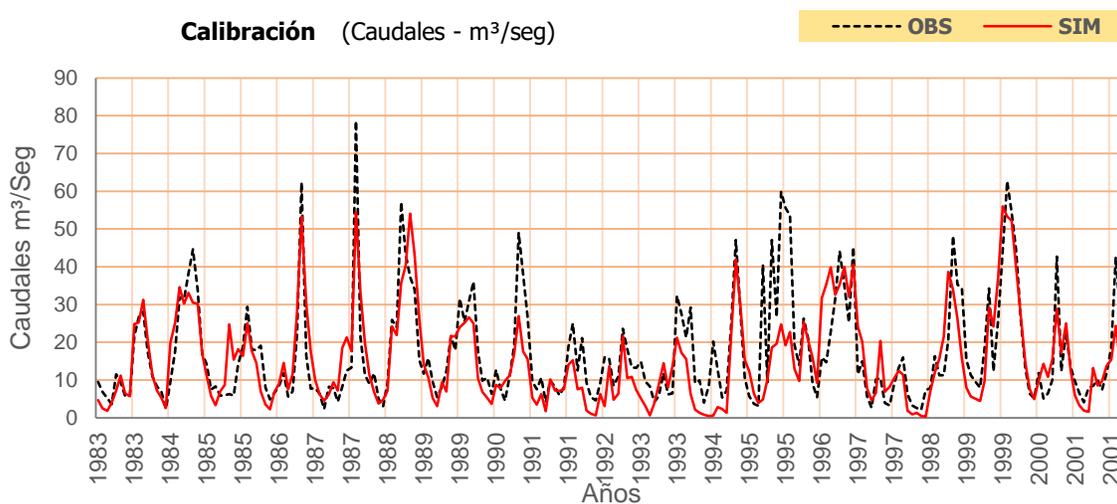
Tabla 34. Resultados de la calibración por estación

Estación		Subcuenca			Caudal (m ³ /s)		Evaluación de la calibración			
Número	Nombre	Número	Río	Área (Km ²)	Medido	Modelado	Proceso	RSR ⁽¹⁾	NSE ⁽²⁾	PBIAS <±25
134-01-01	Río Grande	4	Río Grande Parte Alta, Río Harino y Río Potrero	492.85	17.8	21.4	Calibración	0.64	0.59	-11.50%
							Validación	0.58	0.66	0.70%
134-02-01	El Cortezo	7	Río Chico Tramo Alto y Medio	323.32	15.4	21.1	Calibración	0.54	0.71	4.80%
							Validación	0.54	0.71	3.10%
134-03-01	Cañaverl	2		338.2	9.0	9.5	Calibración	0.69	0.52	12.30%

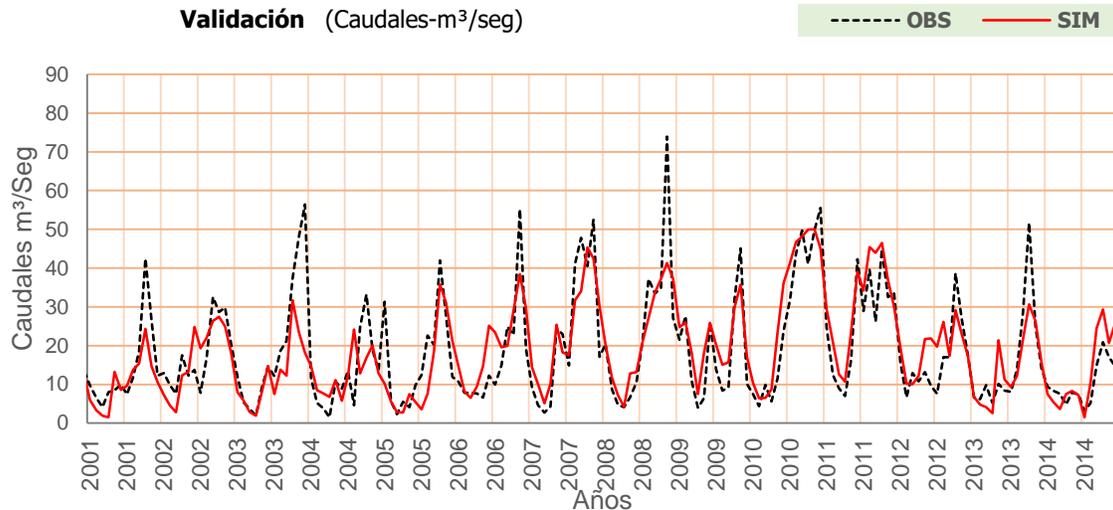
Estación		Subcuenca			Caudal (m ³ /s)		Evaluación de la calibración			
Número	Nombre	Número	Río	Área (Km ²)	Medido	Modelado	Proceso	RSR ⁽¹⁾	NSE ⁽²⁾	PBIAS <±25
			Río Cocle del Sur				Validación	0.7	0.5	-17.10%
134-04-01	Murcielaguero	1	Río Zarati Parte Alta	131.68	5.6	5.4	Calibración	0.64	0.59	1.30%
							Validación	0.69	0.52	-15.70%

Estación 134-01-01 – Río Grande

Localizada en la subcuenca 4, tiene un área de drenaje de 492.85 km², registra un caudal promedio de 17.8 m³/s, el modelo estima en este tramo de la cuenca un caudal de 21.4 m³/s, el resultado de la calibración muestra un NSE de 0.59 que se considera satisfactorio y de 0.66 en la validación que lo clasifica como bueno.



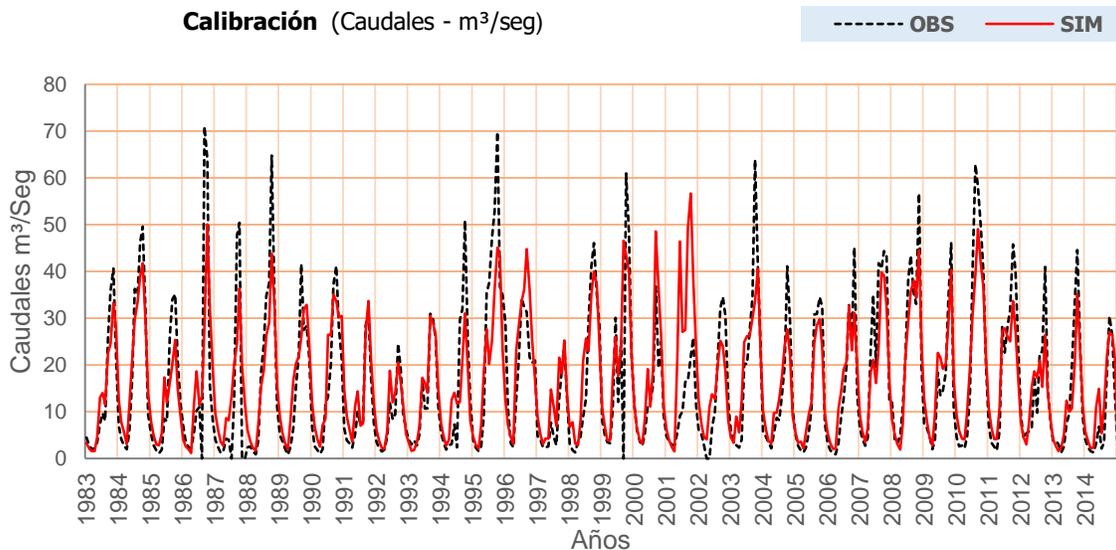
Gráfica 10 Caudales calibrados en la estación Río Grande 1983 - 2001



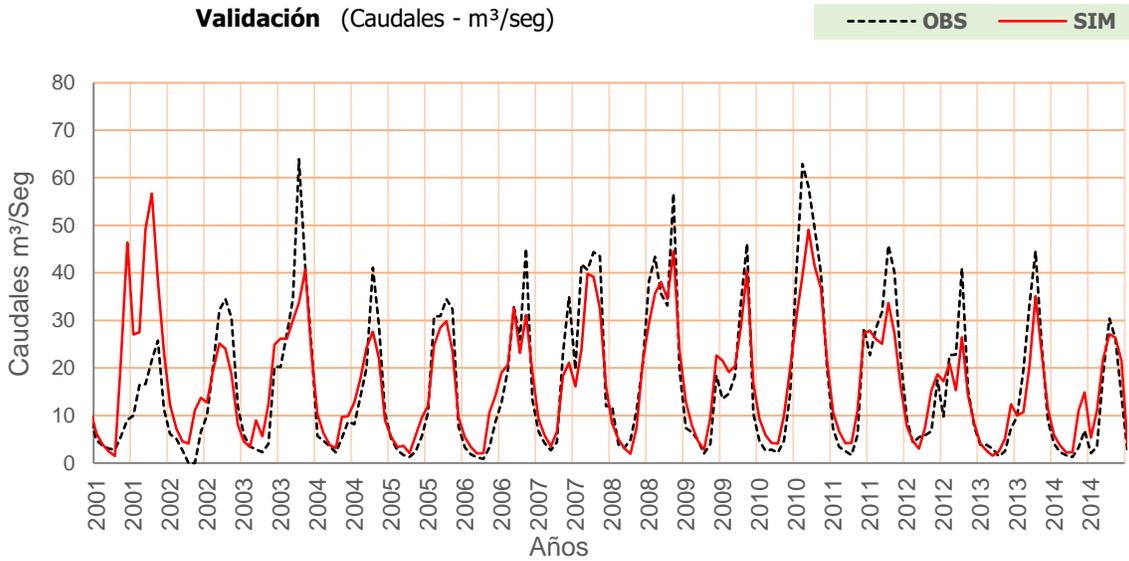
Gráfica 11 Caudales validados en la estación Río Grande 2001 - 2014

Estación 134-02-01 – El Cortezo

Se ubica dentro de la subcuenca 7 tiene un área de drenaje 323.32 km², el caudal promedio medido en el año es 15.4 m³/s, el modelo registra en este tramo de la cuenca 21.1 m³/s, la eficiencia del resultado muestra un NSE de 0.71 en el proceso de calibración y validación esto lo ubica en el rango de bueno.



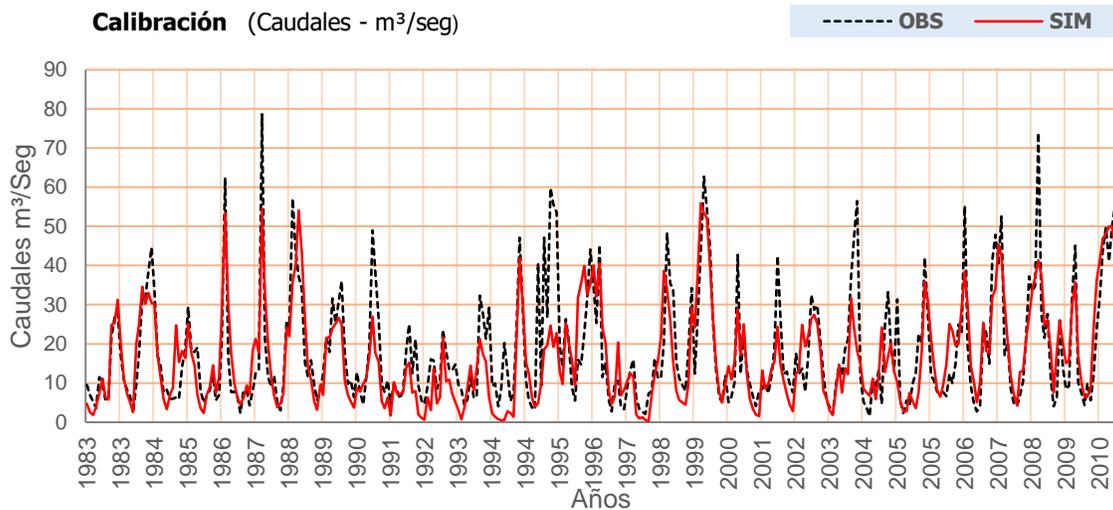
Gráfica 12 Caudales calibrados en la estación El Cortezo 1983 - 2014



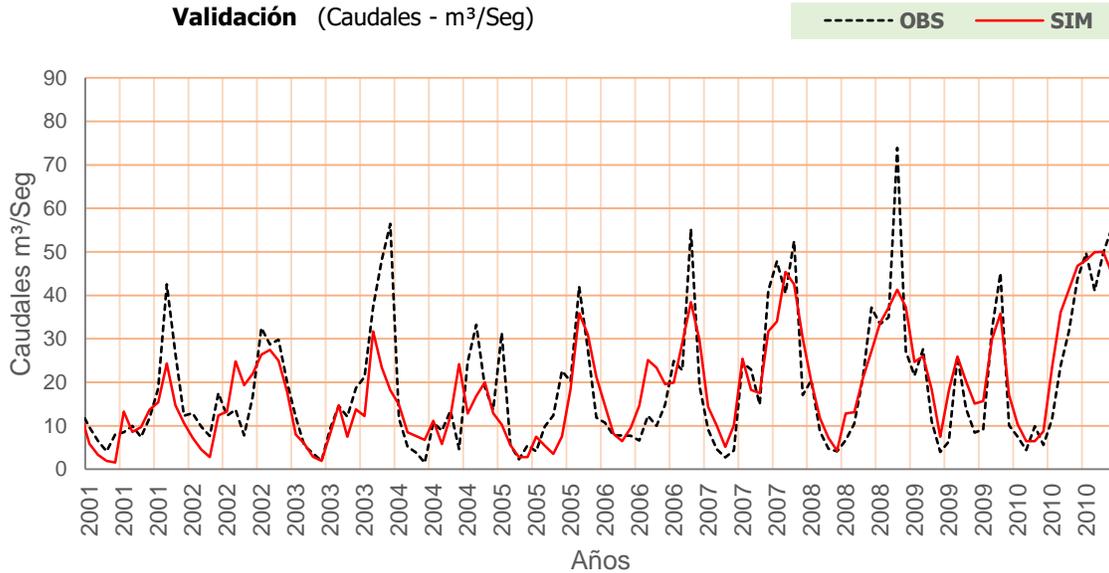
Gráfica 13 Caudales validados en la estación El Cortezo 2011 – 2014

Estación 134-03-01 – Cañaverl

Localizada en la subcuenca 2 del río Coclé del Sur su área de drenaje es de 338.2 km², la estación registra un caudal promedio anual de 9.0 m³/s, la modelación para este tramo de la cuenca dio un caudal de 9.5 m³/s, en esta estación se obtuvo un NSE de 0.52 en el proceso de calibración y de 0.50 en el de validación, estas medidas lo ubican dentro del rango satisfactorio.



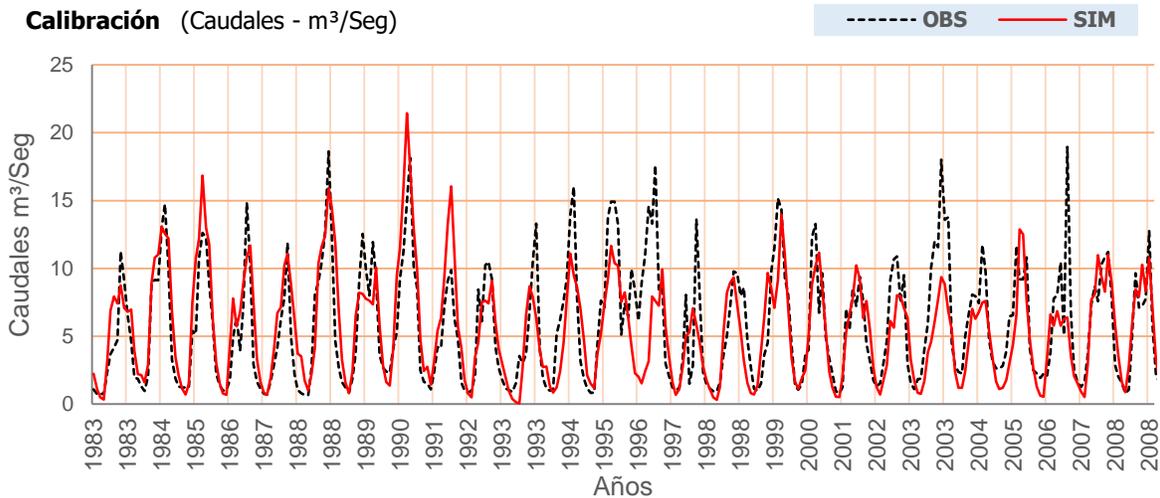
Gráfica 14 Caudales calibrados en la estación Cañaverl 1983 - 2010



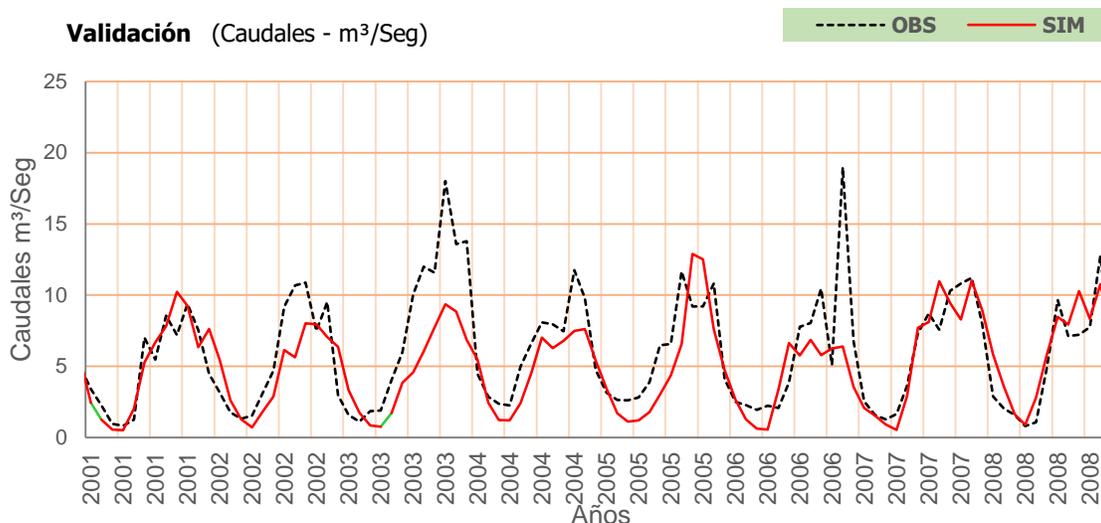
Gráfica 15 Caudales validados en la estación Cañaveral 2001 – 2010

Estación 134-04-01 – Murcielaguero

Se ubica dentro de la subcuenca 1, tiene un área de drenaje de 131.68 km², la estación registra un caudal promedio anual de 5.6 m³/s y el modelo lo estimó en 5.4 m³/s, para el proceso de calibración se obtuvo un NSE de 0.59 y en el de validación de 0.52, ambas medidas son consideradas satisfactorias.



Gráfica 16 Caudales calibrados en la estación Murcielaguero 1983 - 2008



Gráfica 17 Caudales validados en la estación Murcielaguero 2001 – 2008

3.5. DEMANDA DEL RECURSO HIDRICO EN LA CUENCA

La demanda de agua en la cuenca se evaluó a partir de los datos registrados de concesiones que tiene la Dirección de Gestión de Cuencas Hidrográficas del Ministerio de Ambiente. Los registros se encuentran sistematizados por nombre de usuarios, coordenadas (UTM/GWS84), uso o actividad, fuente de extracción, superficie, cultivo, caudal solicitado en la época seca y lluviosa para el caso de las que están en proceso de trámite y caudal otorgado para las que cuentan con permiso de extracción en el caso de estos últimos se tiene el volumen mensual extraído.

La base de datos esta sistematizada en función de los cinco (5) meses de la temporada seca (diciembre a abril) y de los siete (7) meses de la temporada lluviosa (mayo a noviembre).

Los registros formales en la cuenca contabilizan cincuenta y uno (51) concesiones vigentes y cuarenta y uno (41) que están en proceso de trámites. De las concesiones vigentes existen dos (2) para producción hidroeléctrica las cuales demandan mayor volumen de agua, una se localiza en la subcuenca 4 o parte alta de Río Grande, tiene un caudal concesionado de 8,150 l/seg que equivalen a un volumen de 2182896 m³ por mes. La otra hidroeléctrica se encuentra en la cuenca 7 que corresponde a la cuenca de río Chico la demanda por generación hidroeléctrica es de mayor volumen promedia un volumen mensual de 5249871.36 m³ se entiende que estos usos corresponden a usos no consuntivos.

Para los usos registrados formalmente el caudal concesionado en la temporada seca promedia 115.3 l/s, para la época lluviosa el caudal concesionado en promedio es de 148.3 l/s. Los usos del agua en la cuenca están clasificados en seis (6) clases: Doméstico, Agrícolas, Pecuarios, Industrial, Hidroeléctrico y Turístico.

Demandas por tipo de uso (Estado Vigente)

En cuanto a los usos consuntivos vigentes registrados formalmente en toda la cuenca los usos agrícolas son los que demandan mayor volumen 51.5 m³/s en el año, la subcuenca de mayor demanda corresponde al tramo bajo de Río Grande del volumen demandado 72% es requerido en la temporada lluviosa y 28% en la temporada seca.

Los usos pecuarios demandan 5.9 m³/s en el año, las subcuencas de mayor demanda corresponden a río Zaratí en la parte alta y el tramo bajo de Coclé del Sur, el 75% del volumen demandado es requerido en la temporada lluviosa y 25% en la temporada seca.

En cuanto a la demanda para uso doméstico registrada formalmente en la cuenca se estima en 1.14 m³/s en el año, las subcuencas que presentan mayor demanda en cuanto a este uso corresponden a río Coclé del Sur, tramo bajo del río Zaratí y la subcuenca de río Hondo donde el 68% del volumen demandado es requerido en la temporada lluviosa y el 32% en la temporada seca.

El uso industrial del agua en la cuenca a nivel anual registrado formalmente es de 11.5 m³/s al año, las subcuencas con mayor demanda para este uso corresponden al tramo bajo de río Coclé del Sur y el tramo bajo de río Chico, el 73% de la demanda es requerida en la temporada lluviosa y el 27% en la temporada seca.

El uso del agua registrado para turismo es el más bajo 0.02 m³/s al año la demanda se registran en las subcuenca tramo bajo del río Zaratí la demanda es uniforme para ambas épocas del año.

La demanda por generación eléctrica en la cuenca corresponde a uso no consuntivo es el que mayor caudal demanda al año 136.5 m³/s, en la temporada seca demanda 41% y en la temporada lluviosa 51%, el caudal promedio mensual demandado para generación hidroeléctrica es de 93.9 m³/s las subcuencas de río Grande en la parta alta y de río Chico en el tramo medio son los sitios que registran este uso en la cuenca.

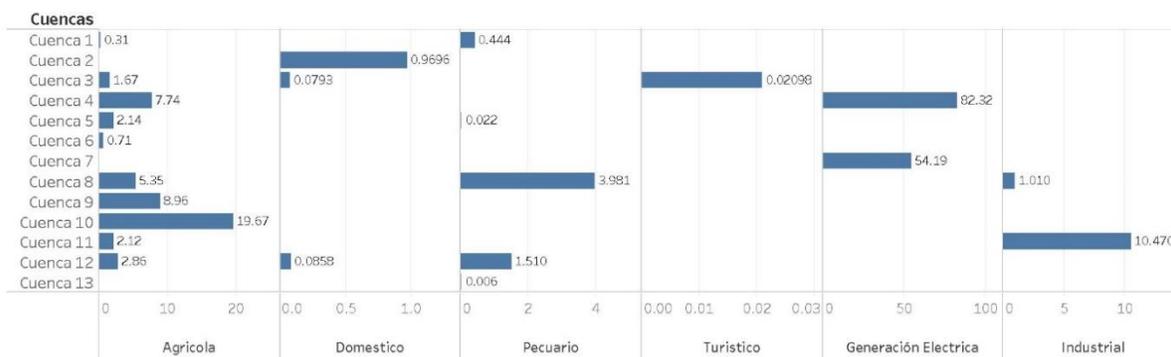
Tabla 35. Caudales totales con registros formales por uso en estado vigente hasta 2016

Uso Registrado formalmente	Caudales totales concesionados por subcuenca en m ³ /s (Estado Vigente)													Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Domestico		1.0	0.1									0.1		1.13
Agrícola	0.3		1.8	7.7	2.1	0.7		5.4	9.0	19.6	2.1	2.9		51.5
Pecuario	0.4				0.02			4.0				1.5	0.01	6.0
Turístico			0.02											0.02
Generación Eléctrica				82.3			54.19							136.50
Industrial								1.01			10.5			11.5
Total	0.8	1.0	1.8	90.1	2.2	0.7	54.19	10.3	9.0	19.7	12.6	4.5	0.01	206.63

Fuente: Dirección de Gestión Integrada de Cuenas Hidrográficas. Ministerio de Ambiente.

Es necesario indicar que la estadística que representa la demanda en la cuenca corresponden a usos formales registrados en el Ministerio de Ambiente no se está incluyendo los usuarios informales y los usos que podrían darse por parte de otras actividades.

Usos de agua concesionados por subcuenca en estado vigente (m³/s)



Gráfica 18 Uso de agua concesionada por subcuenca estado vigente (m³/s)

Demandas de agua por tipo de uso (Proceso de trámite)

Las demandas en estado de trámite no están vigentes en la cuenca están en un proceso de evaluación, considerando la disponibilidad hídrica pueden ser otorgados en el futuro no se les ha calculado el volumen mensual demandado, pero dentro del proceso de trámite se registra el volumen requerido para la época seca y la lluviosa en l/seg. A partir de esto se calculó el volumen requerido para cada mes.

En la cuenca los registros en proceso de trámite se dan para todos los usos a excepción de la generación eléctrica, en esta categoría se está solicitando en total 58.2 m³/s más de los ya concesionados, la subcuenca con mayor solicitud de concesiones corresponde a la subcuenca de río Pocrí

Para el uso doméstico se está solicitando un total anual de 0.11 m³/s se encuentran distribuidos en las subcuencas de río Coclé del Sur, tramo bajo de río Grande y río Hondo de este total el 58% se requiere en la temporada lluviosa y 42% en la temporada seca.

Las solicitudes para uso agrícola continúan siendo la de mayor demanda en la cuenca en proceso de trámite se solicita en caudal 56.7 m³/s anual. Las subcuencas con mayor demanda para este uso corresponden al tramo bajo de río Coclé del Sur, tramo bajo de río Grande, tramo bajo de río Chico y río Pocrí el 60% es requerido en la temporada lluviosa y el 40% en la temporada seca.

Tabla 36. Caudales totales con registros formales por uso en proceso de trámite hasta 2016

Uso Registrado formalmente	Caudales totales concesionados por subcuenca en m ³ /s (Estado-Tramite)													Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Domestico		0.03			0.02					0.04		0.01	0.01	0.11
Agrícola								16.9		34.8	1.4		3.5	56.71
Pecuario												0.6	0.01	0.6
Turístico													0.3	0.3
Generación Eléctrica														
Industrial					0.2			0.03		0.2		0.1		0.4
Total		0.03			0.17			17.01		35	1.41	0.70	3.81	58.12

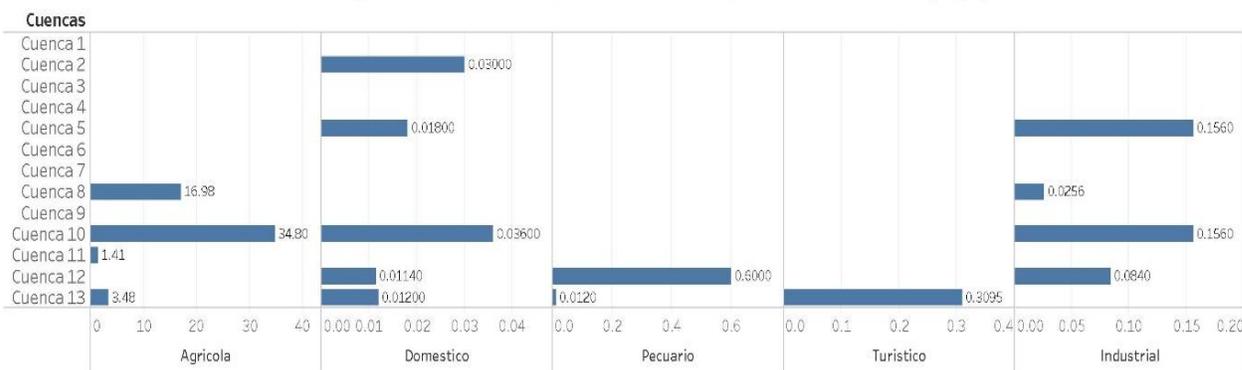
Fuente: Dirección de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas. Ministerio de Ambiente.

El uso del agua destinada a las actividades pecuaria en proceso de tramite registra 0.6 m³/s anuales las solicitud se hacen para la subcuenca de río Hondo y río Pocrí. El 59% es solicitado en la temporada lluviosa y el 41% en la temporada seca.

Para uso turístico también existen solicitudes en proceso de trámite se solicitan 0.3 m³/s anuales y se ubican en la subcuenca de río Pocrí.

La solicitud de agua para uso industrial totalizan 0.4 m³/s este total se distribuye en las subcuencas de río Grande tramo bajo, río Coclé del Sur tramo bajo y río Hondo; del caudal solicitado 59% es para la temporada lluviosa y 41% para la temporada seca.

Usos de agua concesionados por subcuenca en proceso de tramite (m³/s)



Gráfica 19 Uso de agua concesionada por subcuenca en proceso de tramite (m³/s)

4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1. BALANCE HÍDRICO CUENCA DE RÍO GRANDE LÍNEA BASE 1980-2015

Bajo el supuesto que la precipitación es la única fuente que proporciona la entrada de agua a la cuenca de Río Grande (134), aporta 1818.1 mm al año. Los resultados obtenidos por la modelación de la línea base indican que el 43% de este total (782.4 mm) regresa a la atmosfera por procesos de evapotranspiración. Alrededor de 16% (294.7 mm) alimenta el flujo lateral, 35% (644.5 mm) escurre a nivel superficial hasta llegar a los ríos, 2.30 m, se percola filtrándose el 4.1 % (74.8 mm) para recargar los acuíferos profundos, 1% (18.2 mm) se mantiene en el acuífero superficial y alimenta el flujo base y 1.2 mm del agua del acuífero superficial regresa a la atmosfera por re-evaporación.

La producción de agua corresponde a la suma del flujo lateral, el escurrimiento superficial y el flujo base, se calcula en 962.1 mm (52.9%) del total del sistema.

Tabla 37. Balance Hídrico Cuenca Río Grande, Periodo 1980-2015 (Línea Base)

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
Precipitación (mm)	20.89	13.51	16.15	44.85	181.30	224.75	177.00	225.93	288.73	332.59	211.90	80.50	1818.11
Escorrentía Superficial (mm)	2.34	1.26	1.45	3.74	39.46	72.52	57.89	80.75	120.70	150.32	87.42	26.64	644.48
Flujo Lateral (mm)	10.73	6.20	4.78	8.00	24.78	30.93	29.00	36.31	41.87	48.03	33.54	20.57	294.73
Percolación (mm)	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07	0.12	0.12	0.19	0.44	0.74	0.47	0.14	2.30
Flujo Subterráneo/Flujo Base (mm)	2.33	1.84	1.70	1.38	1.19	0.98	0.95	0.93	1.00	1.42	2.04	2.49	18.25
Recarga al Acuífero Profundo	-2.33	-1.84	-1.70	-1.37	-1.11	-0.86	-0.83	-0.73	-0.56	-0.68	-1.57	-2.35	-15.95
Evapotranspiración (mm)	43.46	17.95	35.77	25.30	65.39	80.87	83.29	88.18	94.02	92.52	85.58	70.06	782.39
Producción de Agua (mm)	17.69	10.04	8.44	13.08	62.14	102.86	89.43	115.38	160.12	197.25	129.65	56.05	962.14
Caudal (m ³ /seg)	4.11	2.71	2.00	3.20	14.44	24.41	20.66	26.50	37.37	44.14	29.77	12.73	222.05

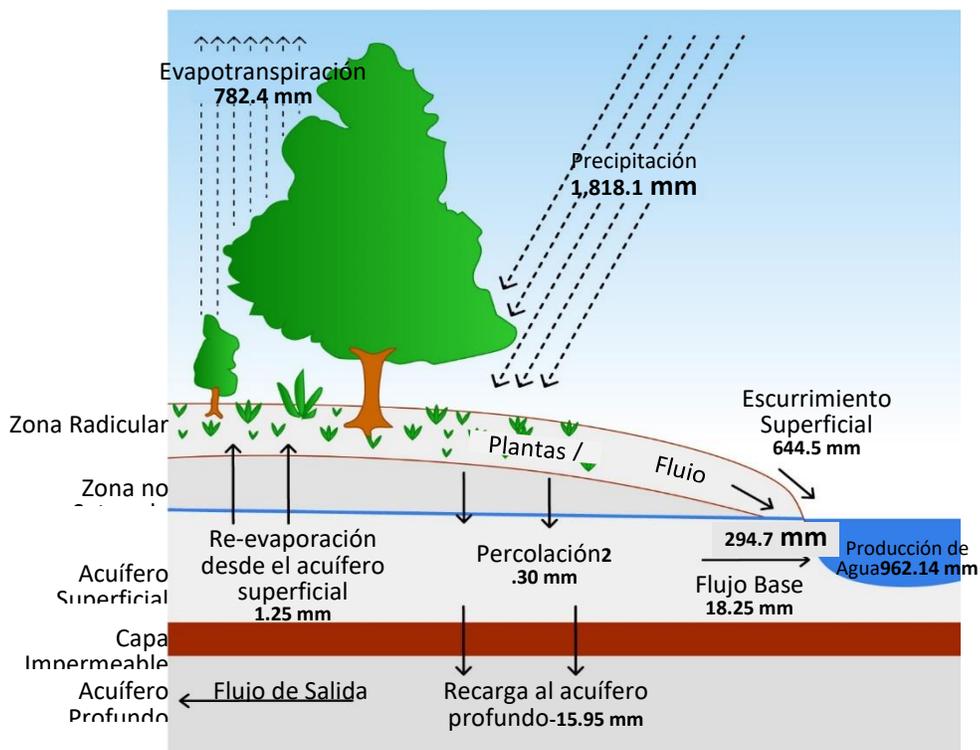


Figura 13. Diagrama del Balance Hídrico en la cuenca de río Grande. Línea Base

4.2. BALANCE HÍDRICO CUENCA DE RÍO GRANDE RCP 2.6 (2016-2070)

Para este escenario la precipitación anual en la cuenca de río Grande es de 1862.31 mm al año. Los resultados del modelo indican que de este total 44.7 % (832.66 mm) regresa a la atmosfera por procesos de evapotranspiración. Alrededor de 16.3 % (304.9 mm) alimenta el flujo lateral en la cuenca, 35% (647.6mm) escurre a nivel superficial hasta llegar a los ríos, 2.11 mm, se percola filtrándose el 3.2 % (60 mm) para recargar los acuíferos profundos, 0.75% (13.9 mm) se mantiene en el acuífero superficial y alimenta el flujo base y 0.1 mm del agua disponible del acuífero superficial regresa a la atmosfera por re- evaporación.

La producción de agua corresponde a la suma del flujo lateral, el escurrimiento superficial y el flujo base, se calcula en 970.4 mm (52.10%) del total del sistema.

Tabla 38. Balance Hídrico Cuenca Río Grande, Periodo 2016-2070 (Escenario 2.6)

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
Precipitación (mm)	28.82	21.12	22.75	68.79	199.19	230.64	182.77	226.78	276.76	323.46	202.95	78.29	1862.31
Escorrentía Superficial (mm)	5.12	1.79	1.64	5.87	48.09	80.50	60.81	78.28	113.54	147.25	81.29	23.44	647.64

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
Flujo Lateral (mm)	12.31	8.71	5.93	10.92	26.85	30.34	29.39	38.25	40.93	47.23	33.65	20.38	304.90
Percolación (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.16	0.11	0.19	0.39	0.66	0.41	0.10	2.11
Flujo Subterráneo/Flujo Base (mm)	1.76	1.38	1.28	1.03	0.89	0.74	0.75	0.74	0.78	1.10	1.59	1.89	13.92
Recarga al Acuífero Profundo	-1.75	-1.38	-1.27	-1.03	-0.80	-0.59	-0.64	-0.55	-0.39	-0.44	-1.17	-1.79	-11.81
Evapotranspiración (mm)	46.82	20.84	39.19	38.68	74.53	83.65	86.33	91.54	96.85	93.63	88.12	72.48	832.66
Producción de Agua (mm)	21.18	12.46	9.28	17.48	70.48	110.85	93.41	114.79	153.11	193.43	122.90	51.04	970.39
Caudal (m ³ /seg)	5.25	3.55	2.28	4.30	16.32	25.61	21.16	26.57	35.90	43.19	28.70	11.78	224.60

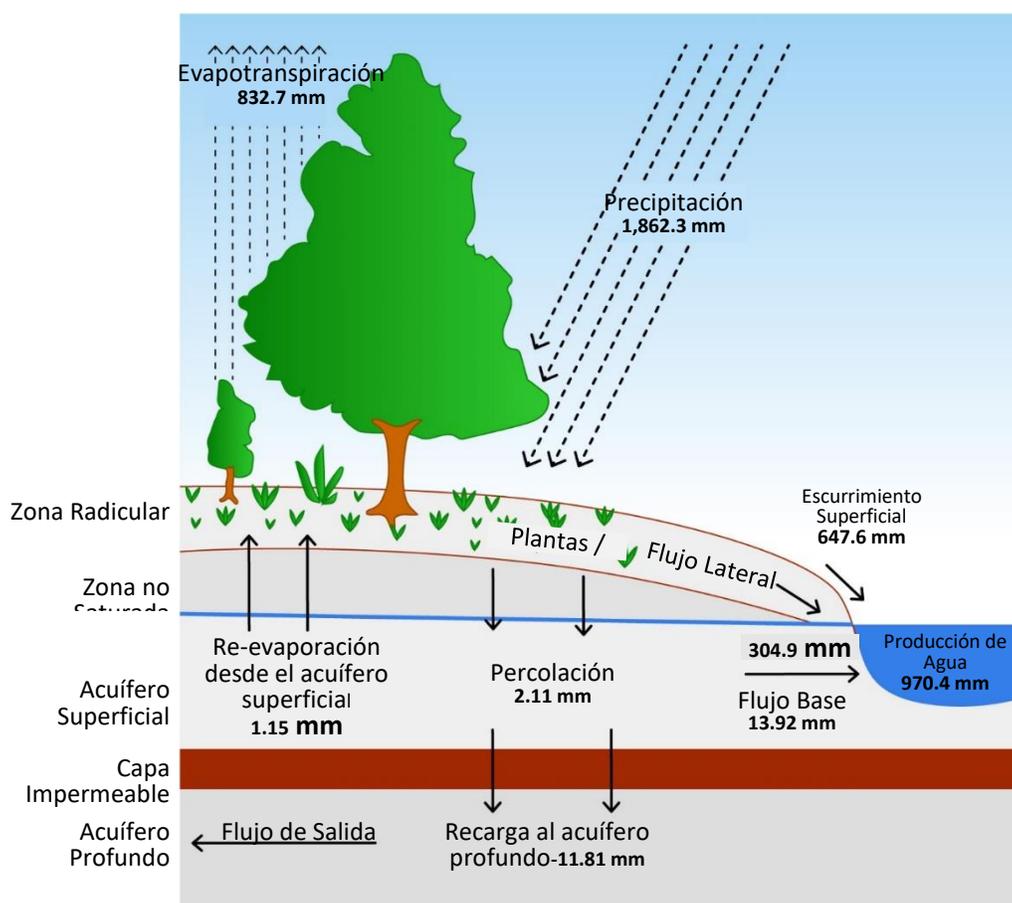


Figura 14. Diagrama del Balance Hídrico en la cuenca de río Grande. Escenario RCP 2.6

4.3. BALANCE HÍDRICO CUENCA DE RÍO GRANDE RCP 8.5 (2016-2070)

Con el escenario 8.5 la cuenca del río Grande presenta una precipitación media anual de 1832.11 mm. Los resultados del modelo indican que de este total 45.6% (837.1 mm) regresa a la atmósfera por procesos de evapotranspiración. Alrededor de 16.4% (299.7 mm) alimenta el flujo lateral en la cuenca, 33.4% (618.8 mm) escurre a nivel superficial hasta llegar a los ríos, 2.12 mm se percola filtrándose el 3.2 % (59.2 mm) para recargar los acuíferos profundos, 0.8% (14.1 mm) se mantiene en el acuífero superficial y alimenta el flujo.

La producción de agua corresponde a la suma del flujo lateral, el escurrimiento superficial y el flujo base, se calcula en 936.6 mm (51.1%) del total del sistema.

Tabla 39. Balance Hídrico Cuenca Río Grande, Periodo 2016-2070 (Escenario 8.5)

Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
Precipitación (mm)	36.81	20.59	24.49	63.68	192.27	221.47	172.09	227.30	264.48	320.09	206.55	82.29	1832.11
Escorrentía Superficial (mm)	10.42	1.35	1.53	5.48	44.01	70.87	53.47	76.84	103.06	138.46	85.92	27.41	618.83
Flujo Lateral (mm)	13.07	8.32	6.40	11.04	25.60	30.34	28.80	37.00	38.40	47.72	32.89	20.15	299.73
Percolación (mm)	0.01	0.00	0.00	0.01	0.07	0.13	0.11	0.21	0.34	0.71	0.43	0.12	2.12
Flujo Subterráneo/Flujo Base (mm)	1.83	1.44	1.34	1.08	0.93	0.78	0.76	0.73	0.77	1.04	1.54	1.88	14.13
Recarga al Acuífero Profundo	-1.82	-1.44	-1.33	-1.08	-0.87	-0.65	-0.66	-0.53	-0.43	-0.34	-1.11	-1.76	-12.01
Evapotranspiración (mm)	48.02	21.01	40.36	37.82	71.87	83.81	86.83	93.84	97.44	94.47	88.51	73.16	837.13
Producción de Agua (mm)	27.41	11.69	9.76	17.44	66.57	100.38	85.75	111.63	139.46	186.43	123.43	56.60	936.58
Caudal (m ³ /seg)	7.04	3.27	2.40	4.43	15.30	23.69	19.61	25.65	32.36	41.59	28.37	12.71	216.40

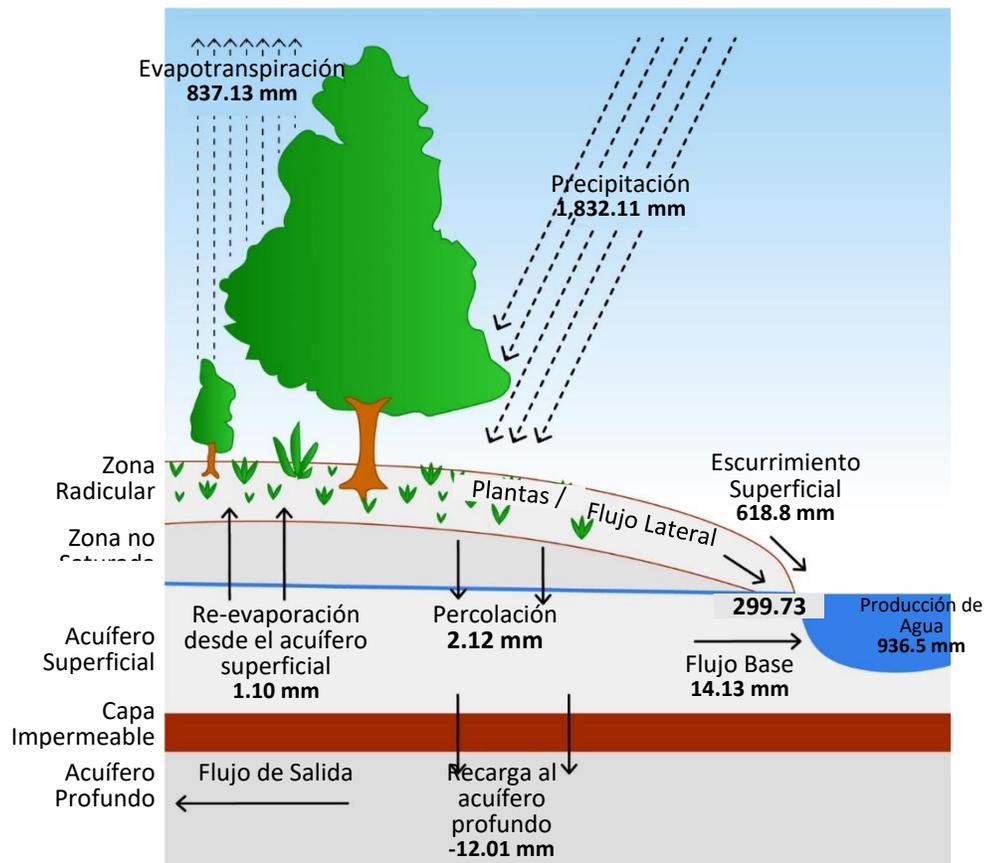


Figura 15. Diagrama del Balance Hídrico en la cuenca de río Grande. Escenario RCP 8.5

4.4. COMPARACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO LÍNEA BASE – ESCENARIOS

El periodo analizado como línea base corresponde a 1980 – 2015, se utilizó el modelo CCSM4 del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) y se consideró los escenarios RCP 2.6 (bajas emisiones) y RCP 8.5 (altas emisiones) para el periodo 2016 - 2070.

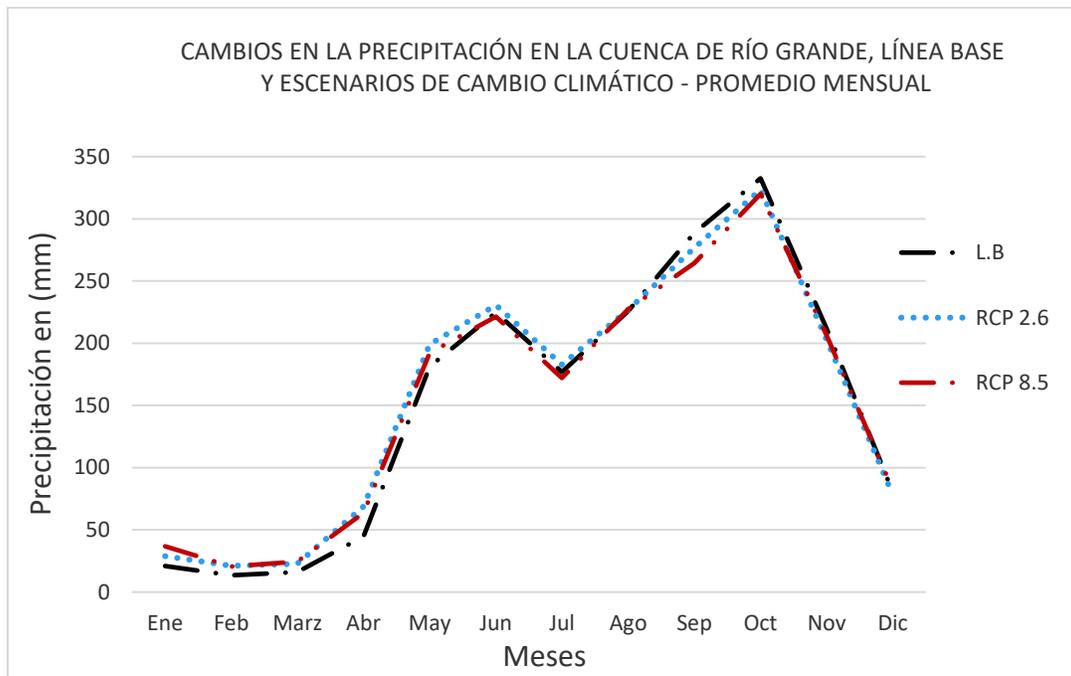
Tabla 40. Periodos considerados dentro de la línea base y escenarios

Línea Base/ Modelo	Periodo	Escenarios	
LBA	1980 - 2015	Línea Base Actual	
CCSM4	2016 - 2070	RCP 2.6	RCP 8.5

Las variaciones entre el escenario actual y los escenarios futuros se desarrollan a continuación y se representan mediante cuadros gráficos y mapas.

Cambios en la Precipitación

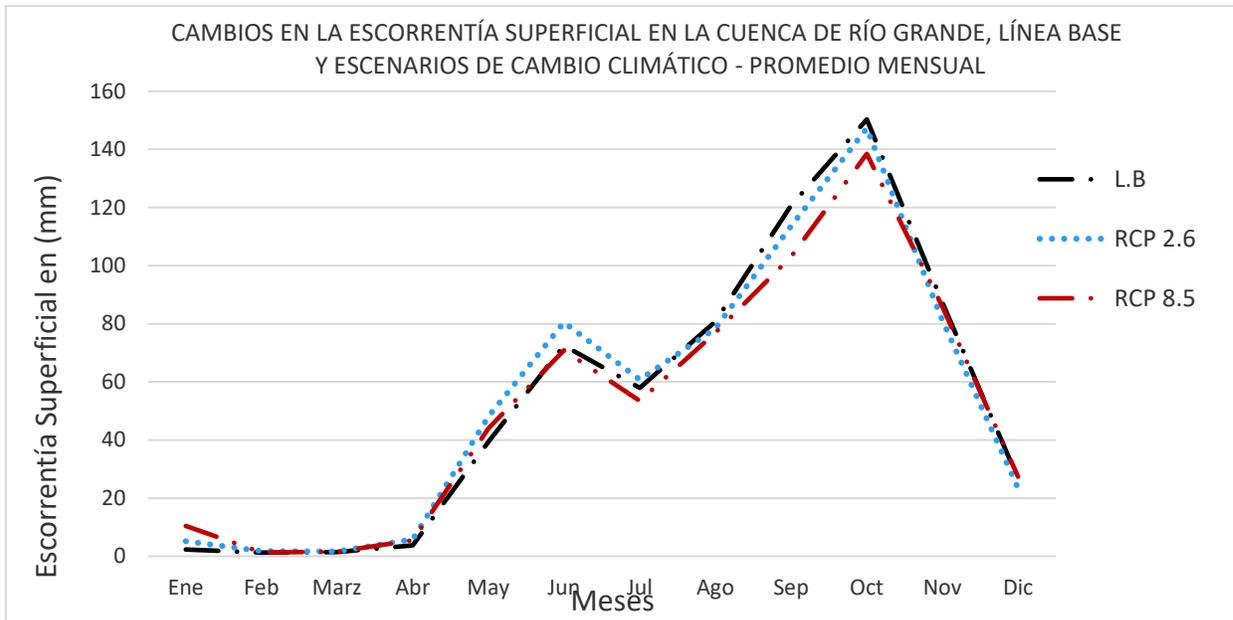
Las variaciones de precipitación para la línea base presenta disminución en los meses de la temporada seca (diciembre – abril), la misma tendencia mantienen los escenarios para RCP2.6 y RCP8.5. Al comparar los valores mensuales para ambas temporadas se puede concluir que el modelo CCSM4 sobreestima los valores de precipitación en la temporada seca y los subestima en la temporada lluviosa. En referencia a estos resultados se concluye que habrá un incremento de lluvias en temporadas secas y disminución en temporadas lluviosas.



Gráfica 20 Cambios en la precipitación. Línea base – Escenarios de cambio climático

Cambios en el Escurrimiento Superficial

La escorrentía superficial dentro de la cuenca de río Grande para el periodo actual es de 644.5 mm los valores máximos se dan en la temporada lluviosa, específicamente en el mes de octubre, los resultados de esta variable (escorrentía) para el escenarios RCP 2.6 muestran disminución de -2%, mientras que para el escenario RCP 8.5 la disminución es de -9% con respecto al escenario actual.

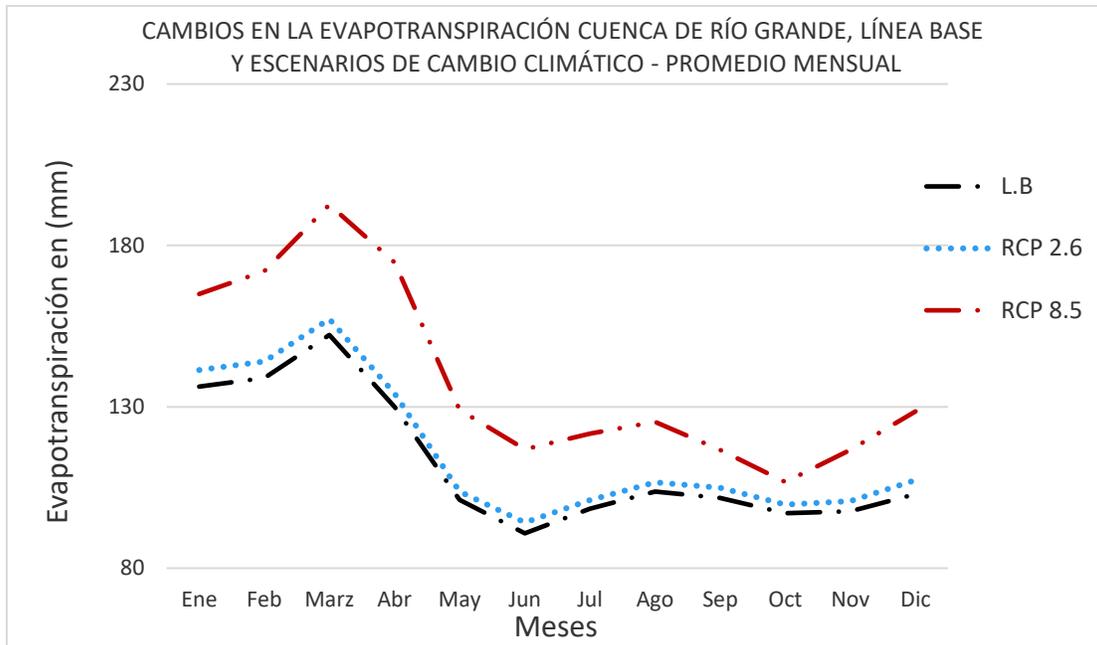


Gráfica 21 Cambios en la escorrentía. Línea base – Escenarios de cambio climático

Cambios en la Evapotranspiración

La evapotranspiración para el escenario actual es de 1351.04 mm los valores máximos se registran en el mes de marzo con 152 mm y los mínimos en el mes de junio con 90 mm, la misma tendencia se mantiene para los escenarios (RCP2.6 y RCP 8.5) a diferencia que se incrementan los valores en los escenarios. Para el escenario RCP 2.6 se da un incremento de 3.2% y para el RCP 8.5 la evapotranspiración muestra un incremento de 23.3%.

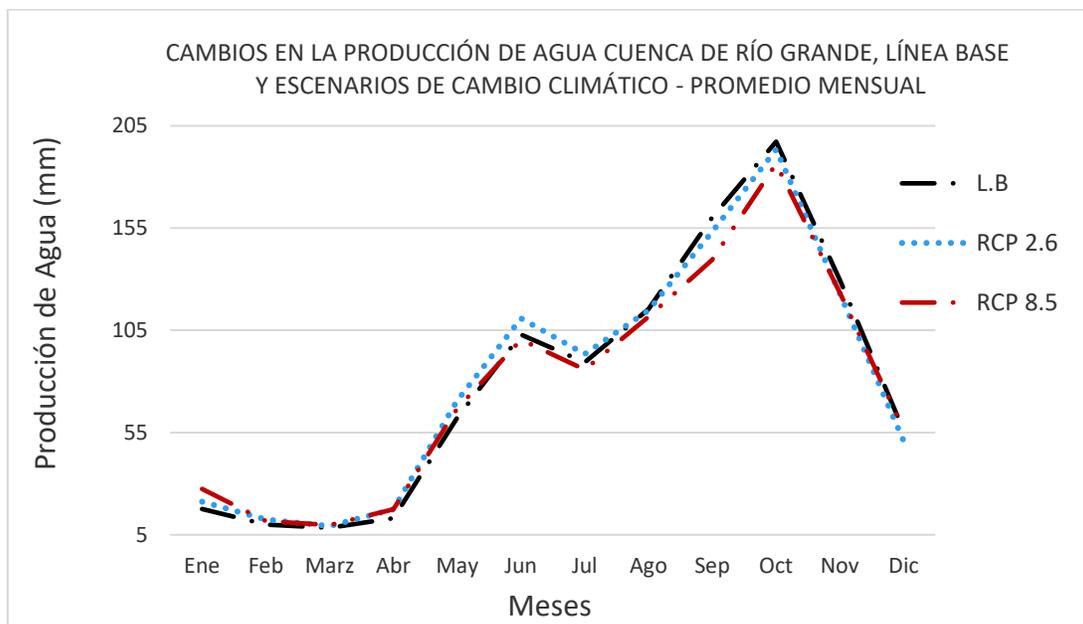
El comportamiento de la evapotranspiración en la cuenca guarda mucha relación con la precipitación, los meses de la temporada seca son los que presentan valores altos mientras que en la temporada lluviosa se registra una disminución.



Gráfica 22 Cambios en la evapotranspiración. Línea base – Escenarios de cambio climático

Cambios en la Producción de Agua

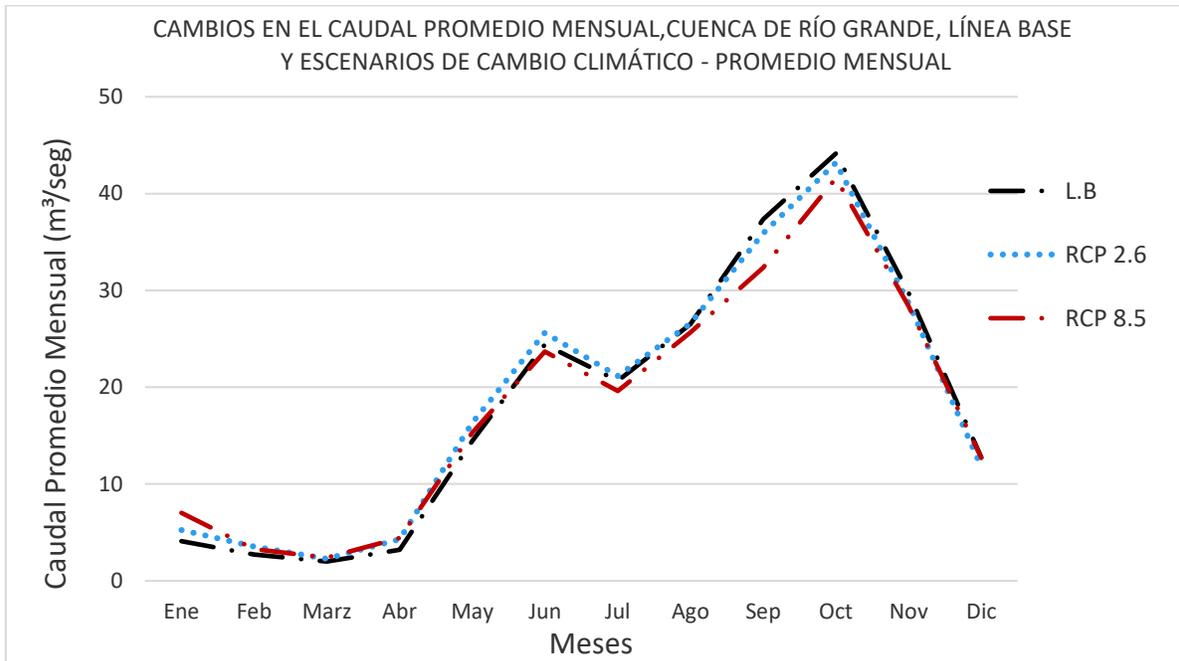
La producción de agua en la cuenca para el escenario actual es de 962.14 mm, respecto al RCP 2.6 presenta 1% de incremento en la producción de agua, para el escenario RCP 8.5 la producción de agua disminuye -2.7%, a nivel mensual se da una disminución en la producción de agua en la temporada lluviosa mostrando mayor porcentaje de disminución con el escenario RCP 8.5.



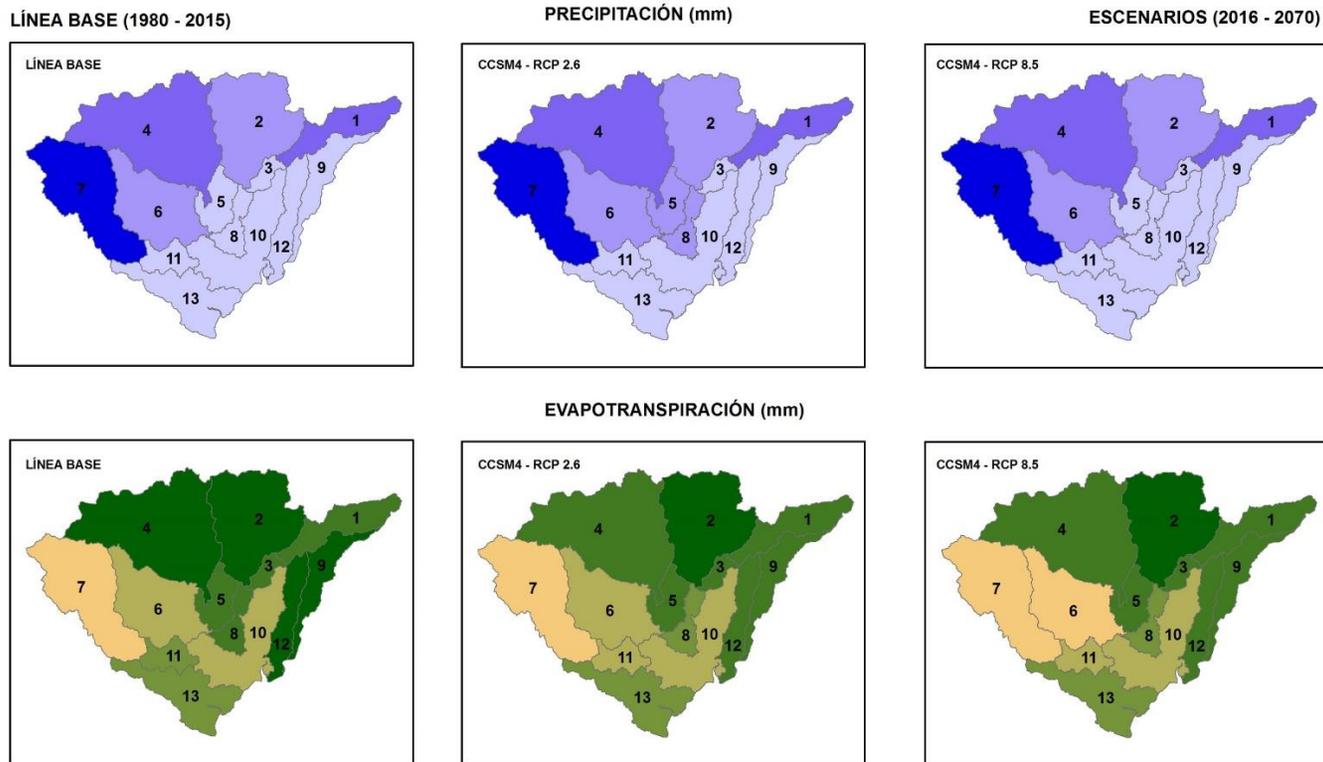
Gráfica 23 Cambios en la producción de agua. Línea base – Escenarios de cambio climático

Cambios en el Caudal Promedio Mensual

El caudal promedio mensual para el escenario actual es de 18.5 m³/s, respecto al escenario RCP 2.6 se da un leve incremento de 1.2%, para el escenario RCP 8.5 el caudal disminuye -2.5%. En cuanto a la distribución del caudal a nivel mensual sigue el mismo comportamiento que la precipitación, en los meses secos hay un ligero incremento en los escenarios respecto a la línea base y en la temporada lluviosa se presenta una disminución.



Gráfica 24 Cambios en el caudal promedio mensual. Línea base – Escenarios de cambio climático

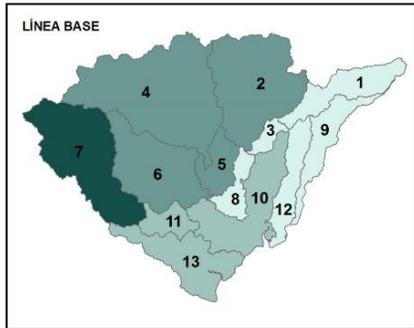


CAMBIOS EN VARIABLES DEL BALANCE HÍDRICO POR SUBCUENCA (RÍO GRANDE) PRECIPITACIÓN - EVAPOTRANSPIRACIÓN

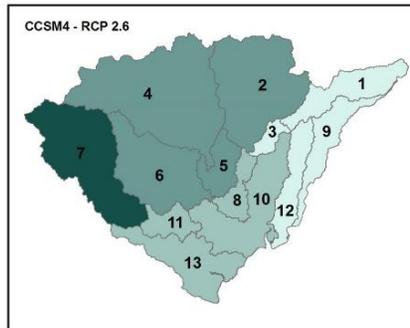
Código	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Subcuenca	Río Zarati Parte Alta	Río Cocle del Sur	Río Zarati Tramo Bajo	Río Grande Parte Alta, Río Harino y Río Potrero	Río Grande Tramo Bajo	Río Ola y Churube	Río Chico Tramo Alto y Medio	Río Cocle del Sur Tramo Bajo, Confluencia Río Grande	Río La Chorrera	Río Grande Tramo Bajo, Qda Lajas	Río Chico Tramo Bajo	Río Hondo	Río Pocrí	
Precipitación (mm)					Evapotranspiración (mm)									
1200 - 1500					600 - 700			700 - 800		800 - 900		900 - 1000		1000 - 1100
1500 - 2000					700 - 800			800 - 900		900 - 1000		1000 - 1100		
2000 - 2500					800 - 900			900 - 1000		1000 - 1100				
2500 - 3000					900 - 1000			1000 - 1100						
3000 - 3200					1000 - 1100									

Figura 16. Cambios en las variables del balance hídrico. Precipitación y evapotranspiración

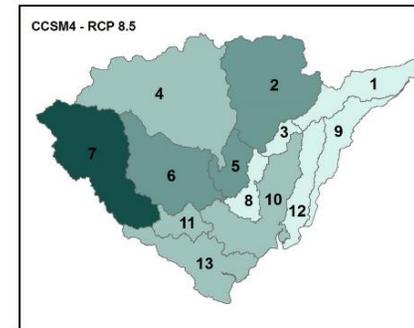
LÍNEA BASE (1980 - 2015)



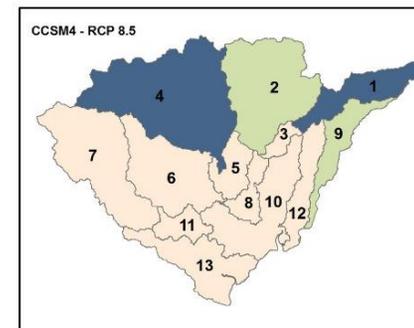
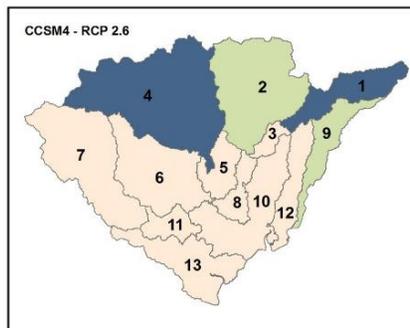
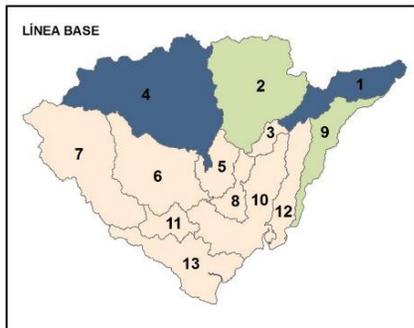
ESCORRENTIA SUPERFICIAL (mm)



ESCENARIOS (2016 - 2070)



FLUJO LATERAL (mm)

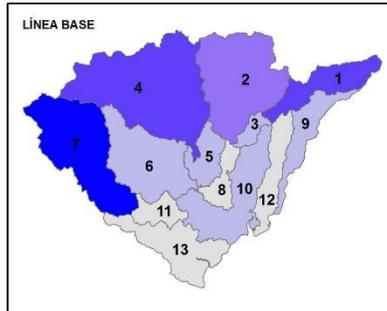


CAMBIOS EN VARIABLES DEL BALANCE HÍDRICO POR SUBCUENCA (RÍO GRANDE) ESCORRENTÍA SUPERFICIAL - FLUJO LATERAL

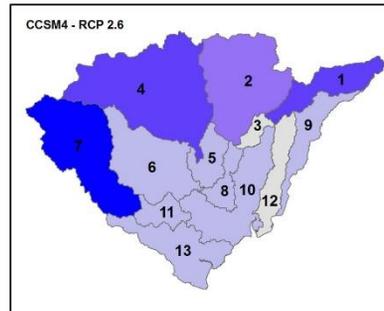
Código	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Subcuenca	Rio Zarati Parte Alta	Rio Cocle del Sur	Rio Zarati Tramo Bajo	Rio Grande Parte Alta, Rio Harino y Rio Potrero	Rio Grande Tramo Bajo	Rio Ola y Churube	Rio Chico Tramo Alto y Medio	Rio Cocle del Sur Tramo Bajo, Confluencia Rio Grande	Rio La Chorrera	Rio Grande Tramo Bajo, Qda Lajas	Rio Chico Tramo Bajo	Rio Hondo	Rio Poci
Ecurrimiento Superficial (mm)					Flujo Lateral (mm)								
0 - 250	250 - 500	500 - 1000	1000 - 1500	1500 - 2000	0 - 200	200 - 400	400 - 600	600 - 800	800 - 1000				

Figura 17. Cambios en las variables del balance hídrico. Escorrentía superficial y flujo lateral

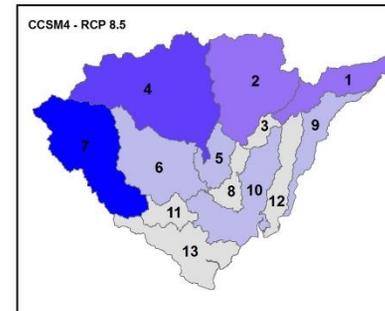
LÍNEA BASE (1980 - 2015)



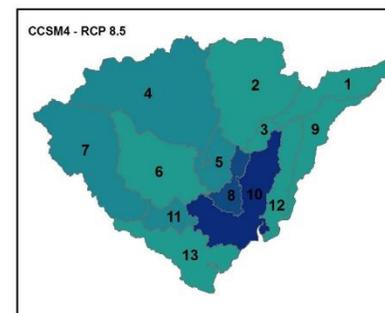
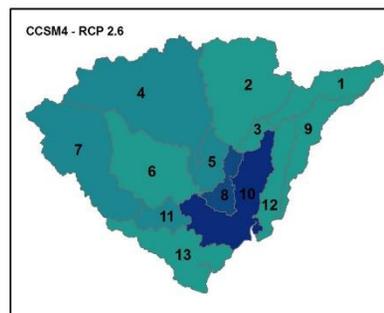
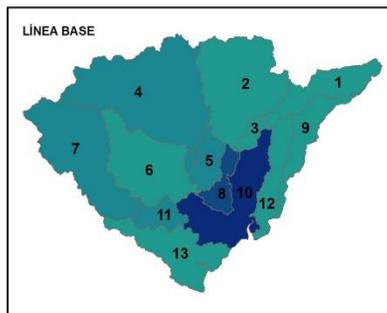
PRODUCCIÓN DE AGUA (mm)



ESCENARIOS (2016 - 2070)



CAUDAL PROMEDIO ANUAL (m³/seg)



CAMBIOS EN VARIABLES DEL BALANCE HÍDRICO POR SUBCUENCA (RÍO GRANDE) PRODUCCIÓN DE AGUA - CAUDAL PROMEDIO ANUAL

Código	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Subcuenca	Río Zarati Parte Alta	Río Cocle del Sur	Río Zarati Tramo Bajo	Río Grande Parte Alta, Río Harino y Río Potrero	Río Grande Tramo Bajo	Río Ola y Churube	Río Chico Tramo Alto y Medio	Río Cocle del Sur Tramo Bajo, Confluencia Río Grande	Río La Chorrera	Río Grande Tramo Bajo, Qda Lajas	Río Chico Tramo Bajo	Río Hondo	Río Poci
PRODUCCIÓN DE AGUA (mm)													
	0 - 400	400 - 800	800 - 1200	1200 - 1600	1600 - 2000								
CAUDALES PROMEDIO (m³/seg)													
	2 - 15	15 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 70								

Figura 18. Cambios en la producción de agua y el caudal promedio anual

4.5. DISPONIBILIDAD Y ESCASEZ DEL RECURSO HIDRICO

Disponibilidad

Para estimar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca se utilizó la producción de agua este valor se obtiene a partir de la suma de los escurrimientos superficiales y subsuperficiales, menos las pérdidas por transmisión y las abstracciones de los almacenamientos. La producción de agua en la cuenca para la línea base se estimó en 962.14 mm. Para evaluar la disponibilidad en toda la cuenca se convirtió la producción de agua de mm a m³/seg en cada subcuenca.

Al evaluar los resultados de la producción de agua en la cuenca y su relación con la demanda el 35% de la superficie de la cuenca de río Grande no cuenta con disponibilidad del recurso hídrico. Bajo condiciones del escenario actual y futuro se identifican algunas subcuencas donde las condiciones de disponibilidad son más acentuadas que otras, el tramo bajo de la subcuenca de río Grande tiene un déficit de producción de agua de 16 m³/seg respecto a lo que demanda la cuenca, bajo condiciones de escenarios futuros la misma subcuenca presenta un déficit de -51 m³/seg, en este sector se presentan los principales problemas por disponibilidad.

Otras de las subcuencas que presentan problemas relacionados con la disponibilidad es la subcuenca de río Chico en su tramo bajo, para el periodo actual la disponibilidad actual de agua presenta un déficit de -12 m³/seg con respecto al caudal demandado y con la posibilidad de que este déficit se incremente al futuro a - 13 m³/seg.

Tabla 41. Disponibilidad de Agua en la Cuenca de Río Grande (m³/s)

Código	Nombre de la Subcuenca	Producción de Agua			Demanda de Agua			Disponibilidad	
		Línea Base	Escenario 2.6	Escenario 8.5	Actual	Tramite	Total	Actual	Escenarios
1	Río Zaratí Parte Alta	5.45	5.33	5.27	0.76	0.00	0.76	4.69	4.51
2	Río Coclé del Sur	9.53	9.99	9.84	0.97	0.03	1.00	8.56	8.84
3	Río Zaratí Tramo Bajo	0.37	0.36	0.36	1.77	0.00	1.77	-1.39	-1.40
4	Río Grande Parte Alta, Río Harino y Río Potrero	21.51	22.55	21.09	7.74	0.00	7.74	13.77	13.35
5	Río Grande Tramo Bajo	1.64	1.80	1.68	2.16	0.17	2.34	-0.53	-0.66
6	Río Ola y Churube	6.19	5.70	6.10	0.71	0.00	0.71	5.48	5.39
7	Río Chico Tramo Alto y Medio	21.15	20.60	19.82	0.00	0.00	0.00	21.15	19.82
8	Río Coclé del Sur Tramo Bajo, Confluencia Río Grande	0.70	0.80	0.74	10.34	17.01	27.35	-9.64	-26.61
9	Río La Chorrera	3.73	3.66	3.66	8.96	0.00	8.96	-5.23	-5.30
10	Río Grande Tramo Bajo, Qda Lajas	3.71	3.40	3.50	19.67	35.04	54.71	-15.96	-51.20

Código	Nombre de la Subcuenca	Producción de Agua			Demanda de Agua			Disponibilidad	
		Línea Base	Escenario 2.6	Escenario 8.5	Actual	Tramite	Total	Actual	Escenarios
11	Río Chico Tramo Bajo	0.65	0.77	0.61	12.59	1.41	14.00	-11.94	-13.38
12	Río Hondo	1.19	1.16	1.16	4.45	0.70	5.15	-3.27	-3.99
13	Río Pocrí	2.20	2.56	2.11	0.01	3.81	3.82	2.19	-1.71

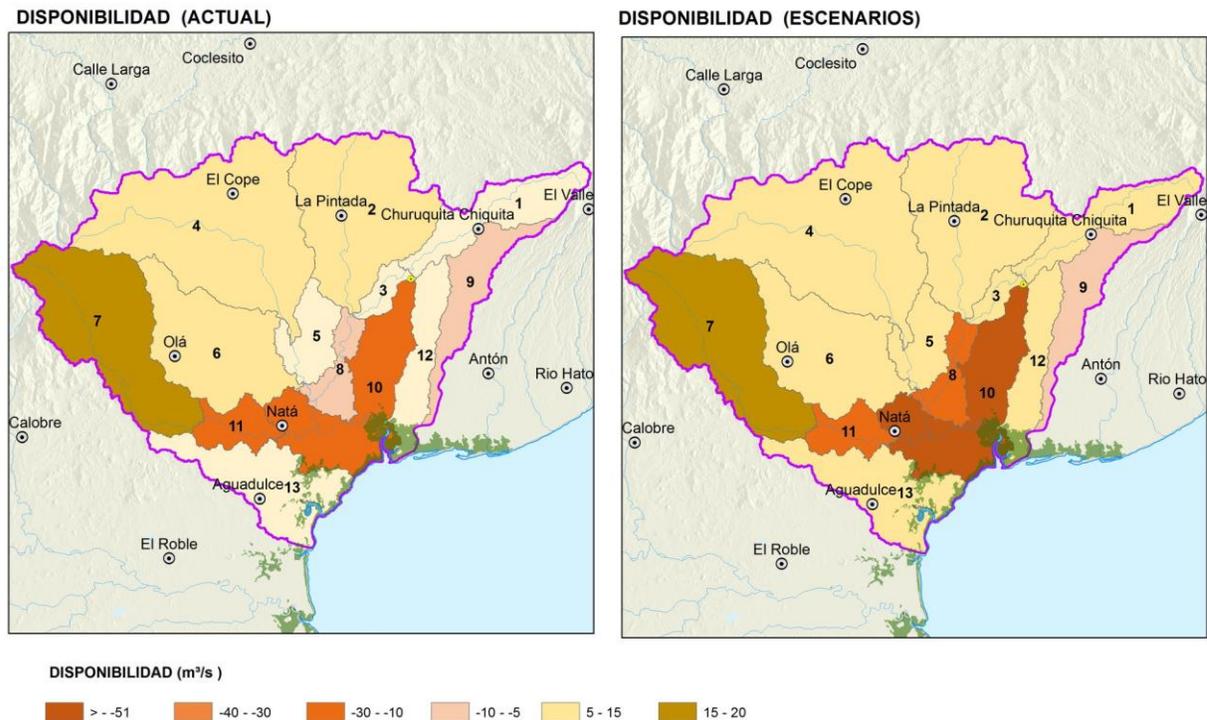


Figura 19. Disponibilidad de agua en la cuenca. Línea base y escenarios

Escasez del Recurso Hídrico

Para evaluar la escasez de agua en la cuenca se calculó el “Índice de Escasez” aplicando la fórmula del Programa Hidrológico Internacional de la Organización de Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Para estimar la demanda de agua se realizó una sumatoria de todas las concesiones de agua vigentes en la cuenca excluyendo los usos no consuntivos como la generación eléctrica, para la oferta hídrica superficial neta se utilizó el flujo acumulado que considera al caudal que sale de cada subcuenca más los flujos acumulados de las subcuencas aguas arriba.

Tabla 42. Índice de Escasez Hídrica en la Cuenca de Río Grande (%)

Código	Nombre de la Subcuenca	Oferta Hídrica (m ³ /seg)			Demanda de Agua (m ³ /seg)			Índice de Escasez (%)	
		Línea Base	Escenario 2.6	Escenario 8.5	Actual	Tramite	Total	Actual	Escenarios
1	Río Zaratí Parte Alta	65.15	63.79	62.98	0.76	0.00	0.76	1.17	1.21
2	Río Coclé del Sur	113.80	119.29	117.49	0.97	0.03	1.00	0.85	0.85
3	Río Zaratí Tramo Bajo	69.56	68.08	67.30	1.77	0.00	1.77	2.54	2.62
4	Río Grande Parte Alta, Río Harino y Río Potrero	256.98	269.53	252.02	7.74	0.00	7.74	3.01	3.07
5	Río Grande Tramo Bajo	276.44	290.91	271.99	2.16	0.17	2.34	0.78	0.86
6	Río Olá y Churubé	74.03	68.29	72.92	0.71	0.00	0.71	0.96	0.97
7	Río Chico Tramo Alto y Medio	252.87	246.20	236.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	Río Coclé del Sur Tramo Bajo, Confluencia Río Grande	541.54	555.38	537.86	10.34	17.01	27.35	1.91	5.08
9	Río La Chorrera	44.57	43.73	43.71	8.96	0.00	8.96	20.10	20.50
10	Río Grande Tramo Bajo, Qda Lajas	846.25	851.21	823.55	19.67	35.04	54.71	2.32	6.64
11	Río Chico Tramo Bajo	260.54	255.32	244.04	12.59	1.41	14.00	4.83	5.74
12	Río Hondo	58.73	57.59	57.50	4.45	0.70	5.15	7.58	8.95
13	Río Pocrí	26.23	30.52	25.11	0.01	3.81	3.82	0.02	15.22

Los resultados del "Índice de Escasez" calculados para la cuenca de río Grande muestran que los porcentajes de la oferta hídrica utilizada están dentro de la categoría baja, lo que significa que no experimenta presiones importantes en el recurso.

La variante se da en las subcuencas de río Chorrera en condiciones actuales y río Pocrí en condiciones futuras que clasifican bajo las categorías de moderadas lo que se traduce que la disponibilidad de agua puede ser un factor importante en el desarrollo.

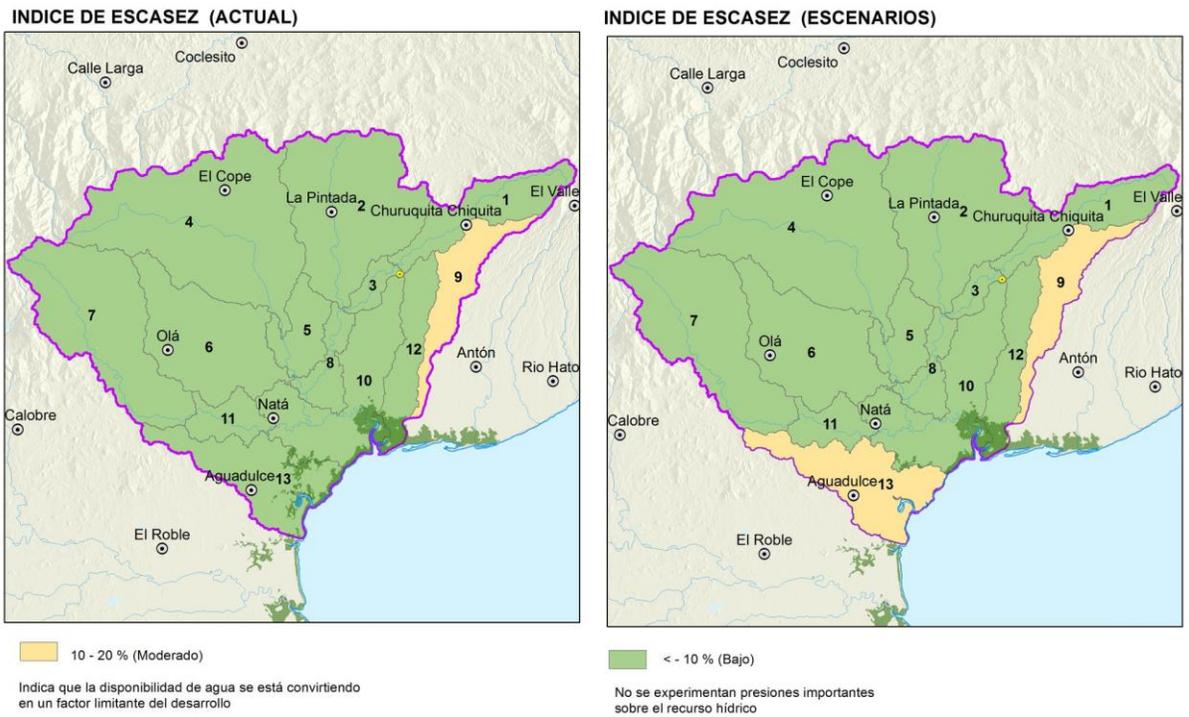


Figura 20. Escasez del recurso hídrico en la cuenca, Línea base y escenarios

4.6. CONCLUSIONES

Los registros más altos de precipitación dentro de la cuenca de río Grande se dan en la subcuenca de río Chico los totales anuales superan 3100 mm. Otros aportes de precipitación proceden de núcleos ubicados en el interfluvio norte, con registros anuales que totalizan 3600 mm influyen en la subcuenca de los ríos Grande, El Harino y El Potrero. Sobre el parte aguas que divide la subcuenca de río Zaratí con río Coclé del Norte se dan núcleos de precipitación con totales anuales de 3800 mm. Las precipitaciones más bajas son de 1200 mm se distribuyen en la parte baja de la subcuenca de río Grande y su confluencia con río Chico.

Las características morfométrica de la cuenca indican que más del 50% del área de drenaje se encuentra bajo los 248 msnm son regiones bajas y planicies litorales. El resto está formado por cerros, colinas y en menor porcentaje regiones de montañas.

El 28% de la superficie en la cuenca es arable al compararla con el uso actual del suelo para el 2010 se observa que se ha utilizado más del 45% de la superficie en actividades agrícolas y pecuaria, esto indica una diferencia de superficie en conflictos por uso del suelo de casi 17%. La presencia de bosque en la cuenca es de 32% se ubican en la parte alta de las subcuencas de Río Grande, El Harino, El Potrero, Coclé del Sur y Zaratí, en el resto de la cuenca se dan algunas iniciativas de proyectos forestales reflejándose un mayor incremento en el tramo bajo de la subcuenca de río Grande.

En referencia al último censo del 2010 la cuenca tiene una población de 130,392 habitantes representa una densidad 55.3 hab/km² las subcuencas donde se concentran la mayor cantidad de habitantes corresponden a río Pocrí, Zaratí, Coclé del Sur y río Grande en el tramo bajo.

Para calibrar el modelo se utilizaron cuatro (4) estaciones hidrológicas, distribuidas en las partes altas Murcielaguero con coeficiente de NS de 0.59 y RSR de 0.64; Cañaverál con NS de 0.52 y RSR de 0.69, en la parte media Río Grande con NS de 0.59 y RSR de 0.64 para la parte baja El Cortezo se obtuvo un NS de 0.71 y un RSR de 0.54 las métricas que resultan del proceso de calibración indican que los resultados del modelo están entre satisfactorios a buenos.

Los resultados del análisis de sensibilidad indican que los parámetros más sensibles en el modelo corresponden a modificaciones referentes a almacenamiento de agua en el suelo, aguas subterráneas y escorrentía superficial.

En referencia a los escenarios de usos de suelo y el potencial de transiciones estimados al 2070 la categoría rastrojo muestra incrementos superiores al 16% con respecto al año 2010, los cambios son bien marcados sobre los usos de suelo pastos y agricultura.

Los resultados del GCM CCMS4 muestran una buena correlación con los datos medidos en la cuenca para las variables temperatura y precipitación, se mantiene la tendencia en cuanto a vías de concentración representativas RCP 2.6 y RCP 8.5, en la primera la precipitación disminuye -21.4 mm y en la segunda la disminución es de -43.1 mm.

Los registros de caudal promedio mensual para la línea base en la cuenca son de 18.5 m³/s, para el 2070 bajo condiciones de escenario RCP 2.6 se estiman en 18.7 m³/s y para condiciones bajo RCP 8.5 se espera que reduzcan a 18.03 m³/s.

Al evaluar la demanda de agua en la cuenca estas se clasifican en seis (6) tipos: Doméstico, Agrícolas, Pecuarios, Industrial, Hidroeléctrico y Turístico. Los usos agrícolas son los que demandan mayor volumen 51.5 m³/s al año, los usos pecuarios demandan 5.9 m³/s, el uso doméstico 1.14 m³/s, el uso industrial 11.5 m³/s y el uso destinado a turismo que demanda 0.02 m³/s al año. Los usos de agua para generación eléctrica corresponden a demandas por usos no consuntivos, al año se requieren 136.5 m³/s.

A partir de los resultados del balance hídrico y del uso concesionado de agua en la cuenca se calculó la disponibilidad del recurso hídrico y el índice de escasez hídrica. El análisis indica que el 35% de la superficie de la cuenca de río Grande no cuenta con disponibilidad del recurso hídrico, la parte baja de la cuenca de río Grande bajo condiciones de escenario actual presenta un déficit de -16 m³/s, la misma subcuenca bajo condiciones de escenarios de cambio climático al 2070 podrían tener déficit de -51 m³/s.

El índice de escasez de agua en la cuenca indicó que bajo condiciones actuales el 95% de la superficie de la cuenca de río Grande no experimenta presiones importantes en el recurso hídrico a excepción de un 5% que corresponde a la subcuenca del río Chorrera que tiene índice de escasez moderado y que indica que su disponibilidad podría ser un factor importante en el desarrollo de este sector de la cuenca.

4.7. RECOMENDACIONES

Considerar que la selección del modelo hidrológico a utilizar va a depender de las características de la cuenca y la disponibilidad de los datos de entrada, además de los objetivos que se buscan con la modelación.

Los modelos hidrológicos como SWAT muchas veces no son capaces de modelar situaciones especiales en la cuenca, entre estas se pueden considerar más de una extracción o aportes de agua por área de drenaje, ante estos casos es necesario contar con modelos alternativos.

Además del climograma para evaluar el comportamiento temporal de parámetros como precipitación y temperatura para cada estación, se requiere un análisis estadístico con medidas de variabilidad (rangos, desviación estándar, varianza) a los registros climáticos que se ingresan al modelo.

Considerar estaciones climáticas externas a la cuenca que por ubicación ejercen influencia en su régimen climático.

Dependiendo de la disponibilidad de los registros climáticos, se recomienda la selección de periodos superiores a 20 años que incluyan años secos, húmedos y anomalías causadas por eventos Niño o Niña.

Cuando se trabaja con cuencas predefinidas es importante depurar la topología de los datos espaciales ingresados al modelo, orientación de la red de drenaje, ubicación correcta de parte aguas, puntos de desfogues y estaciones hidrométricas.

Para el proceso de calibración del modelo se recomienda calibrar a diferente paso de tiempo, algunas cuencas presentan mejores ajustes o métricas cuando el resultado del caudal sintético es diario o mensual respecto a los datos observados en las estaciones.

La selección de modelos para escenarios de cambio climático a partir de datos globales (GCM) debe tomar en cuenta la climatología local, por tal razón el proceso de reducción de escala debe considerar el comportamiento estacional de los registros y mantener la consistencia en los escenarios futuros.

Para evaluar escenarios futuros de cambio climático se requiere comparar más de un modelo respecto al mismo escenario, esto permite obtener un mejor desempeño de los resultados y descartar modelos que no lo presentan.

5. BIBLIOGRAFIA

Aguerrin, C. Felipe Procesos Hidrológicos y Manejo de Cuencas. CONAGUA. México. 2008. 153p

Allan, R. J. 2000. ENSO and climate variability in the past 150 years. El Niño and the southern oscillation, Multiscale Variability and Global and Regional Impacts. Cambridge, UK. 3-56.

ANAM, 2010. Atlas Ambiental de la República de Panamá. Primera Versión. Panamá. 190.p.

ANAM, 2010. Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos de la República de Panamá 2010-2030. 165p.

ANAM, 2008. Plan Nacional para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos 2008-2012. 166p.

ANAM, 2000. Estrategia y Plan de Acción para la implementación de la Política Nacional de Recursos Hídricos. 38p.

CATIE, 2014. Guía del Usuario y Tutorial de la Interface ArCSWAT, 2012, Curso Internacional Uso del Modelo SWAT, Como Herramienta para el Manejo de Cuencas Hidrográficas. 354p.

IHMEA, 2004. Metodología para el Cálculo del Índice de Escasez del Agua Superficial. Lima. 27p.

Llanos H. Lizeth, 2014. RClimTool Manual de Usuarios. CIAT. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali. Colombia. 17p.

Magaña O. Victor. 2004. Los impactos del Niño en México, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México. 229p.

OECC, 2013. Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, Guía Resumida del Quinto Informe de Evaluación del IPCC, Madrid, 2013.

Velásquez, M. Sergio. 2015. Lecturas y Manual de Prácticas. Curso 1. Hidrología e Hidráulica. Para el Manejo de Cuencas. CATIE. Turrialba. Costa Rica. 124p.

Villón, B. Máximo. 2011. Hidrología, Editorial Tecnológica de Costa Rica. Primera Edición. 476p.

Yates, N. David. 2000. A technique for generating regional climate scenarios using a nearest neighbor bootstrap. NCAR/RAP. Boulder. Colorado. 39p.