Introducción

Se presenta un análisis y concepto sobre el documento: Componente Hidrológico y Climatológico con fecha de realización en el año 2025 y que hace parte del Proyecto de Definición del Límite Físico y Estrategias de Manejo Ambiental para la Ronda del Río Ranchería, elaborado bajo el contrato N° 0124 de 2024 (Suscrito entre CORPOGUAJIRA y el Consorcio Ronda Ranchería).

El documento ha sido analizado por personal técnico de la interventoria del proyecto. A continuación, se presenta un análisis riguroso y estructurado del documento en concordancia con los estándares de la ingeniería civil, hidrología y la normatividad ambiental colombiana y se presentan al final unas conclusiones y recomendaciones.

Hidrología.

1. Generalidades

El río Ranchería es la arteria fluvial más importante del departamento de La Guajira, Colombia. Nace en la Sierra Nevada de Santa Marta y recorre gran parte de la geografía peninsular hasta desembocar en el mar Caribe, a la altura del municipio de Riohacha. Debido a su importancia estratégica para el abastecimiento de agua potable, la agricultura, la minería y la conservación de ecosistemas sensibles, la delimitación de su Ronda Hídrica (Faja Paralela) es una prioridad legal y de planificación territorial, fundamentada en el Decreto 501 de 2018 y la guía metodológica del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).

La hidrología cumple el papel fundamental de estimar el comportamiento de las lluvias extremas y transformarlas en caudales de diseño (hidrogramas de crecientes) para diferentes períodos de retorno (Tr). Estos caudales actúan como el insumo primario e indispensable para la posterior modelación hidráulica, la cual define espacialmente la mancha de inundación y, por ende, el límite físico de la ronda protectora.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

2.1. Objetivo General

El documento presentado por la firma consultora establece la caracterización hidroclimatológica, morfométrica y la modelación hidrológica de la cuenca del río Ranchería y sus principales subcuencas afluentes, con el fin de estimar los caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno (Tr) como insumo base para la delimitación de la Ronda Hídrica.

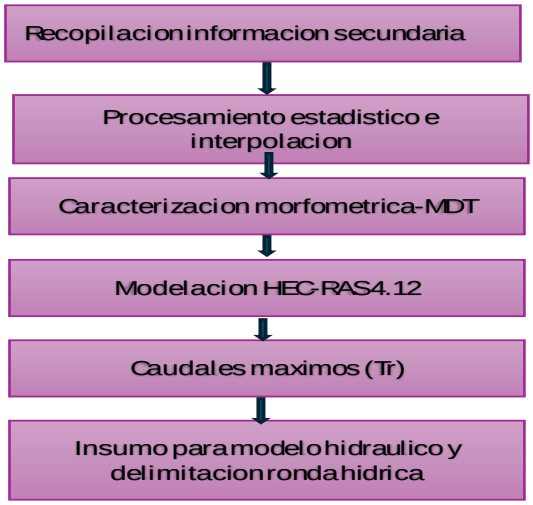
2.2. Objetivos Específicos

Dentro de los objetivos específicos se destacan los siguientes:

- Recopilación y procesamiento de la información cartográfica y el Modelo Digital de Terreno (MDT) del área de estudio.
- Análisis de las series históricas hidroclimatológicas (precipitación, temperatura, evaporación, caudales, brillo solar y humedad relativa) mediante metodologías estadísticas de validación y completación.
- Determinación de los parámetros morfométricos y caracterización física de las subcuencas aportantes al cauce principal del río Ranchería.
- Construcción de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y generación de hietogramas de diseño.
- configuración, calibración y validación del modelo hidrológico lluvia-escorrentía en el software HEC-HMS 4.12 para obtener los hidrogramas de crecientes en puntos estratégicos.

3. METODOLOGÍA Y RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN

El estudio implementó un esquema metodológico tradicional y consistente en ingeniería hidrológica, compuesto por las siguientes etapas consecutivas:



3.1. Modelo Digital de Terreno (MDT)

Se definieron los límites físicos de las cuencas utilizando herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) sobre un Modelo Digital de Terreno de alta resolución, permitiendo trazar la red de drenaje y realizar las subdivisiones de las subcuencas de manera precisa.

Este modelo sirvió para la estimación de pendientes, longitudes de canales y áreas de captación superficial.

Se consideró como modelo digital de elevación el suministrado a la consultoría, con un tamaño de píxel de 12.5 x 12.5 m, para toda la zona de estudio.

3.2. Estaciones Hidroclimatológicas Evaluada

La información climatológica se recopiló en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM; y está referida a los datos de los siguientes parámetros: precipitación total, precipitación máxima en 24 horas y temperatura media, humedad relativa, brillo solar y evaporación.

La base de datos hidroclimatológica cruda analizada consto de un total de 33 estaciones, dentro de las cuales 12 fueron Limnigraficas LG y 21 Limnimetricas LM. Los datos reportados presentaban vacíos y desalineaciones naturales debido a las condiciones operativas de las estaciones en la región. El consultor ejecutó la siguiente secuencia metodológica:

1. Selección del Periodo de Registro: Se priorizaron las estaciones con ventanas temporales robustas y comunes (buscando series superiores a 30 años) para absorber los efectos de ciclos macroclimáticos como el fenómeno ENSO (El Niño y La Niña).
2. Complementación de Datos Faltantes: Implementación de correlaciones lineales y del método de la razón normalizada con estaciones vecinas que presentaban altos coeficientes de correlación (R^2).
3. Análisis de Consistencia (Dobles Masas): Se contrastó el comportamiento acumulado de cada estación contra el comportamiento acumulado del promedio del grupo regional. Esto permitió detectar quiebres en la pendiente de las curvas, corrigiendo los registros afectados por cambios en el entorno de la estación o errores sistemáticos de lectura.
4. Análisis de Homogeneidad y Datos Atípicos: Aplicación de pruebas estadísticas para identificar valores extremos que no pertenecen a la población de la muestra (altos y bajos), garantizando que los eventos atípicos no sesgaran la predicción de crecientes extremas.

4. ESTUDIO CLIMATOLÓGICO Y CARACTERIZACIÓN VARIABLE

El régimen climático en la cuenca del río Ranchería está fuertemente influenciado por el desplazamiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) y las barreras orográficas de la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía del Perijá.

4.1. Régimen de Precipitación

La cuenca se rige principalmente por un comportamiento bimodal, con dos periodos lluviosos marcados (mayo-junio y septiembre-noviembre) interconectados por periodos secos o de bajas precipitaciones (diciembre-abril y un descenso relativo en julio-agosto denominado "veranillo"). Las mayores intensidades y volúmenes se concentran en las laderas orográficas de la Sierra Nevada de Santa Marta, disminuyendo críticamente a medida que el río avanza hacia la planicie semiárida de la baja Guajira y su desembocadura en Riohacha.

El análisis temporal analizó detalladamente hietogramas históricos anuales. Se generaron las curvas IDF mediante funciones de distribución probabilísticas de valores extremos (Gumbel,

Log-Pearson Tipo III, e Inversa Gaussiana), evaluadas mediante la prueba de bondad de ajuste de Chi-Cuadrado.

4.2. Temperatura y Brillo Solar: Se observa un gradiente térmico altitudinal evidente, con temperaturas muy elevadas en las zonas bajas cercanas a Riohacha y el curso medio (superiores a 28°C-30°C promedio) y climas templados a fríos en la cabecera alta. El brillo solar y la radiación son consistentemente altos, lo que potencia altas tasas de evaporación.

4.3. Humedad Relativa y Evaporación: La humedad relativa fluctúa marcadamente entre las temporadas secas y de lluvias, mientras que los valores de evaporación representan pérdidas críticas en el balance hídrico de la cuenca baja, caracterizada por condiciones semiáridas.

4.4. Evaporación. Dadas las altas temperaturas y el persistente brillo solar, las tasas de evaporación potencial son extremadamente altas en la cuenca baja, superando con creces los volúmenes de precipitación local en gran parte del año. Esto condiciona un balance hídrico deficitario en el suelo y genera que la escorrentía de los arroyos menores sea marcadamente estacional o efímera.

4.4. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). Para estimar las lluvias de diseño de corta duración (utilizadas para alimentar los hietogramas de tormenta en el modelo hidrológico), se analizaron los registros de lluvias máximas en 24 horas. Se evaluaron diferentes leyes de probabilidad:

- Distribución Gumbel (Tipo I de Valores Extremos).
- Distribución Log-Pearson Tipo III.
- Distribución Inversa Gaussiana.

Mediante la aplicación de la Prueba de Bondad de Ajuste de Chi-Cuadrado (chi^2), se seleccionó para cada subcuenca la distribución estadística que presentó el menor error residual y la mayor significancia teórica. Con ello, se estructuró numéricamente la familia de curvas IDF que relacionan la intensidad del aguacero con la duración de la tormenta y el periodo de retorno esperado.

5. CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA E HIDROGRÁFICA

5.1. Morfometría de la cuenca: La respuesta hidrológica de la cuenca (la velocidad y la magnitud con la que el agua de lluvia se convierte en un caudal en el río) depende intrínsecamente de sus propiedades físicas superficiales. El estudio subdividió la cuenca del río Ranchería en múltiples unidades de análisis que corresponden a los principales arroyos colectores y a tramos específicos del cauce principal.

Para cada una se calcularon parámetros clave como el Área, Perímetro, Longitud del cauce principal, Pendiente media del cauce, Coeficiente de Compacidad o Gravelius , Coeficiente de Forma, Índice de Alargamiento e Índice Asimétrico, los cuales denotan una tendencia estructural homogénea.

A modo de síntesis técnica, el comportamiento de algunas de las cuencas analizadas se describe en las tablas de parámetros del informe:

Forma de las Cuencas: La mayoría de los arroyos aportantes de la parte media y baja (como el Arroyo Tabaco, Arroyo Tirajoncito/Bruno, Arroyo Trupio Gacho, Brazo Jojomahana, etc.) registran coeficientes de compacidad superiores a 1.25 y coeficientes de forma bajos (0.21 a 0.58). Esto las clasifica morfológicamente como cuencas alargadas.

Implicación Hidrológica: Las cuencas alargadas presentan una baja susceptibilidad a avenidas torrenciales simultáneas. Al tener tiempos de concentración mayores, los picos de las crecientes tardan más en encontrarse en el cauce principal, lo que amortigua el impacto inmediato en comparación con las cuencas de forma circular.

Tiempos de Concentración (Tc): Calculados mediante ecuaciones empíricas validadas para la región. Los resultados muestran una gran variabilidad: arroyos cortos de zonas escarpadas muestran tiempos de concentración menores a 1.0 hora (ej. Arroyo Guasimito), mientras que los grandes colectores o tramos extensos y planos del plano deltaico presentan tiempos muy prolongados, como la Quebrada de Moreno o tramos bajos del Río Ranchería.

Interpretación e Implicación Hidrológica: Desde la perspectiva de la ingeniería hidráulica de ríos, una cuenca clasificada como alargada posee una baja susceptibilidad a presentar avenidas torrenciales simultáneas o picos de crecientes violentos y concentrados. Al tener una configuración estrecha y elongada, las ondas de escorrentía superficial generadas en las partes altas de la subcuenca tardan tiempos diferenciados en viajar hasta la sección de salida o confluencia, provocando un hidrograma de respuesta plano y distribuido en el tiempo. Esto contrasta con las cuencas de morfología circular, donde los tiempos de viaje desde cualquier punto de la periferia hacia el centro coinciden, generando picos de inundación críticos y repentinos.

5.2. Tiempos de Concentración (Tc): El tiempo de concentración representa el lapso requerido para que una gota de agua caída en el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca alcance la sección de salida bajo análisis. Los valores seleccionados y calculados en el estudio evidencian dos realidades contrastantes dentro del mismo sistema hidrográfico:

- Subcuencas de Respuesta Rápida (Zonas Escarpadas): Arroyos de menor longitud y con pendientes más pronunciadas exhiben tiempos de concentración muy cortos. Por ejemplo, el Arroyo Guasimito registra un Tc = 0.90 horas y el Arroyo Hondo un Tc = 1.26 horas. Estas subcuencas demandan especial atención debido a que reaccionan con rapidez ante aguaceros intensos locales.

- Sistemas de Respuesta Lenta (Planicies y Grandes Colectores): Aquellas subcuencas que drenan áreas extensas de la planicie aluvial o tramos llanos muestran tiempos de concentración prolongados. Ejemplos de esto son el Arroyo La Quebrada Tc = 24.17 horas, el Brazo Jojomahana (Tc = 19.77 horas y la Quebrada de Moreno Tc = 29.86 horas.

- Tramos del Río Principal: En el eje principal del río Ranchería, los tiempos de concentración acumulados van incrementándose conforme se desciende en el perfil longitudinal, alcanzando valores de Tc = 16.85 horas en el tramo Nacimiento-El Cercado, Tc = 28.98 horas en el tramo Cuestecita-Aremasahin, y estabilizándose en Tc = 21.18 horas en el tramo final Aremasahin-Desembocadura.

6. MODELACIÓN HIDROLÓGICA (HEC-HMS)

El núcleo del análisis de ingeniería consistió en la simulación escorrentía-lluvia mediante el programa HEC-HMS.

La fase central del estudio consistió en la simulación matemática del proceso de transformación de lluvia en escorrentía superficial a través de la plataforma computacional HEC-HMS 4.12 (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling)

6.1. Estructuración Teórica del Modelo

El modelo se configuró acoplando los siguientes métodos hidrológicos estandarizados:

- Método de Pérdidas (Infiltración): Permite calcular la precipitación efectiva (aquella porción de la lluvia que realmente rueda por el terreno tras descontar las pérdidas por intercepción vegetal, almacenamiento en depresiones e infiltración profunda en el suelo).
- Método de Transformación (Escorrentía Superficial): Basado en principios de Hidrogramas Unitarios Sintéticos, convirtiendo el bloque de lluvia efectiva en un hidrograma continuo de caudal contra tiempo (Q vs. t).
- Método de Tránsito en Cauces: Utilizado para simular la propagación y amortiguamiento de la onda de avenida a medida que avanza aguas abajo a través de los kilómetros de canales naturales y cauces artificiales, considerando la resistencia hidráulica del río.

6.2. Incorporación del Embalse El Cercado (Proyecto Ranchería)

Un aspecto metodológico crítico e indispensable en esta modelación fue la inclusión del Embalse El Cercado, ubicado en la parte alta de la cuenca. Esta megaestructura de regulación altera significativamente el régimen hidrológico natural del río Ranchería aguas abajo.

El modelo HEC-HMS incorporó las curvas de característica física del embalse (Cota-Área-Volumen), así como las reglas de operación y las dimensiones de sus estructuras de descarga (vertedero de rebose libre y estructuras de fondo). El embalse actúa absorbiendo los volúmenes de las crecientes provenientes de la cabecera de la Sierra Nevada de Santa Marta, almacenando temporalmente el agua y laminando (reduciendo) notablemente el caudal pico que continúa hacia la cuenca media y baja.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CAUDALES MÁXIMOS

Los caudales máximos instantáneos (Qmáx.) obtenidos a través de la calibración y ejecución del modelo HEC-HMS constituyen el resultado técnico de mayor valor para el proyecto de ordenamiento de la ronda hídrica.

El modelo arrojó los caudales máximos de inundación (Qmáx) expresados en m3/s. para periodos de retorno de 2, 3, 5, 15, 25, 50 y 100 años

Análisis Crítico de Tramos y Secciones Especiales (Baja Cuenca): El Consultor complementó los datos numéricos con inspecciones de control geomorfológico en campo, identificando zonas de alta complejidad hidráulica en el tramo terminal del río:

- Sección de Control Técnico 6 (Entre Desembocadura Arroyo Chíkep y Quebrada de Moreno): Se constató que el cauce principal en esta zona presenta un encajonamiento moderado, con bermas o bancas laterales que exhiben una diferencia promedio de 2.5 metros entre el espejo de agua ordinario y el borde superior de la orilla. El lecho fluvial está constituido por potentes mantos de sedimentos finos y el agua transporta una alta carga de sólidos en suspensión. Los testimonios recogidos de la población ribereña y las evidencias físicas confirman que, durante las crecientes asociadas a periodos de retorno altos (Tr 25 años}, el río experimenta un desbordamiento lateral franco. El agua inunda las llanuras adyacentes y activa una red de vaguadas o pequeños zanjones naturales de gran longitud que desvían los excedentes de caudal con dirección norte hacia el plano deltaico, funcionando como canales de alivio natural.

- Sección de Control Técnico 7 (Desde Quebrada de Moreno hasta la Desembocadura en el Mar Caribe): Esta sección corresponde propiamente al plano deltaico y estuarino del río Ranchería. Aquí la dinámica de inundación deja de ser puramente fluvial y pasa a convertirse en un fenómeno mixto o de transición. El flujo es controlado por la presencia de una barra longitudinal de arena (canal de barra) en la interfaz con el mar Caribe, la cual actúa como una presa natural intermitente. El plano deltaico es topográficamente plano y propenso a anegamientos cíclicos sincronizados con las mareas y la pleamar. Durante los eventos de tormenta máxima, los canales secundarios y de evacuación de inundaciones se activan simultáneamente, expandiendo la mancha de inundación sobre áreas considerables, lo que ensancha físicamente la necesidad de protección bajo la figura de Ronda Hídrica.

8. CONCLUSIONES

1. Estudio solido de los Caudales de Diseño: La metodología implementada, que integró la depuración estadística de las series del IDEAM, la caracterización espacial mediante SIG y la simulación hidrológica mediante el programa HEC-HMS 4.12 dota al estudio de un alto grado de certeza técnica. Los caudales máximos calculados para los diferentes periodos de diseño analizados representan de manera confiable la respuesta física de la cuenca ante eventos climáticos extremos.

2. Atenuación Morfológica Estructural: Los análisis morfométricos revelan de manera sistemática que la gran mayoría de las subcuencas de la cuenca media y baja presentan una geometría alargada (bajos coeficientes de forma e índices de compacidad altos). Esta condición física representa una ventaja adaptativa natural frente al riesgo de desastres, debido a que incrementa los tiempos de viaje de las ondas de escorrentía superficial y evita la superposición simultánea de caudales pico, generando hidrogramas de avenida más atenuados en el eje principal del río Ranchería, aunque tramos con bajos tiempos de concentración en la parte alta exigen alertas tempranas específicas.

3. Vulnerabilidad Extrema en el Plano Deltaico (Secciones 6 y 7): Las planicies aluviales inferiores adyacentes a Riohacha representan los puntos de mayor riesgo de inundación y desbordamiento lateral. La combinación de pendientes longitudinales casi nulas, la presencia física de la barra costera arenosa que genera un efecto de remanso hidráulico y la reactivación de antiguas vaguadas naturales propician que aguaceros con periodos de retorno severos (Tr = 50 y 100 años inunden extensas zonas del plano deltaico.

4. Efecto de Laminación de Crecientes del Embalse El Cercado: La modelación matemática demostró que el embalse ejerce una función protectora y de amortiguamiento crítico en la cuenca alta, reduciendo notablemente los picos de caudal aguas abajo de la presa. No obstante, esta capacidad de regulación se va disipando de forma progresiva a lo largo del curso medio debido al aporte incremental y sin control antrópico de afluentes mayores como el río Cerrejón, el río Palomino y el complejo de arroyos marginales de la llanura.

9. RECOMENDACIONES

1. Vinculación Directa al Modelo Hidráulico Bidimensional de los caudales máximos obtenidos para los escenarios en un software de simulación hidráulica (como HEC-RAS) para delimitar con exactitud cartográfica la mancha de inundación física, base de la línea de Ronda Hídrica.

2. Monitoreo Batimétrico y Dinámica de la Barra en la Desembocadura: Es indispensable establecer un programa de monitoreo topográfico y batimétrico periódico en la Sección 7 (Desembocadura en el mar Caribe). Dado que la barra de arena longitudinal controla el nivel del agua por contrapresión, cualquier sobre elevamiento o sedimentación excesiva en la barra puede generar inundaciones severas aguas arriba en el casco urbano de Riohacha y comunidades indígenas costeras, incluso con caudales fluviales moderados.

3. Estrategias de Manejo Ambiental y Alertas Tempranas (PMA): Diseñar estrategias de restauración ecológica integrando la siembra de vegetación nativa de ribera (ronda forestal) en las márgenes identificadas con bancos socavados (Sección 6) para incrementar la rugosidad hidráulica natural y mitigar la erosión lateral. disminuyendo las velocidades del flujo desbordado, mitigará la erosión de las bancas de 2.5 metros de altura y estabilizará los márgenes del río de forma sostenible.

4. Actualización Continua del Modelo frente al Cambio Climático: Se recomienda actualizar las curvas IDF cada 5 o 10 años incorporando los factores de cambio climático proyectados por el IDEAM, asegurando que las obras de protección e infraestructura vial marginal no queden subdimensionadas ante incrementos en las intensidades de tormentas.

5. Integración de la Ronda Hídrica en los Instrumentos de Ordenamiento Territorial: Una vez formalizado el límite físico derivado de este estudio, CORPOGUAJIRA debe gestionar su incorporación vinculante en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT), Planes de Ordenamiento Básico (PBOT) y Esquemas de Ordenamiento Territorial (EOT) de los municipios de la cuenca (Riohacha, Albania, Barrancas, Fonseca, San Juan del Cesar, entre otros). Esto garantizará la restricción legal de asentamientos humanos permanentes e infraestructura crítica dentro de la zona de amenaza por inundación, protegiendo la vida humana y preservando la función amortiguadora del ecosistema lótico.

Se da aprobación al documento presentado, teniendo en cuenta que el consultor debe incluir dentro del estudio general las recomendaciones dadas por la firma interventora en los cinco puntos descritos anteriormente en el aparte de las recomendaciones.

ORLANDO OLIVEROS URIETA
ING. CIVIL Msc. Ingeniería Sanitaria.
Ms. Evaluación impactos ambientales
T.P. 25202-11022 C/CA