INFORME 5

VOLUMEN TÉCNICO DE INGENIERÍA

3. ESTUDIO DE HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA

FACTIBILIDAD

SECTOR SANTANDER DE LA CRUZ

TÍTULO DEL DOCUMENTO:		VOLUMEN TÉCNICO DE INGENIERIA DEL PROYECTO DENOMINADO PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN DE EROSIÓN COSTERA EN EL GOLFO DE MORROSQUILLO –SECTOR SANTANDER DE LA CRUZ			
DOCUMENTO No.:		GAT-1074-21-CA-AM-FIN-09			
APROBACIÓN	**REVISIÓN NO:**	**Versión**	**VA**	**VB**	**VC**
	V0 ELABORA / CARGO	Nombre:	Mateo Herrera/ Ingeniero Civil Julio Mesa/ Director Civil		
		Fecha:	01/11/2023		
	V1 ELABORA / CARGO	Nombre:	Mateo Herrera/ Ingeniero Civil Julio Mesa/ Director Civil		
		Fecha:	01/12/2023		
	V2 REVISA / CARGO	Nombre:	Julio Mesa/Director Civil Sebastián Piedrahita/Director Ambiental		
		Fecha:	01/13/2023		
	V3 APRUEBA / CARGO	Nombre:	Andrés Restrepo		
		Fecha:	01/13/2023		
	V4 AUTORIZA / CARGO	Nombre:	Andrés Restrepo		
		Fecha:	01/13/2023		

TABLA DE CONTENIDO

3 ESTUDIO DE HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA 6
3.1 Introducción 6
3.2 Objetivos 6
3.2.1 Objetivo General 6
3.2.2 Objetivos específicos 7
3.3 Descripción general de la información empleada 7
3.3.1 Localización de la zona Santander de la Cruz 7
3.3.2 Información disponible 8
3.3.2.1 Información Cartográfica de la zona Santander de la Cruz 8
3.3.2.2 Información Hidrológica 9
3.3.2.3 Análisis de calidad y consistencia de la información 10
3.4 HIDROLOGÍA 13
3.4.1 Delimitación de cuencas 15
3.4.2 Cuencas hidrográficas 15
3.4.2.1 Parámetros morfométricos 16
3.4.2.2 Tiempos de Concentración 16
3.4.3 Precipitación 18
3.4.4 Precipitación máxima. 23
3.4.4.1 Duración de la lluvia 23
3.4.4.2 Intensidad de la lluvia 24
3.4.4.1 Precipitación para diferentes periodos de retorno. 29
3.4.5 Temperatura: 30
3.4.6 Evapotranspiración 32
3.4.7 Caudales medios 34
3.4.7.1 Modelo de Tanques 34
3.4.8 Caudales máximos 39
3.4.9 Método racional 40
3.5 Estimación de la denudación anual en el sector santander de la cruz 43
3.6 CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS 47

Página

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Estaciones de precipitación y de caudales en cercanías al sector Santander de la Cruz. 9

Tabla 3.2 Análisis de homogeneidad de las estaciones hidrológicas 13

Tabla 3.3 Métodos para el cálculo de caudales máximos. 14

Tabla 3.4: Área de la cuenca Quebrada Culebra 16

Tabla 3.5 Parámetros morfométricos de las cuencas en el sector Santander de la Cruz. 16

Tabla 3.6 Ecuaciones para el tiempo de concentración. 17

Tabla 3.7 Tiempos de concentración para las cuencas en el sector Santander de la Cruz. 18

Tabla 3.8: Precipitación media multianual para cada cuenca en el sector Santander de la Cruz 23

Tabla 3.9 Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas IDF para Colombia. 25

Tabla 3.10 Intensidad de la lluvia para las cuencas en el sector Santander de la Cruz. 29

Tabla 3.11 Precipitación total para la cuenca Quebrada Culebra en diferentes periodos de retorno. 30

Tabla 3.12: Temperatura promedio para la cuenca Quebrada Culebra 31

Tabla 3.13: Evapotranspiración real para cada cuenca en el sector Santander de la Cruz. 33

Tabla 3.14 Régimen de caudales medios mensuales para la cuenca Quebrada Culebra. 39

Tabla 3.15 Coeficiente de escorrentía para diferentes periodos de retorno. 40

Tabla 3.16 Cobertura vegetal y coeficientes de escorrentía para las cuencas en el sector Santander de la Cruz. 42

Tabla 3.17 Caudales máximos para las cuencas en el sector Santander de la Cruz. 43

Tabla 3.18. Valores asignados a P según la pendiente. 45

Tabla 3.19. Erosión laminar en cada una de las corrientes. 47

Tabla 3.20. Caudales máximos asociados a caudal de Banca llena. 48

Tabla 3.21. Pendiente de cada una de las corrientes. 48

Tabla 3.22. Capacidad de transporte de las fuentes. 48

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 3.1 Ortofoto del sector Santander de la Cruz 8

Figura 3.2: Localización de las estaciones climatológicas utilizadas y la cuenca Quebrada Culebra. 10

Figura 3.3: Procedimiento general para evaluar el componente de agua superficial en las ERA 14

Figura 3.4 Delimitación de la cuenca Quebrada Culebra. 15

Figura 3.5 Régimen de precipitación mensual estación El Limón 19

Figura 3.6 Régimen de precipitación mensual estación La Doctrina 19

Figura 3.7 Régimen de precipitación mensual estación Hacienda San Bernardo del viento 20

Figura 3.8 Régimen de precipitación mensual estación San Antonio 20

Figura 3.9 Régimen de precipitación mensual estación Jaramagal 21

Figura 3.10 Régimen de precipitación mensual estación Carrillo 21

Figura 3.11: Distribución espacial de la precipitación estimada mediante Spline 23

Figura 3.12 Curvas IDF de la estación El Limón (13070010). 25

Figura 3.13 Curvas IDF de la estación La Doctrina (13085010) 26

Figura 3.14 Curvas IDF de la estación San Bernardo del Viento (13085030) 26

Figura 3.15 Curvas IDF de la estación San Antonio (13080010) 27

Figura 3.16 Curvas IDF de la estación Jaramagal (12040010) 27

Figura 3.17 Curvas IDF de la estación Carrillo (13070180) 28

Figura 3.18 Polígonos de Thiessen para la cuenca Cañada Culebra. 29

Figura 3.19: Distribución espacial de la temperatura media 31

Figura 3.20: Distribución espacial de la evapotranspiración real 33

Figura 3.21 Esquema de conexión de los elementos celda una cuenca. 35

Figura 3.22 Parámetros de calibración del modelo de tanques. 36

Figura 3.23 Caudales simulados de la estación Limnimetrica Tolú Viejo, Arroyo Pechilin. 37

Figura 3.24 Régimen de caudales medios mensuales para la Quebrada Culebra. 38

Figura 3.25 Curva de duración de caudales para el Arroyo Babilla 39

Figura 3.26 usos del suelo para cada cuenca en el sector de Santander de la Cruz. 42

Figura.3.27 Mapa de erosión laminar cuenca Quebrada Culebra 46

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 3.1 – HIDROLOGÍA

3 ESTUDIO DE HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el estudio de hidrología e hidráulica del Proyecto denominado “Prevención y Mitigación de Erosión Costera en el Golfo de Morrosquillo”, en donde se localizan diez sectores priorizados sobre los departamentos de Córdoba y Sucre, específicamente en los municipios de San Onofre, Santiago de Tolú, Coveñas, San Antero, San Bernardo del Viento y Moñitos, en los que se presenta pérdida de terreno debido a la erosión costera.

El estudio hidrológico es necesario para determinar la capacidad de escurrimiento superficial y de transporte de sedimentos hacia el mar, relacionado con las cuencas de descarga. En este caso se hizo el análisis hidrológico e hidráulico para las corrientes continentales que desembocan en el sector de Santander de la Cruz, corregimiento del municipio de Moñitos, en donde se identificó el arroyo La Culebra. A este arroyo se le definió la cuenca hidrográfica y los parámetros morfométricos asociados a esta. A partir de datos de estaciones pluviométricas cercanas a la zona se definió la precipitación. Para la obtención de los caudales se usó la estación limnimétrica Tolú Viejo, y mediante un modelo de Tanques y el método de Transposición se obtuvieron las caudales medios para las cuencas de cada sector. En cuanto a los caudales máximos se usaron los métodos Racional, Modelos de hidrogramas sintéticos unitarios, Método de Regionalización y El método de Multiescalamiento, y en donde el uso de cada método depende del área de la cuenca. Por último y con el dato de caudal máximo se obtiene la producción de sedimentos a partir de la erosión laminar de cada cuenca.

3.2 OBJETIVOS

3.2.1 Objetivo General

Realizar el estudio hidrológico e hidráulico para la obtención del régimen de precipitación y caudales, caudales máximos para diferentes periodos de retorno y la producción de sedimentos en las cuencas a partir de erosión laminar.

3.2.2 Objetivos específicos

Para cumplir con el objetivo general propuesto se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la información hidrológica
- Estimar las cuencas aferentes a los sitios de intervención
- Calcular los regímenes de caudales y los caudales máximos para cada cuenca.
- Determinar la producción de sedimentos en las cuencas a partir de erosión laminar

3.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INFORMACIÓN EMPLEADA

3.3.1 Localización de la zona Santander de la Cruz

El sector de Santander de la Cruz se ubica en el municipio de Moñitos, departamento de Córdoba, donde se identificó la cuenca Quebrada Culebra, la cual desemboca directamente en el mar Caribe. A continuación, se muestra la ortofoto del sector y la ubicación de este.

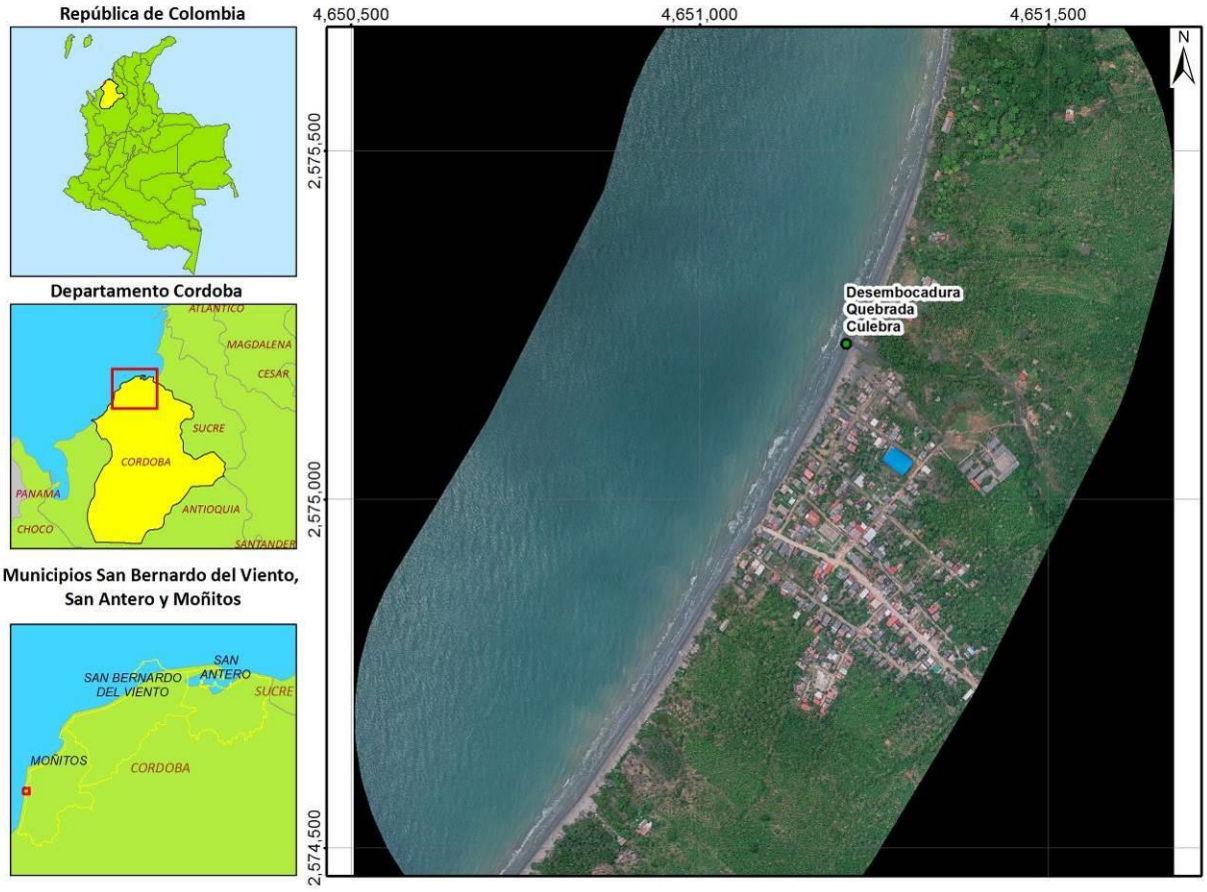


Figura 3.1 Ortofoto del sector Santander de la Cruz

Fuente: Aqua&Terra Consultores Asociados S.A.S.

3.3.2 Información disponible

El estudio se realizó con información secundaria recopilada del Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, complementada con información primaria recolectada durante el trabajo de campo.

3.3.2.1 *Información Cartográfica de la zona Santander de la Cruz*

La información cartográfica como se mencionó anteriormente se recopiló del Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, y corresponde a restituciones aerofotogramétricas del IGAC para la región en escala 1:100000 y 1:25000. Las restituciones empleadas fueron de la plancha No. 50IIC en escala 1:25000 y plancha 50 para escala 1:100000

3.3.2.2 *Información Hidrológica*

La información hidrológica fue recopilada del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, con registros diarios desde 1991 hasta 2018 para las estaciones pluviométrica, (periodo común para los datos de todas las estaciones, y suficiente para un estudio hidrológico), descritas a continuación, en la Tabla 3.1, donde, además, se determina el porcentaje de datos faltantes, y se muestra su ubicación en la Figura 3.2.

Tabla 3.1 Estaciones de precipitación y de caudales en cercanías al sector Santander de la Cruz. Fuente: IDEAM; Aqua&Terra Consultores Asociados S.A.S

Código	Categoría	Nombre	Municipio	Coordenadas (m)		Elevación (msnm)	Porcentaje de Faltantes
				Y (Norte)	X (Este)		
13070010	PM	El Limón	Lorica	4677425,486	2590991	3	7,9%
13085010	PM	La Doctrina	Lorica	4682305,361	2586647	20	8,5%
13085030	PM	San Bernardo del Viento	San Bernardo del Viento	4676083,079	2594752	22	6,6%
13080010	PM	San Antonio	San Pelayo	4675322,517	2546716	50	2,2%
12040010	PM	Jaramagal	Puerto Escondido	4645852,356	2543086	90	3,1%
13070180	PM	Carrillo	San Pelayo	4688737,91	2551986	20	1,7%

*PM: Pluviométrica

Para obtener los datos faltantes de las estaciones pluviométricas, se promedió con las estaciones más cercanas, ya que ser una zona plana y por la cercanía de las mismas estaciones se considera que los cambios en precipitación son mínimos, cabe resaltar que esta metodología se aplicó a la serie mensual de los datos. Este procedimiento se hizo con la siguiente formulación:

$$P_i = \frac{1}{2}\left(\frac{\bar{P}_i * P_j}{\bar{P}_j} + \frac{\bar{P}_i * P_k}{\bar{P}_k}\right)$$

Donde:

$\bar{P}_i$, $\bar{P}_j$ y $\bar{P}_k$ Son los promedios multianual de precipitación para cada estación i, j y k respectivamente.

P_i, P_j y P_k Son el valor de precipitación para un mes en específico y donde P_i es el valor faltante.

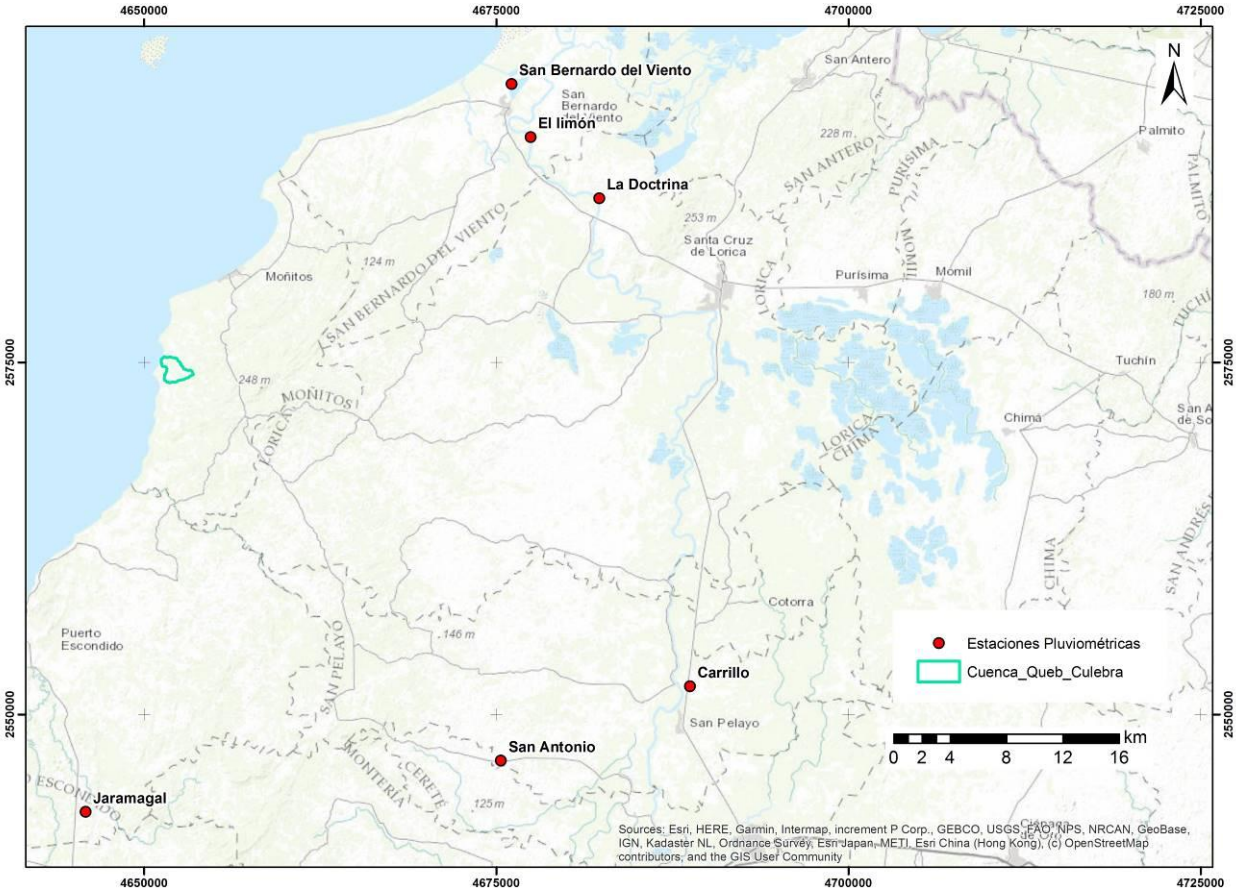


Figura 3.2: Localización de las estaciones climatológicas utilizadas y la cuenca Quebrada Culebra.

Fuente: Aqua&Terra Consultores Asociados S.A.S

3.3.2.3 *Análisis de calidad y consistencia de la información*

Una vez obtenida la información, se realizó el análisis y procesamiento de las variables climáticas, utilizando la herramienta Homogeneidad del programa HidroSIG[1], mediante pruebas gráficas y de homogeneidad.

- Pruebas gráficas o exploratorias

El análisis gráfico se realiza con el fin de comprobar tendencias y cambios en la serie de tiempo por medio visual; se considera el primer análisis a realizar antes de cualquier análisis

[1] Escuela de Geociencias y Medio Ambiente - Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. (2011). HidroSIG 4.0. Medellín, Colombia.

confirmatorio y, más aún, antes de utilizar la información hidroclimatológica para modelos y simulaciones[2].

Además, se realizó la prueba de datos “outliers” o anómalos para identificar aquellos registros o periodos de registros que no son representativos para la serie y que pueden distorsionar su comportamiento estadístico. Los datos “outliers” son valores extremadamente elevados o bajos y pueden deberse a un error en el procedimiento de medición, a datos que no tiene explicación, o a datos que representan un acontecimiento extraordinario y pueden verificarse con el comportamiento de estaciones meteorológicas cercanas. Si dichos datos “outliers” están ubicados al inicio o final de la serie, se eliminarán para evitar cambios en la media y/o varianza de las series.

- Pruebas de homogeneidad

Generalmente, se asume que las series disponibles son estacionarias en la media (primer orden) y en la varianza (segundo orden); sin embargo, si hay cambios o tendencias en los datos, la suposición de estacionariedad en las series es equivocada[3].

Así, para definir el comportamiento de la media se utilizaron las pruebas Mann-Whitney y T simple; y para definir el comportamiento de la varianza se usó la prueba F simple.

- Prueba de Mann-Whitney: propone un punto de cambio desde donde se dividirá la serie en dos sub-series, sea N_1 el total de datos de la sub-serie 1 y N_2 el total de datos de la sub-serie 2. Se define la serie Z_t con t=1,2,…N, como la serie Y_t con t=1,2,…N, ordenada en rango creciente, y la definición de esta prueba se encuentra representada en la siguiente ecuación:

$$U = \left| \frac{\sum_{t=1}^{N_1} R(Y_t) - \frac{N_1(N+1)}{2}}{\left[N_1(N-N_1)\frac{(N+1)}{12} \right]^{\frac{1}{2}}} \right|$$

Donde R (Y_t) representa el rango de la observación Y_t en Z_t.

[2] Castro, L.M. & Carvajal, Y. (2010). Análisis de Tendencia y Homogeneidad de Series Climatológicas. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, núm. 9, enero-diciembre, 2010, pp. 15-25. Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia.
[3] Correa, J.C.; Iral, R. & Rojas, L. (2006). Estudio de Potencia de Pruebas de Homogeneidad de Varianza. Revista Colombiana de Estadística, vol. 29, núm. 1, junio, 2006, pp. 57-76. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D.C., Colombia.

La hipótesis no puede ser rechazada si:

$$U \leq Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$$

Donde $Z_{1-\alpha/2}$ representa el cuantil de la distribución normal estandarizada para una probabilidad acumulada de 1-α/2. Si $U \geq Z_{1-\alpha/2}$ se rechaza la hipótesis de igualdad de medias.

- Prueba T Simple: divide la serie en dos sub-series con varianza y media independiente. El estadístico para la prueba T simple se define como:

$$T = \frac{|\hat{u}_1 - \hat{u}_2|}{S\sqrt{\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}}}$$

Donde S es la desviación típica común.

La hipótesis de igualdad de las dos medias no puede ser rechazada si:

$$T \leq t_{1-\frac{\alpha}{2}}(N-2)$$

Donde $t_{1-\alpha/2}(N-2)$ representa el cuantil 1-α/2 de la distribución T-Student con N-2 grados de libertad. El nivel de significación es igual 0.05.

- Prueba F Simple: la serie a analizar se divide en dos sub-series, después de un punto de cambio propuesto. A cada una de estas sub-series se le determinó la media y varianza. El estadístico para la prueba está definido por:

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}$$

Donde σ_1 y σ_2 representan las desviaciones estándar de la primera y segunda sub-serie respectivamente. La hipótesis de igualdad de varianza no puede ser rechazada si:

$$F_{\frac{\alpha}{2}}\ (N_1 - 1, N - N_1 - 1) \leq F \leq F_{1-\frac{\alpha}{2}}\ (N_1 - 1, N - N_1 - 1)$$

Donde $F_\beta(N_1\text{-}1, N\text{-}N_1\text{-}1)$, corresponde al cuantil β de la distribución F con N_1-1 y N-N_1-1 grados de libertad.

Se realizó el análisis de homogeneidad a las series del IDEAM y la CVC, utilizando un nivel de confianza $\alpha = 0{,}05$. En la Tabla 3.2 se presentaron los resultados del análisis de homogeneidad de las estaciones hidrológicas utilizadas.

Tabla 3.2 Análisis de homogeneidad de las estaciones hidrológicas

Código	Nombre	Categoría	Cambio media Mann-Whitney		Cambio media T simple		Cambio varianza F modificado		Tendencia media Prueba T	Datos Outliers
13070010	El Limón	PM	R		R		R		R	5
13085010	La Doctrina	PM	R		A	6/1988	A	10/1988	A	5
13085030	San Bernardo Del Viento	PM	R		A	07/1933	R		A	5
13080010	San Antonio	PM	R		A	07/2003	R		A	5
12040010	Jaramagal	PM	R		R		R		R	5
13070180	Carrillo	PM	A	12/1994	A	1/2010	R		A	5

A: Acepta cambio; R: Rechaza cambio.

Fuente: Aqua & Terra Consultores Asociados S.A.S., 2022.

Aunque la mayoría de las estaciones no presentan la mejor calidad (cambios en la media y en la varianza), se incluyen para la estimación de los parámetros hidrológicos debido a que no existe otra información en el sector Santander de la Cruz.

3.4 HIDROLOGÍA

Se realizó una descripción detallada de la cuenca Quebrada Culebra, siguiendo el procedimiento general para evaluar el componente de agua superficial en las Evaluaciones Regionales del Agua (ERA). El procedimiento presenta dos componentes principales para la evaluación del agua superficial: caracterización del régimen hidrológico y caracterización de oferta hídrica, teniendo como soporte las características morfométricas de las cuencas[4].

[4] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Lineamientos Conceptuales y Metodológicos para la Evaluación Regional del Agua. Bogotá, D. C. 2013. 276 páginas.

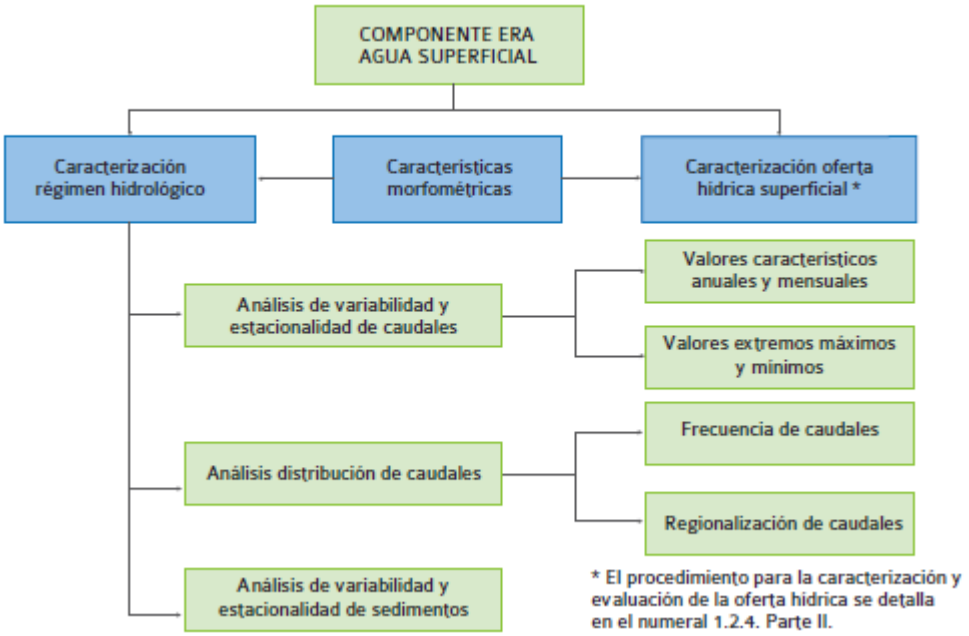


Figura 3.3: Procedimiento general para evaluar el componente de agua superficial en las ERA

Fuente: IDEAM. 2013

El estudio hidrológico realizado, busca definir el régimen hidrológico de los arroyos antes mencionados mediante el análisis de los regímenes de caudales medios (balance a largo plazo y transposición de caudales), máximos (método racional, modelos de hidrogramas sintéticos unitarios de Soil Conservation Service, Williams y Hann, Snyder, regionalización y el método de multiescalamiento, en donde el uso de cada método depende del tamaño de la cuenca como se especifica en la Tabla 3.3) y mínimos (transposición de caudales) para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Tabla 3.3 Métodos para el cálculo de caudales máximos.

Área de la cuenca	Método
Cuencas Menores: Área < 2.5 km^2	Método racional
Cuencas intermedias: 2.5 km^2 < Área < 25 km^2	Modelos de hidrogramas sintéticos unitarios • Modelo de Soil Conservation Service (SCS) • Williams y Hann • Snyder
Cuencas Mayores: Área > 25 km^2	Método de Regionalización Método de multiescalamiento.

3.4.1 Delimitación de cuencas

Al interior de la zona de estudio Santander de la Cruz se delimito la cuenca Quebrada Culebra, la cual desemboca directamente en el mar Caribe. A continuación, se muestra la delimitación de la cuenca Quebrada Culebra con su respectiva red hidrográfica.

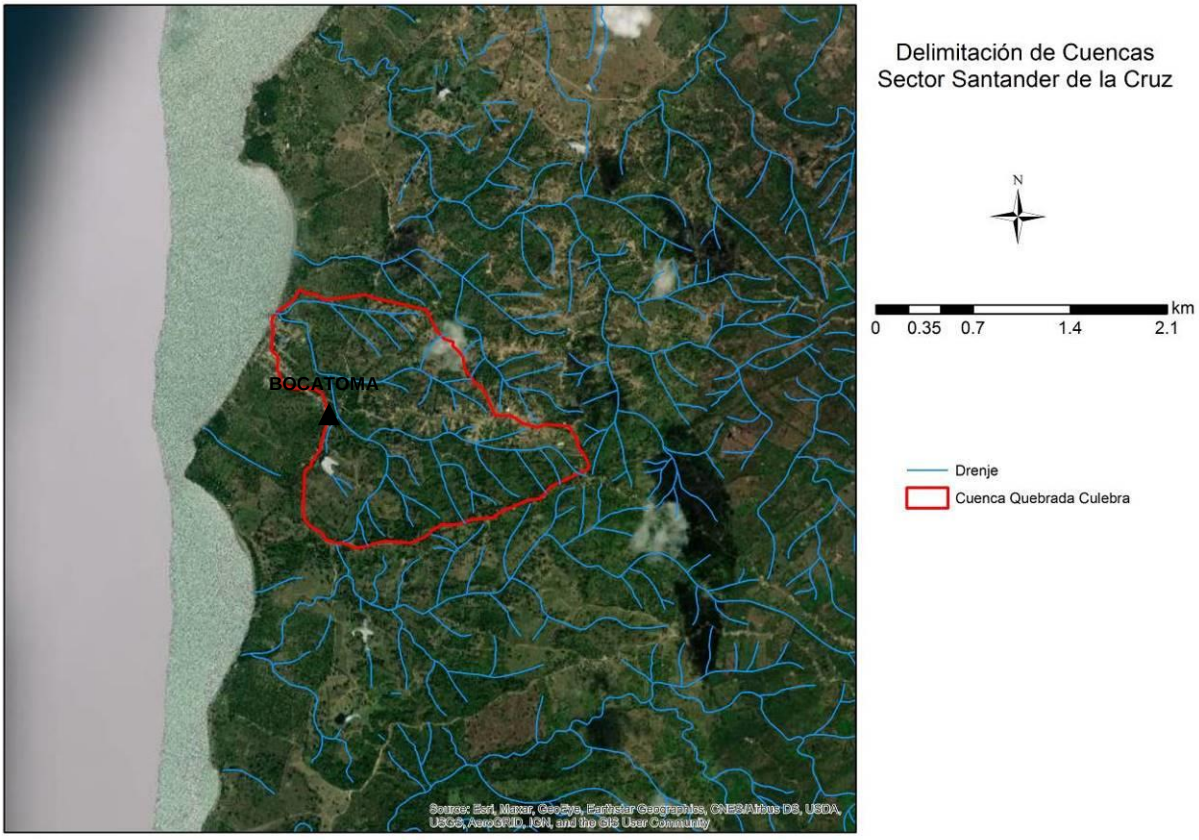


Figura 3.4 Delimitación de la cuenca Quebrada Culebra.

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

3.4.2 Cuencas hidrográficas

El proyecto se encuentra ubicado en el área hidrográfica Caribe (1), en la zona hidrográfica Caribe Litoral (12) y en la subzona hidrográfica río Canalete y otros arroyos directos al caribe (1204)[5] que tiene un área de cuenca de 1898 km^2. A continuación, se muestran las áreas de las cuencas hidrográficas de estudio.

[5] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Zonificación y Codificación de Unidades Hidrográficas e Hidrogeológicas de Colombia. Bogotá, D. C. 2013. 47 páginas.

Tabla 3.4: Área de la cuenca Quebrada Culebra

Nombre del Cauce	Área cuenca (km²)
Quebrada Culebra	2.49

Fuente: Aqua&Terra Consultores Asociados S.A.S

3.4.2.1 *Parámetros morfométricos*

Los parámetros morfométricos de la cuenca influyen en los procesos hidrológicos (transformación de lluvia en escorrentía) ya que representan el volumen de control de la misma. Así, para cada una de las cuencas delimitadas se determinaron sus características morfométricas a partir de la información cartográfica disponible. En la Tabla 3.5 se presentan los parámetros morfométricos de las cuencas de las corrientes menores.

Tabla 3.5 Parámetros morfométricos de las cuencas en el sector Santander de la Cruz.

Cuenca	Parámetros morfométricos								
	Área (km²)	Perímetro (km)	Pendiente de la cuenca (%)	Longitud cauce (km)	Cota sup cuenca (msnm)	Cota sup cauce (msnm)	Cota inf cauce (msnm)	Pendiente cauce (%)	Factor de Forma K_f
Quebrada Culebra	2.49	7.17	1.53	2.97	64.00	49.07	0.00	1.53	0.282

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

De los parámetros morfométricos de las cuencas se pudo observar que las cuencas, en promedio, son muy planas, y en cuanto al factor de forma, cuando este es superior a la unidad proporciona el grado de achatamiento de la cuenca y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas, en este caso los factores de forma son todos muy inferiores a la unidad, por lo que la tendencia a formar grandes crecidas es baja.

3.4.2.2 *Tiempos de Concentración.*

Para determinar el tiempo de concentración de cada cuenca se utilizó una serie de fórmulas empíricas, las cuales estiman el tiempo de concentración a partir de los parámetros morfométricos de la cuenca. Las ecuaciones utilizadas se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Ecuaciones para el tiempo de concentración.

Giandotti	Kirpich
$t_c = 60\left[\frac{4\sqrt{A}+1{,}5\,L}{25{,}3\sqrt{L\,S}}\right]$ t_C : tiempo de concentración (minutos) A : área de la cuenca (km^2) L : longitud del cauce principal (km) S : pendiente del cauce principal (m/m)	$t_c = 60\left[0{,}078\left(\frac{L_p}{\sqrt{S}}\right)^{0{,}77}\right]$ t_c : tiempo de concentración (minutos) L_p: longitud del cauce principal (pie) S : pendiente del cauce principal (m/m)
Scs-Ranser	**U.S. Corps of Engineers**
$T_c = 0.97K^{0.385}$ Siendo $K = \frac{L_c^3}{H}$ t_c : tiempo de concentración (minutos) L : longitud del cauce principal (km) S_o : Pendiente del cauce principal (%) S_o : : Pendiente del cauce principal (%)	$t_c = 60\left[0{,}28\left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0{,}76}\right]$ t_c : tiempo de concentración (minutos) L : longitud del cauce principal (km) S : pendiente del cauce principal (m/m)
Témez	**Ven Te Chow**
$T_c = 0.3\left(\frac{L_c}{S_0^{0.25}}\right)^{0.76}$ t_C : tiempo de concentración (minutos) L : longitud del cauce principal (km) S : pendiente del cauce principal (m/m)	$T_c = 0.8773\left(\frac{L_c^{1.5}}{\sqrt{CM_c - Cm_c}}\right)^{0.64}$ t_c : tiempo de concentración (minutos) L : longitud del cauce principal (km) $CM_c S$: : Cota mayor del cauce principal (m.s.n.m). Cm_c : Cota menor del cauce principal (m.s.n.m).
Passini	**California Culvert Practice**
t_C : $T_c = \frac{\left[0{,}108\cdot(A\cdot L)^{1/3}\right]}{S^{0{,}5}}$ t_C : tiempo de concentración (minutos) A : área de la cuenca (km^2) L : longitud del cauce principal (km) S : pendiente del cauce principal (m/m)	t_c : $t_c = 60\cdot\left[\frac{0{,}87075\cdot L^3}{H}\right]^{0{,}385}$ t_c : tiempo de concentración (minutos) L : longitud del cauce principal (km) S_o : : Pendiente del cauce principal (%) H : Diferencia entre la cota mayor y la cota menos de la cuenca (m)

Fuente: Vélez, J.J. & Botero, A., 2011.

En la Tabla 3.7 se muestran los tiempos de concentración para las cuencas, obtenidos mediante la aplicación de las metodologías anteriormente definidas. El tiempo de concentración seleccionado se determinó como el promedio de aquellos valores que estuvieron en un rango cercano (media ± desviación estándar).

Tabla 3.7 Tiempos de concentración para las cuencas en el sector Santander de la Cruz.

Cuenca	Tiempo de concentración (min)								
	California Culvert Practice	Kirpich	Giandotti	U.S. Corps of Engineers	Scs-Ranser	Témez	Ven Te Chow	Passini	TC Selección
Quebrada Culebra	44.61	45.98	119.91	85.00	45.66	37.97	43.02	58.91	53.86

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

3.4.3 Precipitación

El término precipitación se emplea para designar una caída de partículas de agua líquida o sólida que se originan en una nube, atraviesan la atmósfera y llegan al suelo en un tiempo determinado. La unidad de precipitación es el milímetro, un milímetro de precipitación equivale a un litro de agua por metro cuadrado de superficie[6].

En la región caribe se presentas lluvias entre los 500 y 4000 mm totales anuales con un régimen bimodal en el que se presentan las menores lluvias a inicio de año y a mitad de año, sin embargo en el sector Santander de la Cruz esta bimodalidad no es tan marcada según los datos medios de las estaciones pluviométricas antes descritas, ya que, sí se presentan bajas lluvias en los primeros meses del año, aumentan en abril y a mitad del año disminuyen, sin embargo sigue habiendo lluvias considerables para esta época. A continuación, se muestra gráficamente los regímenes de precipitación para cada estación en el sector Santander de la Cruz

[6] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Atlas Climatológico de Colombia. Bogotá, D.C. 2017. 266 páginas.

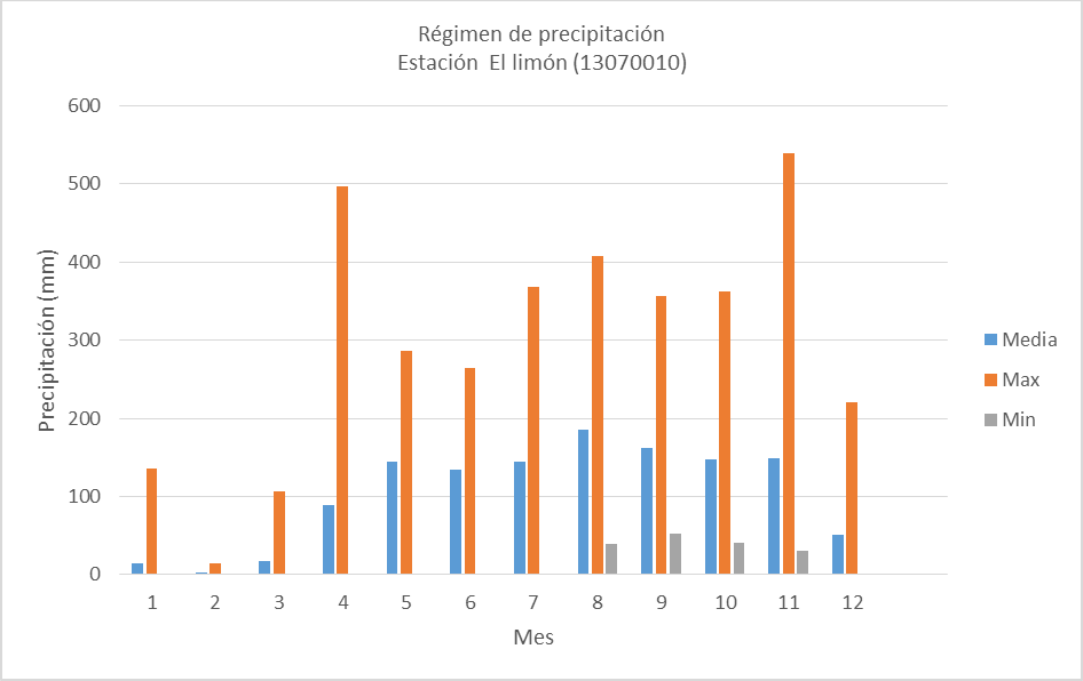


Figura 3.5 Régimen de precipitación mensual estación El Limón

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

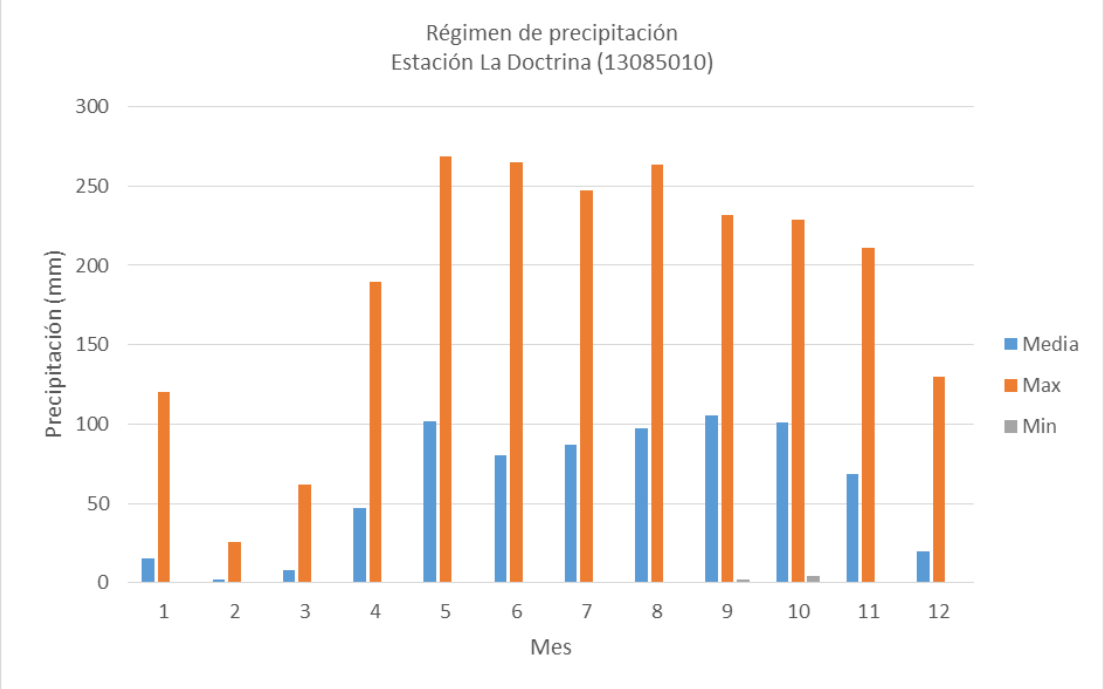


Figura 3.6 Régimen de precipitación mensual estación La Doctrina

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

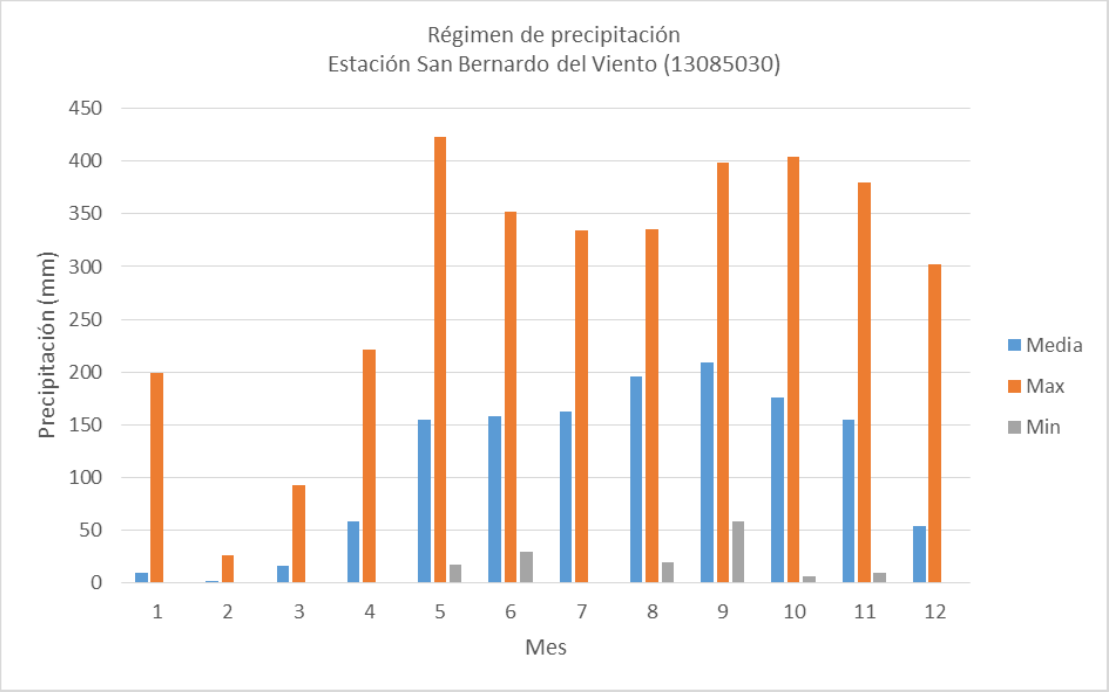


Figura 3.7 Régimen de precipitación mensual estación Hacienda San Bernardo del viento

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

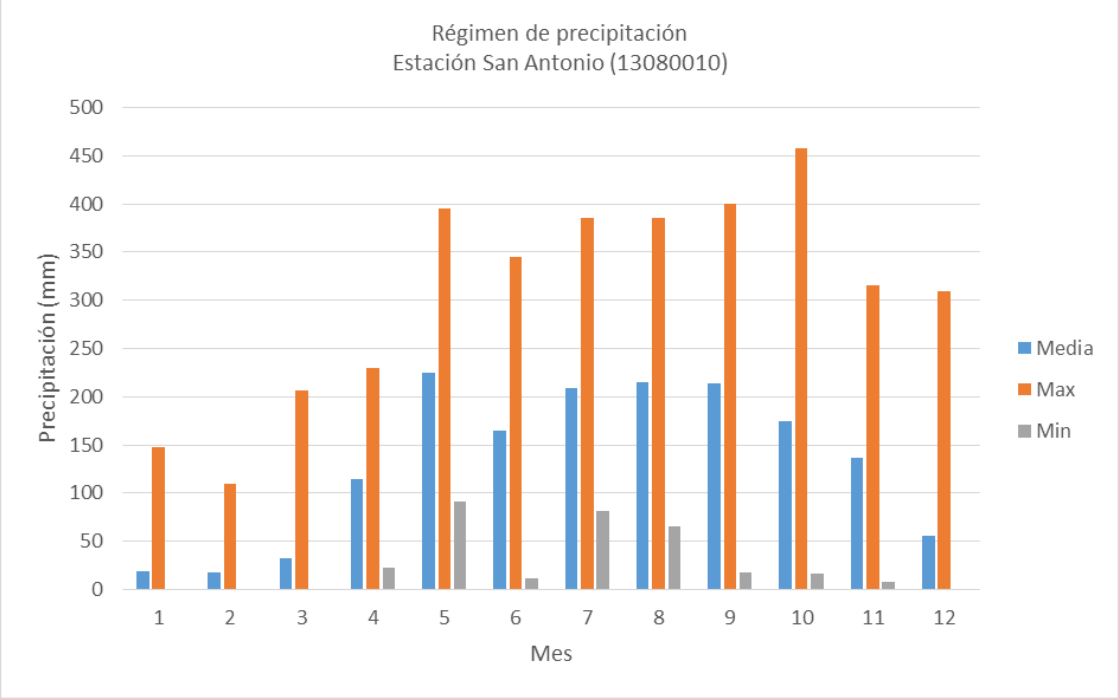


Figura 3.8 Régimen de precipitación mensual estación San Antonio

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

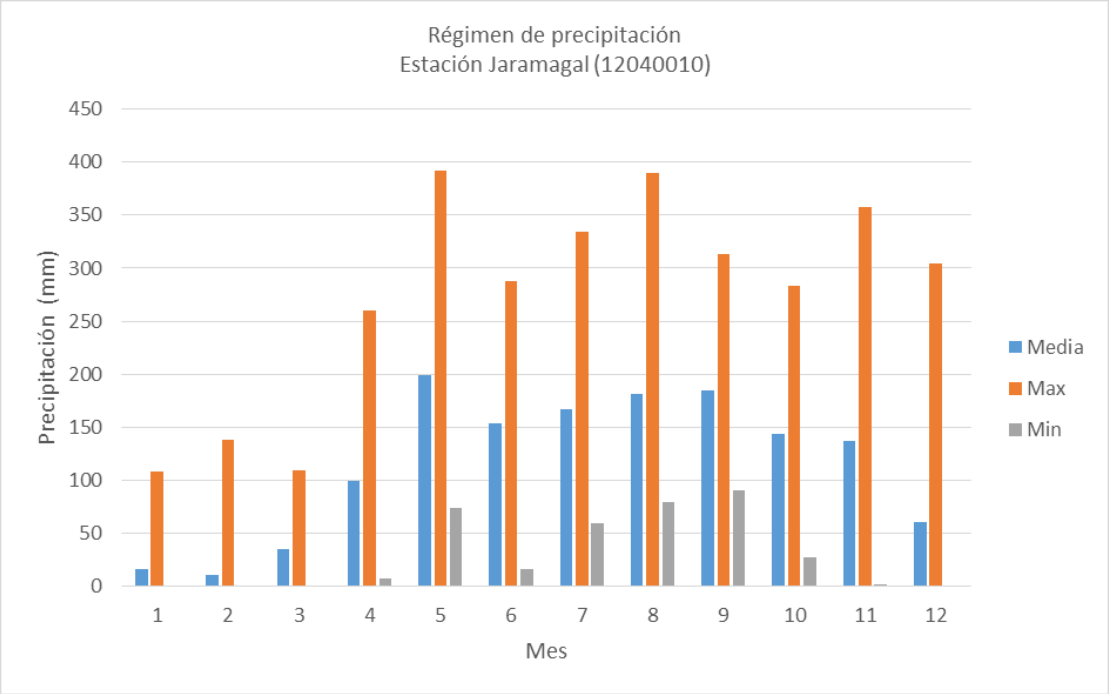


Figura 3.9 Régimen de precipitación mensual estación Jaramagal

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

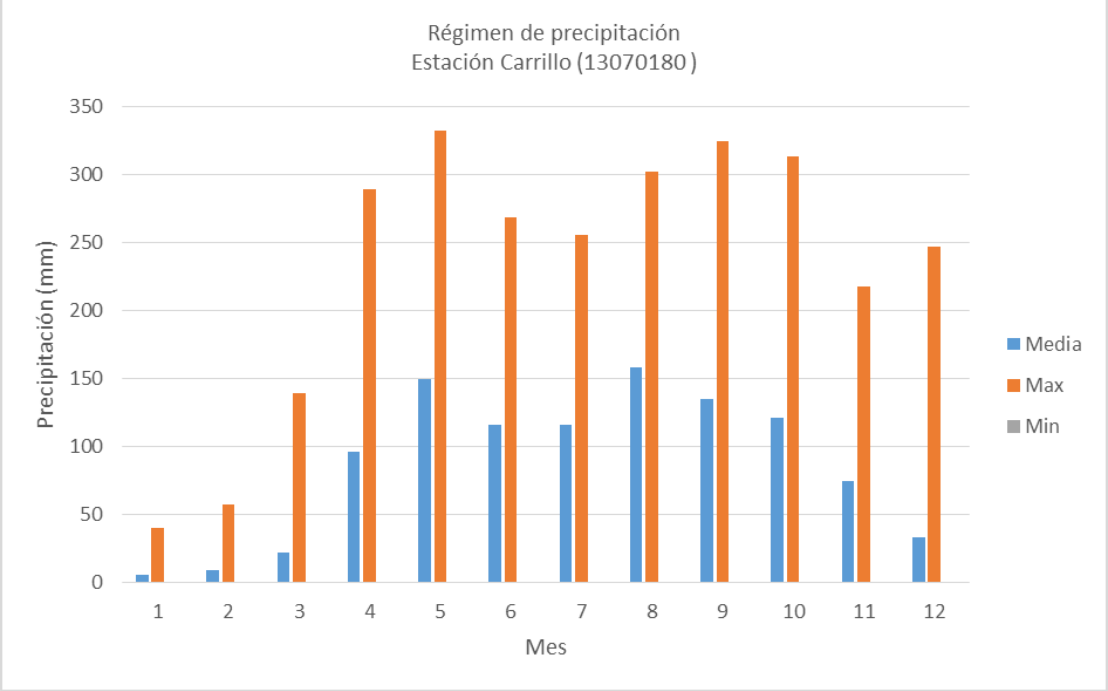


Figura 3.10 Régimen de precipitación mensual estación Carrillo

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

- Distribución espacial de la precipitación

Para la estimación de la precipitación total multianual sobre las cuencas estudiadas se requiere de un campo continuo en el espacio, sin embargo, los registros de precipitación que se tienen son puntuales (estaciones de medición).

Existen diversas técnicas geoestadísticas para la interpolación a partir de datos puntuales, entre las cuales se encuentran IDW (Ponderación por el Inverso de la Distancia), Kriging con deriva (utilizando el semi-variograma de distancias) y Spline, que utiliza un método de interpolación que estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada, siendo este último el que se usó en este estudio, mostrando mejores resultados de interpolación.

En la Figura 3.11: se muestra el mapa interpolado de precipitación, por la metodología Spline, obtenido con base en los registros de precipitación media multianual de las estaciones presentadas en la Tabla 3.2.

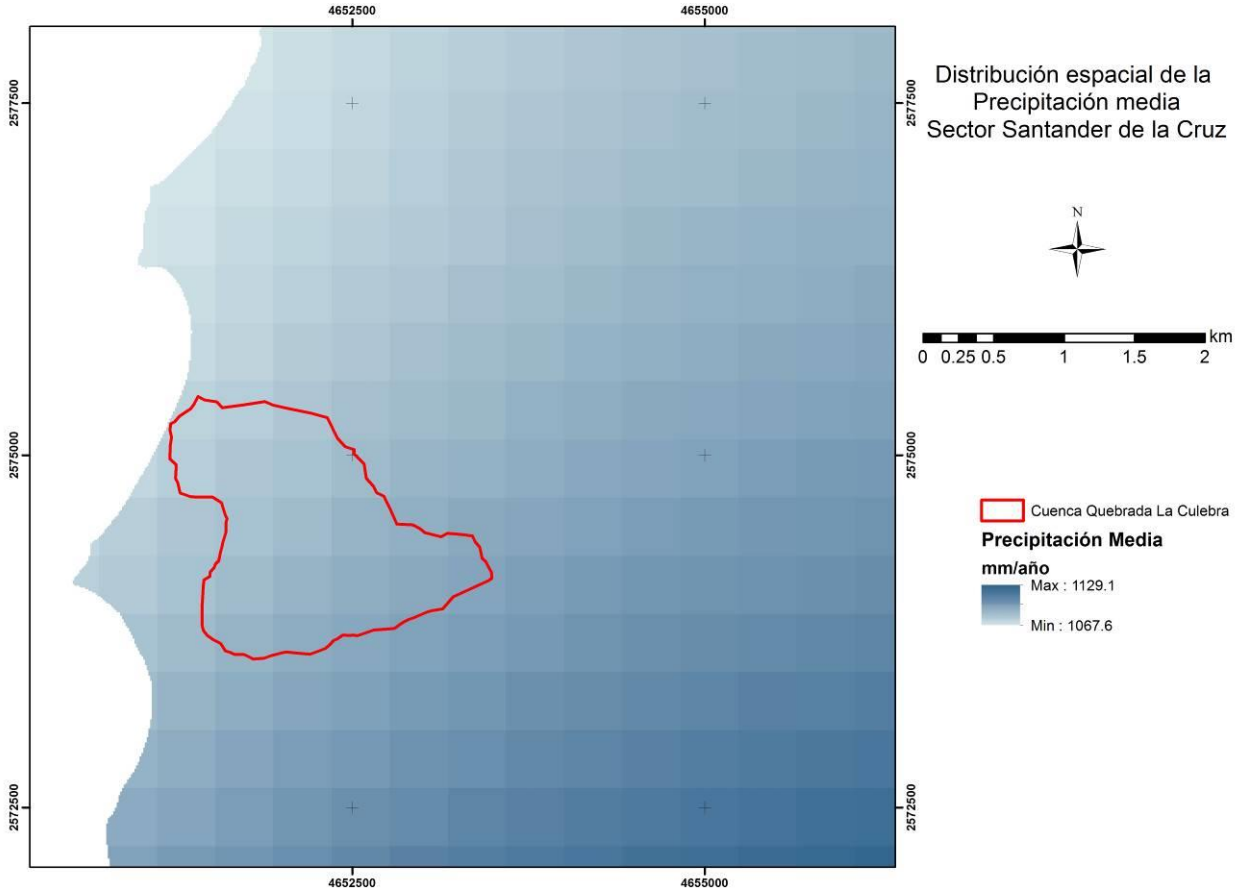


Figura 3.11: Distribución espacial de la precipitación estimada mediante Spline

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

Integrando espacialmente el mapa de precipitación sobre las cuencas, se obtuvo los siguientes valores de precipitación media multianual:

Tabla 3.8: Precipitación media multianual para cada cuenca en el sector Santander de la Cruz

Cuenca	Precipitación (mm/año)
Quebrada Culebra	1086,6

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

3.4.4 Precipitación máxima.

Inicialmente es necesario determinar la intensidad, duración y distribución temporal del evento, para ello se debe estimar la intensidad de la lluvia con una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca. A continuación, se describe la metodología utilizada:

3.4.4.1 *Duración de la lluvia*

La duración de la lluvia se hace igual al tiempo de concentración de la cuenca debido a que es la situación más crítica, en el cual la totalidad de la cuenca está aportando al proceso de escorrentía; para duraciones inferiores al tiempo de concentración no toda la cuenca está aportando escorrentía, y para duraciones mayores, la intensidad de la lluvia disminuye sin incrementarse el área de drenaje, resultando esto en una situación menos desfavorable. La metodología y el cálculo del tiempo de concentración se explicaron en el apartado 3.4.2.2.

3.4.4.2 *Intensidad de la lluvia*

Para determinar la intensidad de lluvia se utilizan las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia), que relacionan su duración con la intensidad asociada a diferentes períodos de retorno. La intensidad de diseño para las cuencas de interés, se determinó a partir de los datos de precipitación máxima en 24 horas de las estaciones con influencia en la cuenca Quebrada Culebra; las cuales son El Limón (13070010), La Doctrina (13085010), San Bernardo del Viento (13085030), San Antonio (13080010), Jaramagal (12040010), Carrillo (13070180). Una vez obtenidas las IDF de cada una de las estaciones se procedió a estimar la influencia de cada una de estas a través de polígonos de Thiessen (Figura 3.18) para luego obtener la intensidad de la lluvia en la cuenca de estudio.

Para la estimación de las curvas IDF, (INVIAS, 2009) plantea un modelo de escalamiento simple que permite estimar la intensidad de una lluvia de determinada duración para una probabilidad dada. A continuación, se muestra el planteamiento matemático del modelo:

$$I = a * \frac{T^b}{(t/60)^c} * M^d$$

Donde:

I: intensidad de precipitación (mm/h)

T: periodo de retorno (años)

M: precipitación máxima promedio multianual en 24 h

t: duración de la lluvia (min)

a, b, c, d: coeficientes de ajuste de la regresión

Tabla 3.9 Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas IDF para Colombia.

Región	Coeficientes			
	a	b	c	d
Andina	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacifico	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquia	5.53	0.17	0.63	0.42

Fuente: INVIAS, 2009.

Teniendo en cuenta la localización del proyecto, se tomó como base la región Caribe para los parámetros en las curvas IDF.

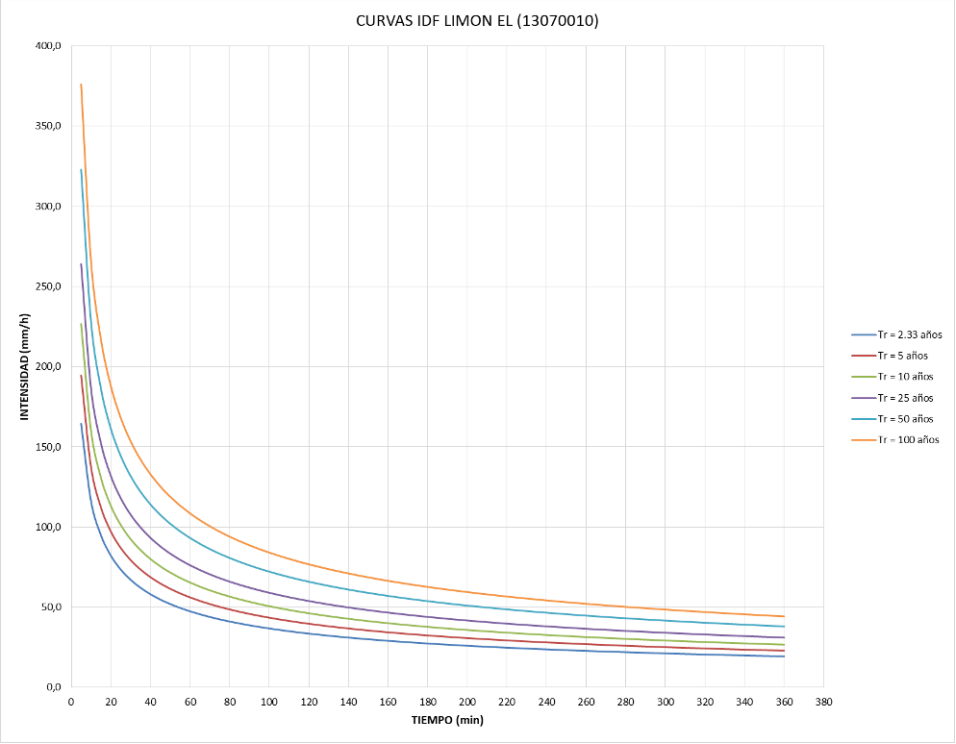


Figura 3.12 Curvas IDF de la estación El Limón (13070010).

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

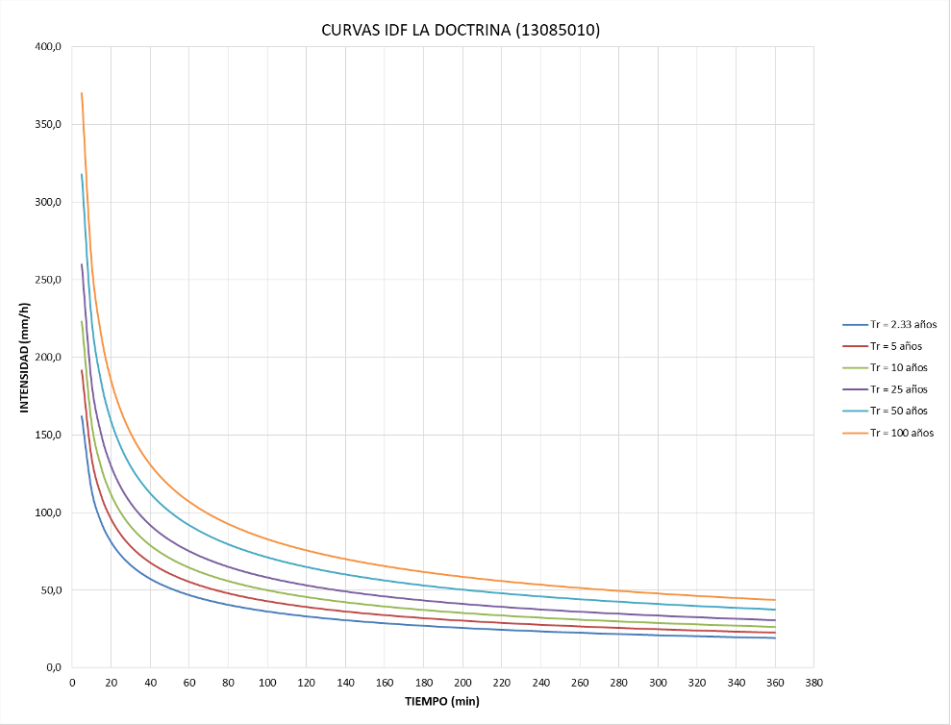


Figura 3.13 Curvas IDF de la estación La Doctrina (13085010)

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

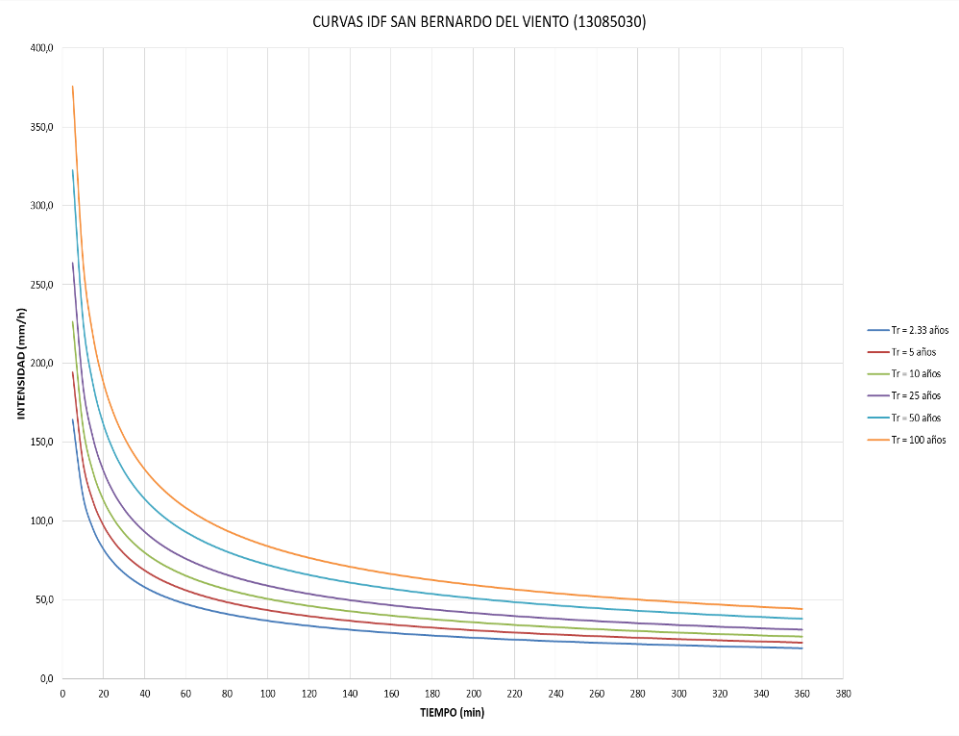


Figura 3.14 Curvas IDF de la estación San Bernardo del Viento (13085030)

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

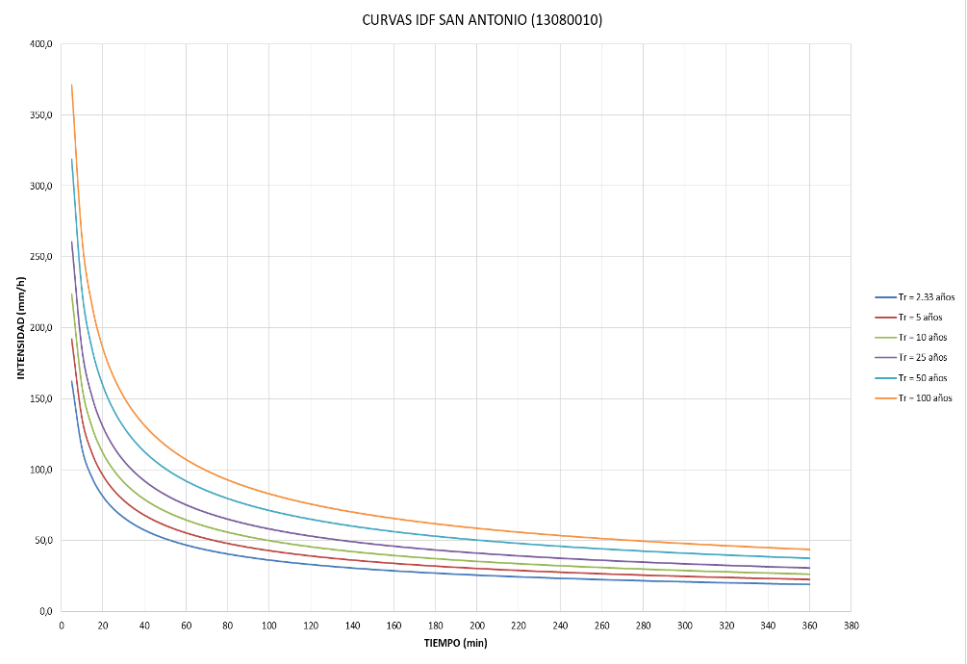


Figura 3.15 Curvas IDF de la estación San Antonio (13080010)

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

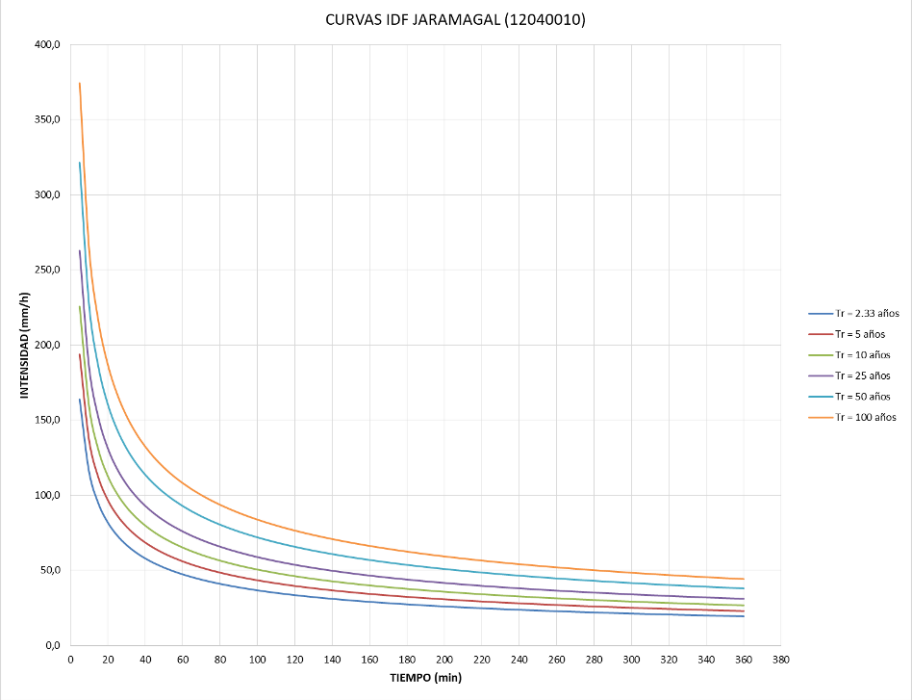


Figura 3.16 Curvas IDF de la estación Jaramagal (12040010)

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

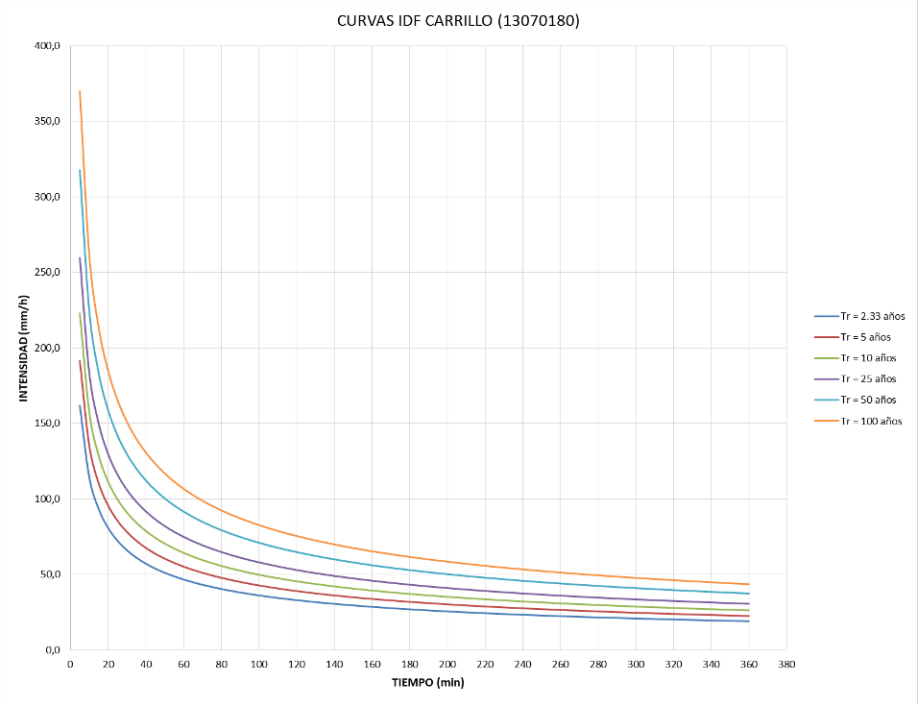


Figura 3.17 Curvas IDF de la estación Carrillo (13070180)

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

A continuación, se muestra el área de influencia de cada estación de precipitación para la cuenca Quebrada Culebra mediante polígonos de Thiessen:

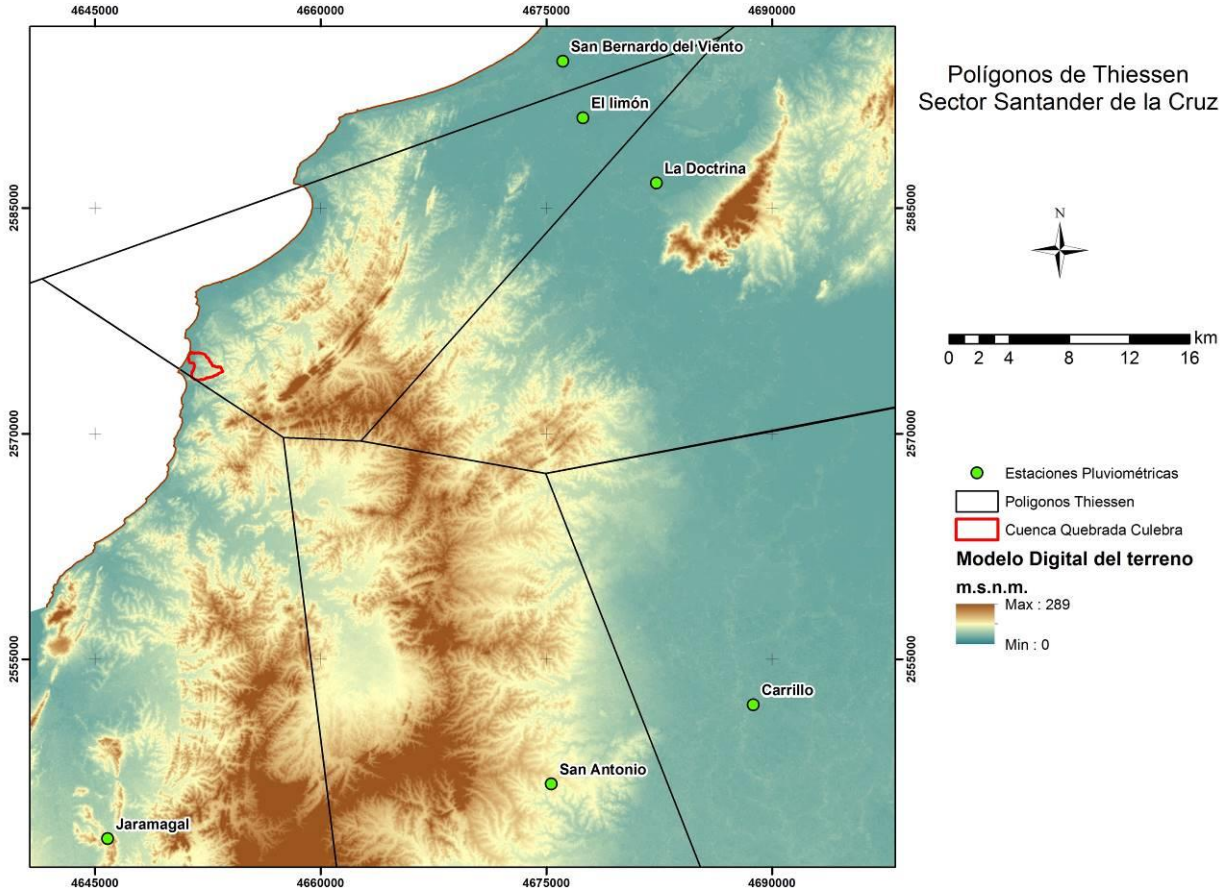


Figura 3.18 Polígonos de Thiessen para la cuenca Cañada Culebra.

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

Posteriormente de hallar los tiempos de concentración presentados en la Tabla 3.7, se procedió a determinar la intensidad de la lluvia para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años (Tabla 3.10), según el tiempo de concentración para la cuenca Quebrada Culebra.

Tabla 3.10 Intensidad de la lluvia para las cuencas en el sector Santander de la Cruz.

Cuenca	Intensidad de la lluvia para cada periodo de retorno (mm/h)					
	Tr: 2.33	Tr: 5	Tr: 10	Tr: 25	Tr: 50	Tr: 100
Quebrada Culebra	50.12	59.29	69.05	84.48	98.39	114.60

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

3.4.4.1 *Precipitación para diferentes periodos de retorno.*

Ahora, multiplicando le intensidad de la lluvia por el tiempo de concentración de la cuenca se obtiene la precipitación total en mm que se daría para cada periodo de retorno:

Tabla 3.11 Precipitación total para la cuenca Quebrada Culebra en diferentes periodos de retorno.

Cuenca	Precipitación para cada periodo de retorno (mm)					
	Tr: 2.33	Tr: 5	Tr: 10	Tr: 25	Tr: 50	Tr: 100
Quebrada Culebra	45.0	53.2	61.9	75.8	88.3	102.9

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

3.4.5 Temperatura:

En la zona ecuatorial, la cantidad de energía que se recibe procedente del sol es muy similar a lo largo del año, razón por la cual las temperaturas son más uniformes, es decir, presentan poca variación a través de los meses y durante el año, con amplitudes de 1 a 3°C. Generalmente, los tres parámetros que describen el régimen de la temperatura en un determinado lugar son la temperatura media, la mínima media y la máxima media. Para la región del Caribe se presentan temperaturas medias entre los 24 y 28 °, siendo los meses más cálidos de mayo a agosto; mientras que principios y finales del año las temperaturas son ligeramente menores por efecto de los vientos Alisios[7].

En Colombia, la temperatura superficial del aire está fuertemente condicionada por la altura sobre el nivel del mar. El método de regionalización propuesto por Cenicafé es una buena manera de estimar la temperatura media multianual en cualquier lugar del país. Dicha regionalización fue elaborada para las diferentes regiones tomando como información básica los registros de temperatura media mensual del aire en superficie de 1002 estaciones. Los resultados obtenidos permitieron obtener las siguientes relaciones[8]:

Región Andina	$T = 29{,}42 - 0{,}0061 \cdot H$
Región Atlántica	$T = 27{,}72 - 0{,}0055 \cdot H$
Región Oriental (Orinoquía y Amazonía)	$T = 27{,}37 - 0{,}0057 \cdot H$
Región Pacífica	$T = 27{,}05 - 0{,}0057 \cdot H$

Donde:

T temperatura media multianual (°C)

H altura sobre el nivel del mar (msnm)

[7] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Atlas Climatológico de Colombia. Bogotá, D.C. 2017. 266 páginas.
[8] Chaves, B. & Jaramillo, A. Regionalización de la Temperatura del Aire en Colombia, Avances en Recursos Hidráulicos. Número 6, página 3742. 1999.

Teniendo en cuenta que las cuencas estudiadas se encuentran en su totalidad en la región Atlántica, se estimó la temperatura media multianual aplicando su ecuación sobre el MDE. En la Figura 3.19 se muestra la distribución espacial de la temperatura en la cuenca Cañada Culebra.

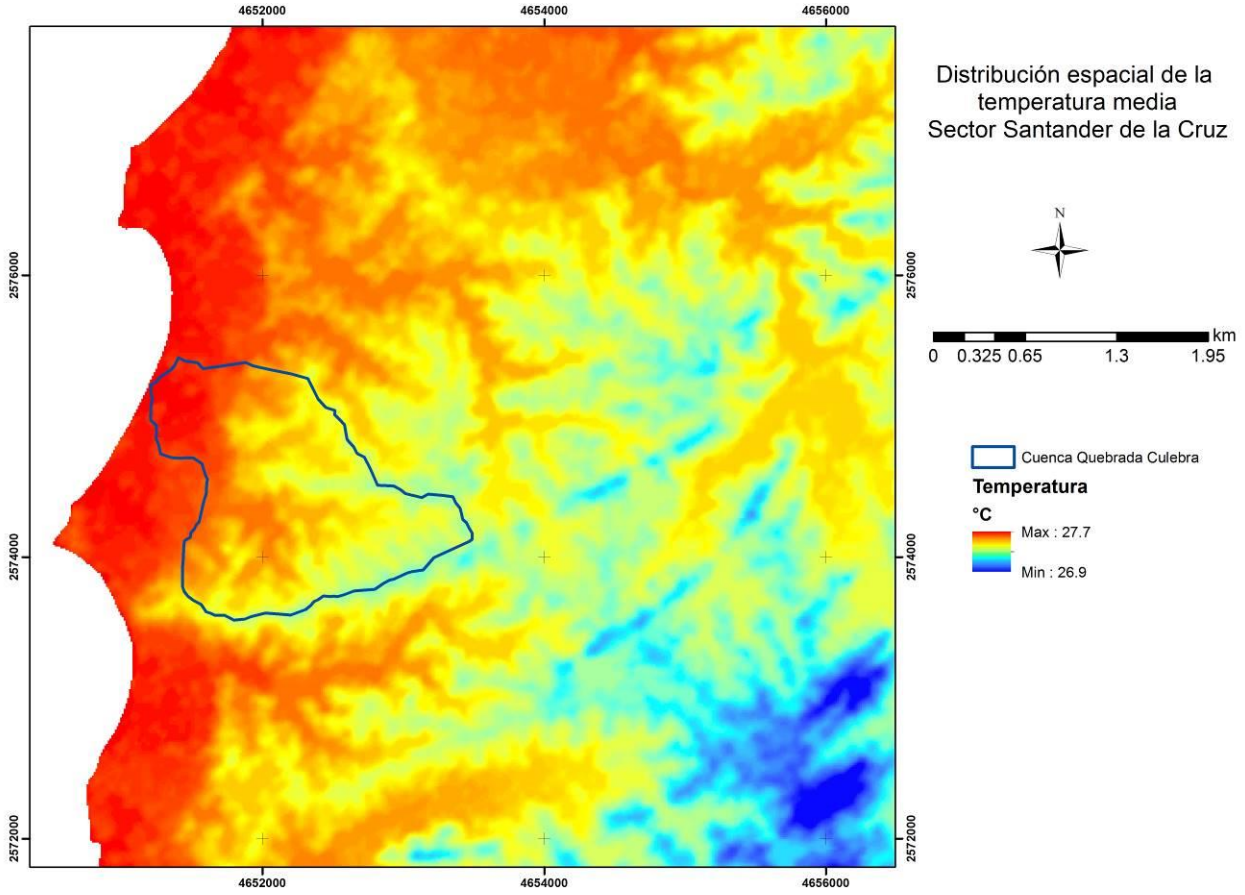


Figura 3.19: Distribución espacial de la temperatura media

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

Integrando espacialmente el mapa de temperatura sobre cada cuenca, se obtuvo el valor promedio de temperatura.

Tabla 3.12: Temperatura promedio para la cuenca Quebrada Culebra

Cuenca	Temperatura Promedio
Quebrada Culebra	27.5

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

3.4.6 Evapotranspiración

La evapotranspiración es una componente fundamental en el balance hidrológico, aunque es a su vez, la variable con mayores incertidumbres en su medición y estimación; está compuesta por la evaporación desde superficie y por la transpiración de las plantas; su dinámica está condicionada por tres factores fundamentales: disponibilidad de agua, disponibilidad de energía para cambio de estado del agua y condiciones aerodinámicas propicias para asimilación y transporte de vapor de agua[9].

Para el cálculo de la evapotranspiración media multianual existen varios métodos empíricos, la mayoría de ellos basados en fórmulas que han sido obtenidas en condiciones climáticas diferentes a las tropicales. Se demostró que los métodos más confiables para estimar la evapotranspiración en Colombia se basan en las ecuaciones propuestas por Cenicafé, Turc y Budyko; la primera metodología propone el cálculo para la evapotranspiración potencial, Turc y Budyko para evapotranspiración real, donde la primera es más sencilla de usar debido a que está en función de la precipitación y la temperatura y es uno de los que arroja menores errores en los estimativos de la evapotranspiración real[10]. En este caso, se calculó la evapotranspiración potencial mediante Cenicafe y la real por el meto de Budyko:

- Método de Budyko

Su formulación se basa en un balance de masas y propone la siguiente expresión:

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

Donde

ETR: Evapotranspiración real (mm/año)

P: Precipitación media multianual (mm/año)

ETP: Evapotranspiración potencial (mm/año), para la cual Cenicafe propone la siguiente ecuación para su estimación:

$$ETP = 1700.17 * exp(-0.0002 * H)$$

[9] Barco, J & Cuartas, A. Estimación de la Evaporación en Colombia. Tesis de Pregrado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 1998.
[10] Ibíd.

Donde

ETP: Evapotranspiración potencial (mm/año)

H: Altura sobre el nivel del mar (msnm)

Ahora, aplicando la fórmula para la ETP sobre el modelo digital del terreno y luego la ETR para así obtener el mapa de evapotranspiración real, que se muestra a continuación:

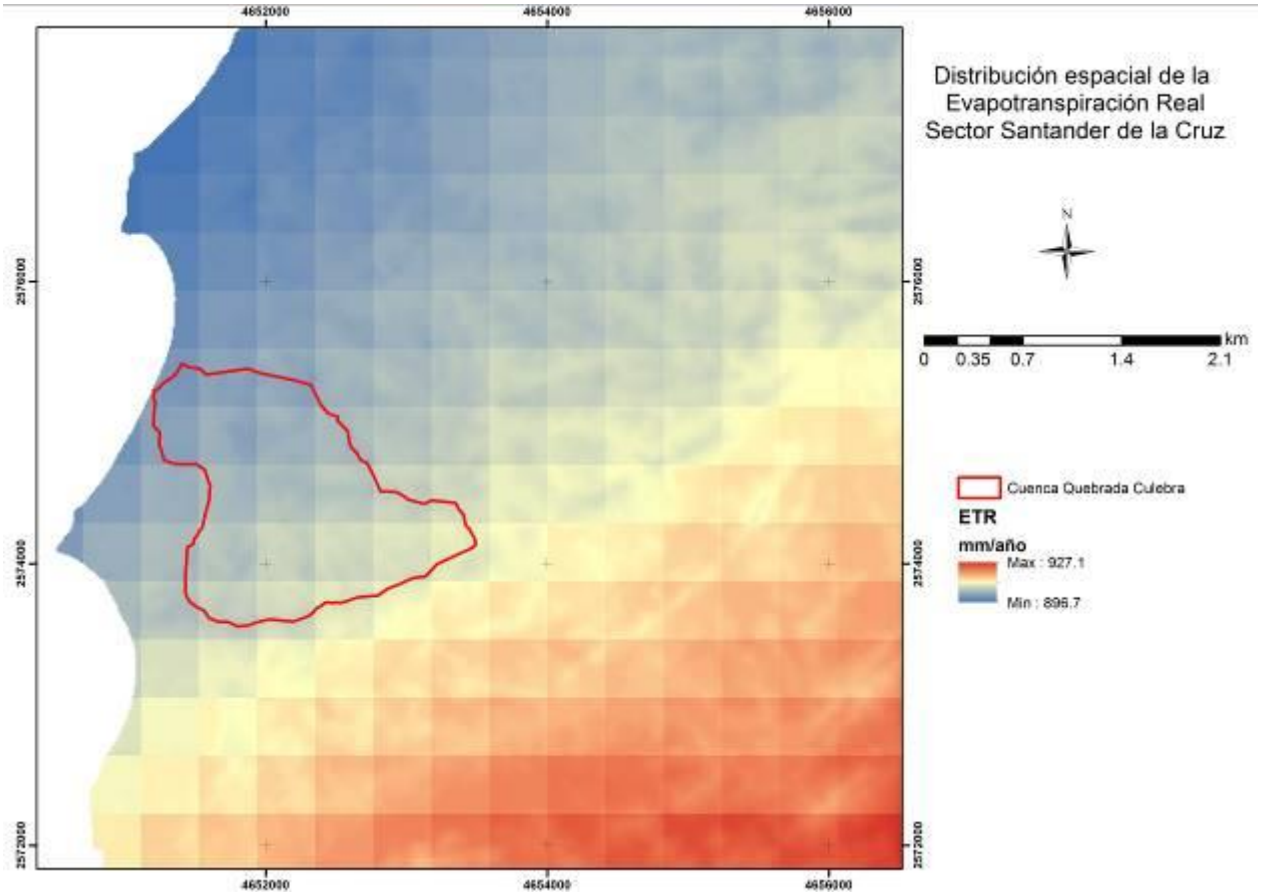


Figura 3.20: Distribución espacial de la evapotranspiración real

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

Integrando espacialmente el mapa de ETR sobre cada cuenca, se obtuvo el valor promedio de para cada una:

Tabla 3.13: Evapotranspiración real para cada cuenca en el sector Santander de la Cruz.

Cuenca	ETR (mm/año)
Quebrada Culebra	906.2

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

3.4.7 Caudales medios

3.4.7.1 *Modelo de Tanques*

Debido a que la cuenca de la Quebrada Culebra no tiene estaciones de medición de caudal, se estimaron los caudales medios por transposición de caudales con un Modelo de Tanques el cual consiste en un modelo hidrológico lluvia - escorrentía, donde la cuenca se divide en celdas cuadradas, se considera que los procesos determinantes en la producción y transferencia de escorrentía (interceptación, detención, infiltración, evapotranspiración, recarga del acuífero, escorrentía superficial y subsuperficial, retorno del flujo base y flujo en los cauces de la red de drenaje) se pueden representar por un sistema de cinco tanques o elementos de almacenamiento conectados entre sí y con los de otras celdas (Figura 3.21) Estos elementos están dispuestos jerárquicamente de arriba hacia abajo y cada uno tiene un significado en la representación del proceso de escorrentía[11]

[11] Jaramillo, M., Vélez, J. I., & Vélez, M. V. Estimación de caudales mínimos usando un modelo distribuido de tanques. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.

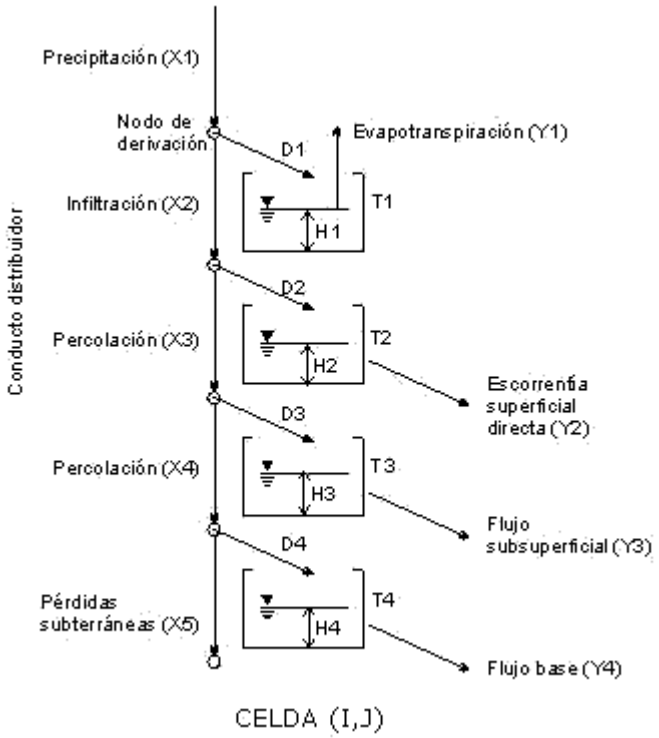


Figura 3.21 Esquema de conexión de los elementos celda una cuenca.

Fuente: Jaramillo, M. Vélez, J. I.

Primer tanque (*T1*): agua capilar que se almacena en la capa superior del suelo. De este elemento sólo es posible la salida del agua mediante la evapotranspiración.

Segundo tanque (*T2*): agua que se aloja en la superficie de la ladera mientras fluye sobre ella como escorrentía superficial directa hasta su ingreso a un cauce en la red de drenaje.

Tercer tanque (*T3*): agua gravitacional que se almacena en la zona saturada de la capa superior del suelo mientras fluye como flujo subsuperficial.

Cuarto tanque (*T4*): agua gravitacional almacenada en la parte inferior del suelo que produce el flujo base.

Quinto tanque (*T5*): almacenamiento de agua mientras fluye por un canal equivalente o representativo de los elementos de la red de drenaje en la celda.

El agua lluvia se conduce por el conducto distribuidor y va saliendo hacia los tanques a través de los nodos de derivación dependiendo de la cantidad de agua disponible, del estado del almacenamiento del tanque o de la capacidad del conducto distribuidor aguas abajo del nodo.

En función del volumen almacenado en cada uno de los tanques, se determina su contribución a la escorrentía. Ésta puede pasar a las celdas aguas abajo o a los cauces de la red de drenaje superficial donde se integran las distintas componentes de la escorrentía con la procedente de las celdas aguas arriba. El modelo realiza el balance para actualizar el volumen almacenado en cada uno de los tanques y realiza el mismo proceso en las celdas de aguas abajo, hasta cubrir toda la cuenca[12]

- Metodología

El modelo consiste en simular los caudales medios de una cuenca a partir de datos de precipitación, los datos de caudal simulados deben ser calibrados con el fin de establecer que el modelo pueda reproducir caudales medidos en campo. Este proceso se logra al encontrar mediante iteraciones, un conjunto de parámetros que producen caudales simulados similares a aquellos medidos, dentro de un rango de error preestablecido, por lo que se requieren estaciones con datos de caudal y precipitación, que coincidan en un rango de fecha determinado para lograr calibrar el modelo. Para este caso se tiene los datos de caudal de la Estación Limnimétrica Tolú Viejo [13097010] sobre el arroyo Pechilin, la cual conforma una cuenca con un área de 500.7 km^2 y los datos de precipitación de la estación Pluviométrica Sincelejo [25020130], debido a la inconsistencia de los datos de la zona y de la estación Limnimétrica, se decidió hacer la calibración con datos diarios para el año de 1974, a continuación, se muestra el resultado del conjunto de parámetros (T1, T2, T3 y T4) que logran producir un caudal similar al caudal medido para el periodo en el año de 1974 para la cuenca de la estación Tolú Viejo en el Arroyo Pechilin, el criterio de error usado fue el criterio de Eficiencia de Nash, el cual luego de la iteración arroja un valor de -75.5.

Figura 3.22 Parámetros de calibración del modelo de tanques.

Parámetros de calibración	Valor (mm)
Almacenamiento Capilar (T1)	0.08
Almacenamiento Agua Superficial (T2)	0.30
Almacenamiento Gravitacional Z Sup (T3)	0.30
Almacenamiento Gravitacional Z Inf (acuífero) (T4)	0.00

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

[12] Jaramillo, M., Vélez, J. I., & Vélez, M. V. Estimación de caudales mínimos usando un modelo distribuido de tanques. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.

Gráficamente se puede observar que el caudal simulado para le estación Tolú Viejo del Arroyo Pechilin tiene un comportamiento similar al caudal medido (Figura 3.23)

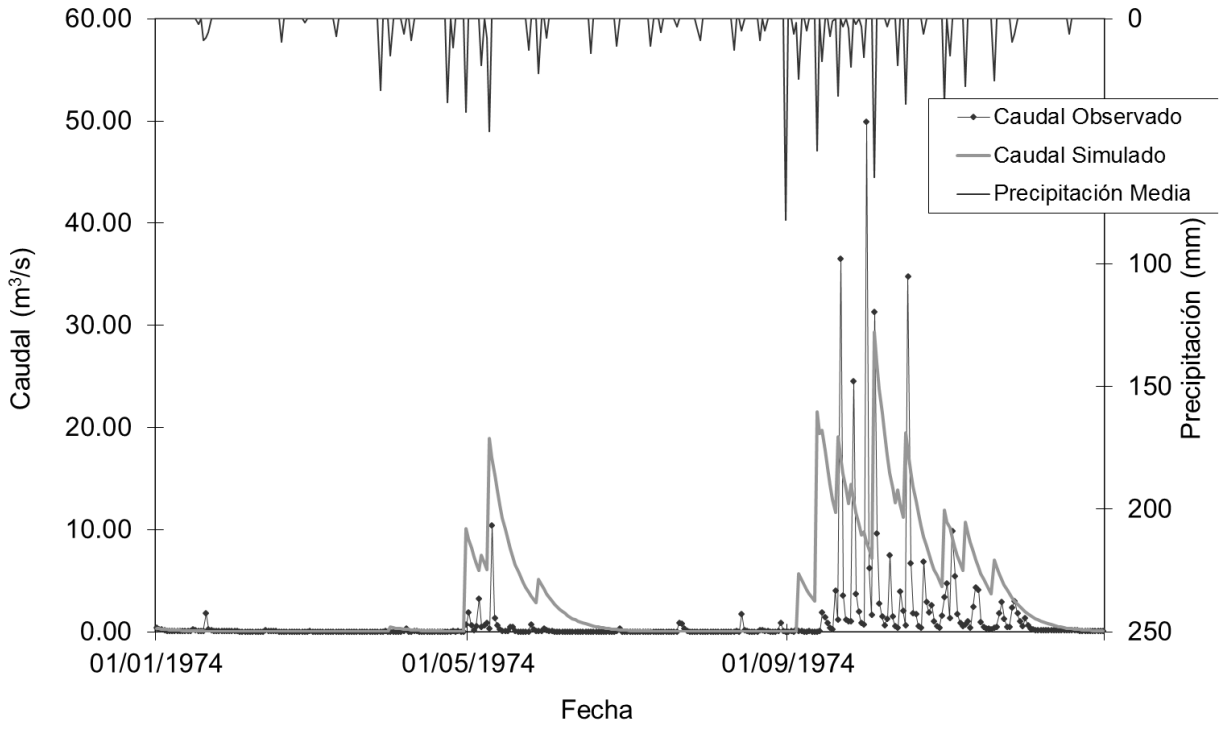


Figura 3.23 Caudales simulados de la estación Limnimetrica Tolú Viejo, Arroyo Pechilin.

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

Luego de calibrados los parámetros del modelo, se fijaron para proceder a calcular la serie de caudales a partir de una serie de precipitación en un rango de tiempo deseado, para este caso se usaron los datos precipitación de la estación Sincelejo desde 01/01/1990 hasta 31/12/2021, obteniendo así la serie diaria de caudal en este mismo rango de fechas.

Ahora mediante de trasposición de caudales se procedió a calcular la serie de caudales de la cuenca Quebrada Culebra. Este tipo de método es muy utilizado cuando no se poseen datos históricos sobre una cuenca, pero solo si se poseen los datos sobre una cuenca similar, o sobre la misma corriente o las cuencas son hidrológicamente homogéneas (tamaño, zona, precipitación anual, vegetación, pendientes, etc.) La expresión utilizada se presenta a continuación:

$$Q_{sp} = \frac{A_{sp}}{A_{Estación}} * Q_{Estación}$$

En donde:

Q_{SP}: Caudal Medio Instantáneo en el sitio de proyecto, m³/s.

A_{SP}: Área de Drenaje Aferente hasta el sitio de proyecto.

$Q_{Estación}$: Caudal Medio Instantáneo en la estación limnigráfica Toluviejo, m³/s.

$A_{Estación}$: Área de Drenaje Aferente hasta la estación limnigráfica Toluviejo igual a 500,70 km².

Al aplicar este método, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Régimen de caudales Arroyo Babilla

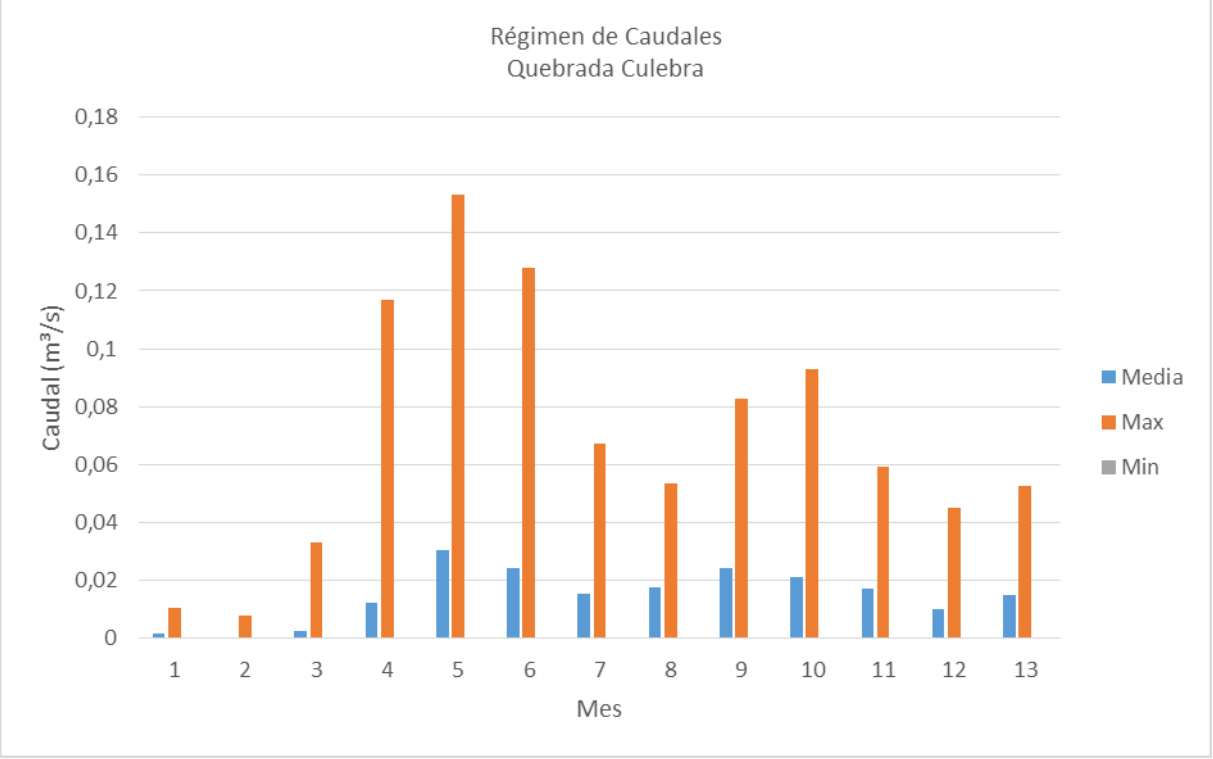


Figura 3.24 Régimen de caudales medios mensuales para la Quebrada Culebra.

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

Tabla 3.14 Régimen de caudales medios mensuales para la cuenca Quebrada Culebra.

Caudal (m³/s)												
Mes	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Medio	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
Máximo	0,01	0,01	0,03	0,12	0,15	0,13	0,07	0,05	0,08	0,09	0,06	0,04

Fuente: Aqua & Terra Consultores Asociados S.A.S.2022

En la Figura 3.25 se presenta la CDC de la Quebrada Culebra, la escala vertical de la curva representa caudales medios diarios y la escala horizontal las probabilidades de que dichos caudales puedan ser igualados o excedidos.

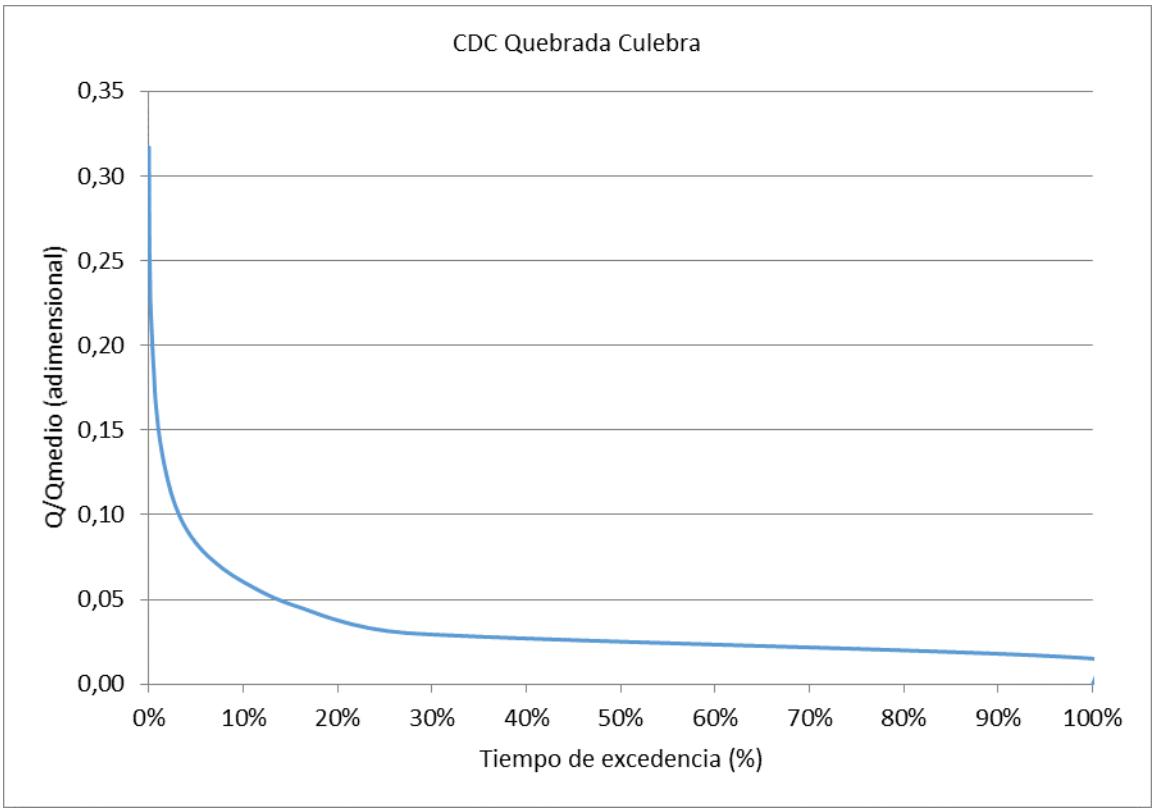


Figura 3.25 Curva de duración de caudales para el Arroyo Babilla

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

3.4.8 Caudales máximos

Como se explicó en la Tabla 3.3, para el cálculo de los caudales máximos existen diversos métodos, y la aplicación de cada uno depende del área de la cuenca para este caso, la Quebrada Culebra con área de 2.49 km^2 se considera una cuenca menor, por lo que se calculó

el caudal máximo con el método racional, siendo este el más apropiado para este tipo de cuencas.

3.4.9 Método racional

El método racional, ampliamente reconocido por su sencillez y validez en cuencas pequeñas, permite estimar el caudal máximo generado por una lluvia de intensidad constante distribuida homogéneamente en toda el área de la cuenca y con una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca (Rojo, J.D., 2016). Este método utiliza la siguiente expresión:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3.60}$$

Donde:

Q: caudal máximo (m^3/s)
C: coeficiente de escorrentía
i: intensidad de la lluvia (mm/h)
A: área de la cuenca (km^2)

Para este caso se tiene el área de la cuenca y la intensidad de la lluvia que se calculó en el apartado 3.4.4.2. de este documento, por lo que únicamente hace falta el cálculo del coeficiente de escorrentía que se explica a continuación:

- COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA

El coeficiente de escorrentía tiene en cuenta las características y condiciones del suelo (cobertura del suelo, uso del suelo, pendiente del terreno y período de retorno). El coeficiente definitivo se obtiene ponderando por áreas, con base en los valores recomendados por (Chow, V. Te et al., 1988).

Tabla 3.15 Coeficiente de escorrentía para diferentes periodos de retorno.

Características de la superficie	**Periodo de retorno (años)**						
	Tr: 2.33	**Tr: 5**	**Tr: 10**	**Tr: 25**	**Tr: 50**	**Tr: 100**	**Tr: 500**
Áreas desarrolladas							
Asfaltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
Concreto/techo	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
Zonas verdes (jardines, parques, etc.)							

Características de la superficie	Periodo de retorno (años)						
	Tr: 2.33	Tr: 5	Tr: 10	Tr: 25	Tr: 50	Tr: 100	Tr: 500
Condición Pobre (Cubierta de pasto menor del 50% del área)							
Plano 0-2%	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Promedio 2-7%	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Pendiente superior a 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
Condición Promedio (Cubierta de pasto del 50 al 75% de área)							
Plano 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Condición buena (Cubierta de pasto mayor del 75% del área)							
Plano 0-2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Promedio 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Pendiente superior a 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Áreas no desarrolladas							
Cultivos							
Plano 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Promedio 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Pastos							
Plano 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Bosques							
Plano 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Pendiente superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

Fuente: Chow, V. Te. et al, 1988.

- Cobertura vegetal

Para la caracterización de las coberturas vegetales se utilizó la información del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), generada a partir de fotografías aéreas, ortofotomapas e imágenes de satélite LandSat y Spot, aplicando la adaptación de la metodología Corine Land Cover (IDEAM, 2015). En la zona se encontró que en su mayoría las coberturas son cultivos y pastizales como se muestra en la Tabla 3.16, donde además se

calculó el coeficiente de escorrentía para cada periodo de retorno considerando la cobertura y la pendiente del terreno.

Tabla 3.16 Cobertura vegetal y coeficientes de escorrentía para las cuencas en el sector Santander de la Cruz.

Cuenca	Cobertura			Coeficiente de escorrentía para cada periodo de retorno					
	Cultivos	Urbanos	Pastizales	Tr: 2.33	Tr: 5	Tr: 10	Tr: 25	Tr: 50	Tr: 100
Quebrada Culebra	0.24	0.03	0.73	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

En la siguiente figura se muestra los diferentes usos del suelo para cada cuenca en el sector de Santander de la Cruz

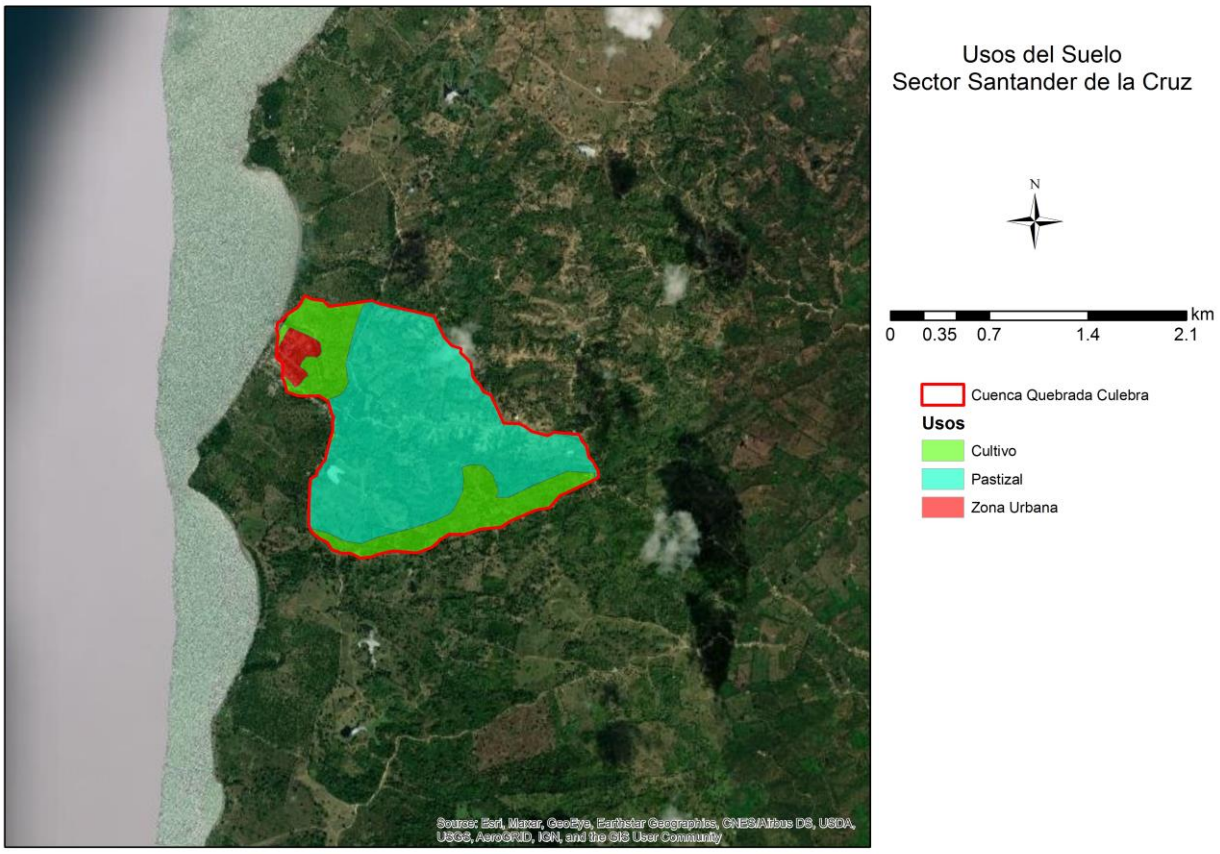


Figura 3.26 usos del suelo para cada cuenca en el sector de Santander de la Cruz.

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

Ahora, aplicando la ecuación del Método Racional se obtiene el caudal máximo asociado a cada periodo de retorno como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3.17 Caudales máximos para las cuencas en el sector Santander de la Cruz.

Cuenca	Caudales máximos para cada periodo de retorno (m^3/s)					
	Tr: 2.33	Tr: 5	Tr: 10	Tr: 25	Tr: 50	Tr: 100
Quebrada Culebra	10.75	13.94	17.19	23.37	29.26	37.26

Fuente: AQUA & TERRA Consultores Asociados S.A.S., 2022.

3.5 ESTIMACIÓN DE LA DENUDACIÓN ANUAL EN EL SECTOR SANTANDER DE LA CRUZ

La tasa media anual de pérdida de suelo por erosión laminar se estima con base en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo:

$$E = RKLSCP$$

Donde:

E es la pérdida de suelo por unidad de área [T $(m^2$ año$)^{-1}$]

R es el factor de erosividad de la lluvia [MJ mm $(m^2$ h$)^{-1}$]

K es el factor de erodabilidad del suelo [T m^2 h $(m^2$ MJ h$)^{-1}$]

LS es el factor topográfico [adimensional]

C es el factor de cobertura por manejo [adimensional]

P es un factor para la práctica de conservación [adimensional]

Esta ecuación describe la relación entre la erosión laminar por efecto de la lluvia y los principales factores que la controlan.

El factor de erosividad, R, evalúa la capacidad potencial de la lluvia para producir erosión en circunstancias dadas. Según Pérez (2001) el factor de erodabilidad de la lluvia para Colombia se puede calcular según la siguiente expresión:

$$R = 1.193 \times 10^{-8} \, PMA^{1.70148}$$

Donde *PMA* es la precipitación media anual [mm/año] y *R* es el factor de erosividad de la lluvia [MJ mm $(m^2$ h$)^{-1}$]. Para la cuenca definida hasta el sitio de captación se estimaron valores para *R* que oscilan entre 1.54×10^{-2} y 1.40×10^{-2} [T m^2 h $(m^2$ MJ h$)^{-1}$].

El factor de erodabilidad del suelo, *K*, representa el grado de resistencia natural que ofrece el suelo al actuar otros factores erosivos. El valor de este factor se tomó del Atlas Hidrológico de Colombia (Poveda et al., 2007). En dicho estudio se obtuvo en función de la textura del suelo, un mapa de *K* para todo el territorio Colombiano con una resolución de 120 segundos de arco (pixeles de 3.7 km aproximadamente). Se debe tener en cuenta que para la elaboración de este mapa solamente se tuvo en cuenta un número reducido de texturas para la clasificación del suelo y la escala de la información utilizada fue de 1:3'400 000, sin embargo debido a la ausencia de datos, se optó por trabajar con esta información. Para el sector Santander de la Cruz se estimó un valor para *K* de 7.192×10^{-2} [T m^2 h (m^2 MJ h)$^{-1}$].

El factor LS es el producto de los subfactores longitud (L) y pendiente (S) de ladera, los cuales se calculan con las siguientes expresiones (McCool et al., 1987 y 1989 y Foster et al., 1977, citados por Barrios, 2000):

$$L = (\lambda / 22.13)^m$$

$$m = \beta / (1 + b)$$

$$\beta = \{(sen\theta / 0.0896) / [3.0(sen\theta)^{0.8} + 0.56]\} \times r$$

$S = 10.8 sen\theta + 0.03$; para $p < 9\%$

$S = 16.8 sen\theta - 0.50$; para $p > 9\%$

Donde:

λ longitud de ladera (m)

m exponente variable según β

β relación erosión en surco a erosión en entresurco

θ ángulo de inclinación del terreno

p pendiente del terreno (%)

r coeficiente igual a: 0.5 en tierras forestales o pastizales; 1.0 en terrenos agrícolas; y 2.0 en sitios de construcción.

La distribución espacial de λ dentro de la cuenca se estimó mediante el MDE según el modelo CALSITE (Bolton et al., 1995, citado por Barrios, 2000):

$$\lambda = (A/\pi)^{0.5}$$

Donde *A* es el área acumulada de drenaje. Finalmente la cobertura resultante de aplicar la ecuación (2.15) se actualizó para considerar λ = 0 en los píxeles que corresponden a la red de drenaje de la cuenca

El factor *C* se ha definido como la relación entre la pérdida de suelo de una parcela sometida a determinado uso y manejo, y las pérdidas correspondientes a un suelo no cultivado. Se han elaborado una gran cantidad de tablas para determinar el valor del coeficiente *C* dependiendo del tipo y cubrimiento de la cobertura vegetal. Considerando que el uso del suelo en la cuenca analizada corresponde principalmente a bosques y pastizales, y tomando como referencia la clasificación propuesta en el Atlas hidrológico de Colombia (Poveda et al., 2007), se asumió un valor de 0.12 para el sector Santander de la Cruz.

Para obtener los valores debidos a las prácticas de conservación, *P*, se han empleado los parámetros del mapa de pendientes (el factor *P* varía según la pendiente), ya que no hay información de la medición directa de esta variable. Los valores se han asignado dividiendo la pendiente en los rangos presentados en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Valores asignados a P según la pendiente.

Valor de la pendiente	Valor asignado a P
0% a 20%	0,35
20% a 40%	0,5
40% a 60%	0,6
60% a 80%	0,7
80% a 100%	0,8

Fuente: INGEX, 2015.

Teniendo la cuenca rasterizada, para cada celda se calculó la tasa media anual de pérdida de suelo por erosión laminar como el producto de los cinco factores descritos anteriormente. En la Figura.3.27 se presenta el mapa de erosión laminar obtenido para las cuenca asociada a los puntos de captación.

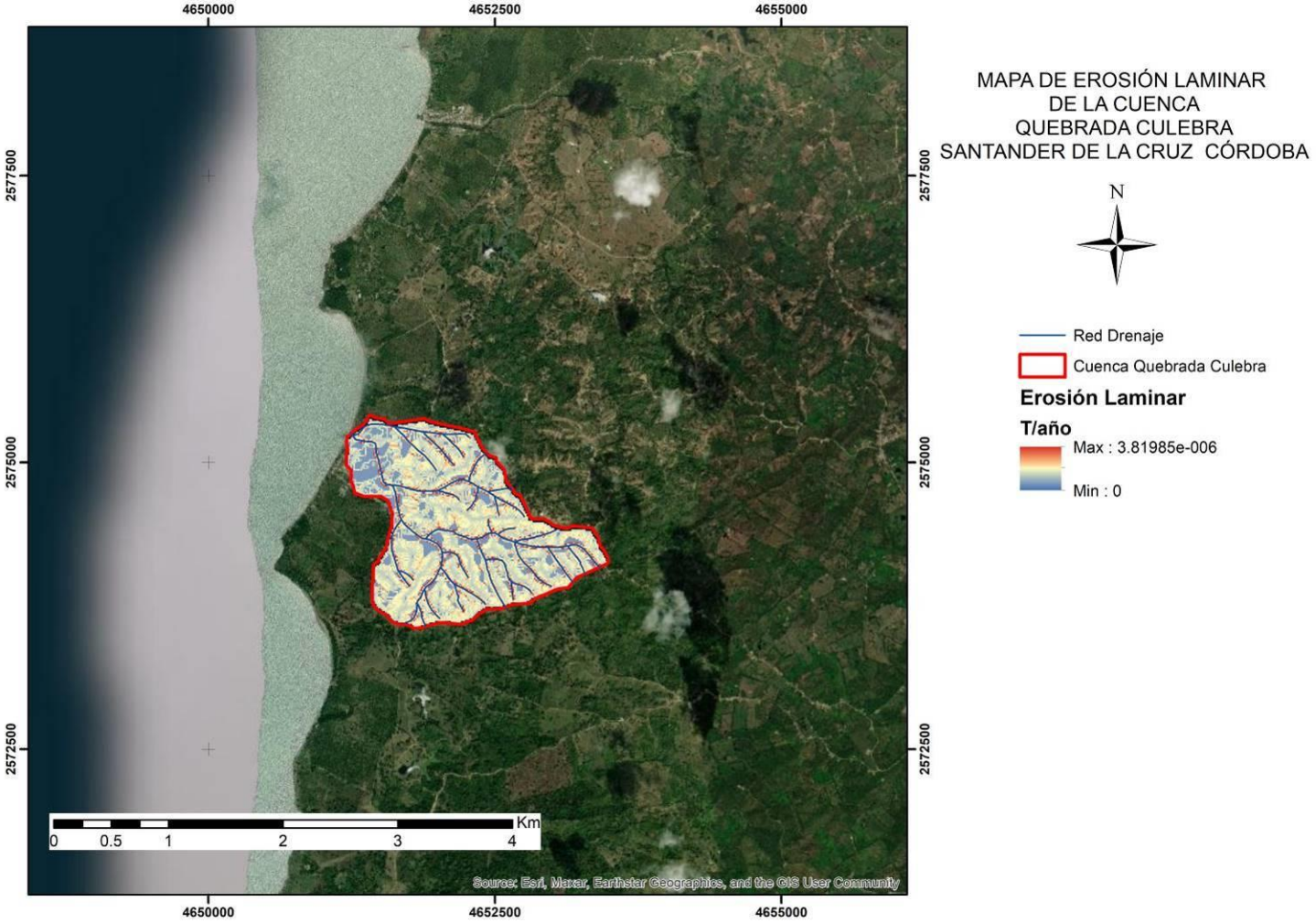


Figura.3.27 Mapa de erosión laminar cuenca Quebrada Culebra

Fuente: Aqua & Terra Consultores Asociados S.A.S., 2022.

Al integrar el mapa de erosión laminar en dirección del flujo, se obtiene que la tasa anual de sedimentos producidos en las corrientes al interior del área de influencia directa e indirecta por erosión laminar se muestra la Tabla 3.19.

Tabla 3.19. Erosión laminar en cada una de las corrientes.

Corriente	Erosión Laminar (T/año)
Quebrada Culebra	1.11

Fuente: Aqua & Terra Consultores Asociados S.A.S., 2022.

Debe tenerse en cuenta, que dentro del estimativo realizado, no se consideraron procesos importantes en la producción de sedimentos, como la formación de cárcavas y surcos en las partes altas de la cuenca, la erosión en las bancas de los cauces y la remoción en masa.

3.6 CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Es bien conocido que el equilibrio de una partícula en el lecho de un río está gobernado por el balance entre las fuerzas desestabilizadoras de sustentación y de arrastre, y las fuerzas estabilizantes de gravedad y de entrabamiento de las partículas (Aguirre-Pe, 2000)[13]. El transporte de sedimentos de las partículas por el flujo de agua, puede estar en forma de carga de fondo y carga suspendida, dependiendo del tamaño de las partículas de material del lecho y las condiciones de flujo. (Van Rijn, 1993)[14] El transporte de sedimentos total para un río está dado por dos partes: la primera por los sedimentos que son transportados en el fondo del cauce o en el lecho del río, denominados por las letras “qsb”; la segunda por los sedimentos que son transportados en suspensión, denominados por las letras “qss”. La suma de estos dos parámetros da como resultado el transporte total de los sedimentos que son llevados por el río, denominado por las letras “qs”. La complejidad de la mecánica del transporte de sedimentos es tal que no ha podido proponerse una verdadera ecuación dinámica del transporte de la fase sólida de un flujo de agua y sólidos. En su lugar han florecido en distintas partes del mundo ecuaciones empíricas, semi empíricas o basadas en distintas teorías que dan razón de ciertas observaciones. Estas ecuaciones son aproximadas, no exactas, solo válidas dentro del rango de valores para el que fueron obtenidas. (Martín, 2002)[15].

[13] Aguirre-PE, J & Olivero M.L. (2000). Transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente. Fundación para el Fomento de la Ingeniería del Agua (7) 4. Universidad de Córdoba, España.
[14] Van Rijn, L. (1993). Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Netherlands, Aqua Publications.
[15] Martín, J. (2002). Ingeniería de Ríos. Universidad Politécnica de Cataluña.

Diferentes experimentos han encontrado ecuaciones paramétricas en función del caudal de la corriente y su pendiente, la cuales son de la forma:

$$Qs = kS^m Q$$

Diferentes autores han encontrados los parámetros k y m a partir de mediciones en canales experimentales. Rickemann (1991)[16] propuso un valor de k y m de 1.5 pero limita la pendiente y su rango de aplicación va desde pendientes de 0.01 % hasta 5 %.

Para las corrientes objeto de estudio se usan los valores que propuso Rickemanm debido a que están dentro del rango de aplicación de la formula.

El caudal seleccionado para calcular la capacidad de transporte de la corrientes que drena al sector de Santander de la Cruz, corresponde al caudal asociado a un periodo de retorno de 2.33 años, el cual es asociado al caudal de banca llena de la corriente.

Tabla 3.20. Caudales máximos asociados a caudal de Banca llena.

Cuenca	Caudales máximos para cada periodo de retorno (m^3/s)
	Tr: 2.33
Quebrada Culebra	10.75

Fuente: Aqua & Terra Consultores Asociados S.A.S., 2022.

A continuación se muestra la pendiente longitudinal del tramo final de la corriente

Tabla 3.21. Pendiente de cada una de las corrientes.

Cuenca	Pendiente (m/m)
Quebrada Culebra	0.003

Fuente: Aqua & Terra Consultores Asociados S.A.S., 2022.

De la tabla anterior se puede apreciar que la pendiente de la corriente es muy baja, lo cual es congruente con la zona donde se encuentran, la cual es en la desembocadura con el mar.

Tabla 3.22. Capacidad de transporte de las fuentes.

Cuenca	Capacidad de transporte (m^3/s)
Quebrada Culebra	0.00264

Fuente: Aqua & Terra Consultores Asociados S.A.S., 2022.

[16] Rickenmann, D. (1991). Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. Journal of Hydraulic Engineering, 117(11), 1419–1439. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429 (1991)117:11(1419)

De la tabla anterior se puede apreciar que la capacidad de transporte de las corrientes estudiadas es muy baja para el caudal para un periodo de retorno de 2.33 años, el cual es asociado a un caudal de banca llena.