

TESIS DE PREGRADO

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA
DE UNA RED DE DRENAJE URBANO. APLICADO AL CASO DE ESTUDIO:
CIUDAD GUABINAS YUMBO, VALLE.**

Vittorio Doglioni Velez

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
PREGRADO EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2020**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por todo el apoyo en el recorrido de la carrera y el proyecto, a Gustavo Barrientos y Geinner Martínez por brindarme su conocimiento y asesoría, a Juan G. Saldarriaga por su tiempo y sobre todo por lograr llevar a cabo el acompañamiento del proyecto en tiempos de pandemia.



TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introducción..... | 1 |
| 1.1 | Objetivos | 2 |
| 1.1.1 | Objetivo General..... | 2 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos..... | 2 |
| 2 | Marco teórico | 3 |
| 2.1 | EPA SWMM Runoff..... | 3 |
| 2.1.1 | Proceso de simulación..... | 4 |
| 2.1.2 | Precipitación..... | 5 |
| 2.1.3 | Modelación de subcuencas | 5 |
| 2.2 | Métodos de infiltración | 6 |
| 2.2.1 | SCS (Soil Conservation Service)..... | 6 |
| 2.2.2 | Green and Ampt | 8 |
| 3 | Metodología..... | 10 |
| 3.1 | Preparación del modelo..... | 10 |
| 3.1.1 | Definición del caso de estudio..... | 10 |
| 3.1.2 | Entrevistas | 12 |
| 3.1.3 | Información de partida | 12 |
| 3.2 | Modelación | 13 |
| 3.2.1 | Trazado de la red | 13 |
| 3.2.2 | Trazado de subcuencas | 16 |
| 3.3 | Parametrización y casos de análisis..... | 17 |
| 3.3.1 | Parámetros requeridos | 17 |
| 3.3.2 | Planteamiento de casos de análisis | 20 |
| 3.3.3 | Casos de análisis | 26 |
| 3.3.4 | Metodología de implementación | 27 |
| 4 | Resultados | 28 |



| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | Resultados de volumen total captado | 28 |
| 4.1.1 | Factor de pendiente vs Volumen (Método Green and Ampt)..... | 28 |
| 4.1.2 | Impermeabilidad vs Volumen (Método Green and Ampt) | 30 |
| 4.1.3 | Humedad vs Volumen (Método Green and Ampt)..... | 32 |
| 4.1.4 | Factor de pendiente vs Volumen (Método SCS)..... | 34 |
| 4.1.5 | Impermeabilidad vs Volumen (Método SCS)..... | 36 |
| 4.1.6 | Número de curva vs Volumen (Método SCS) | 38 |
| 4.2 | Resultados hidrogramas y limnigramas | 40 |
| 4.2.1 | Limnigramas | 40 |
| 4.2.2 | Hidrogramas | 46 |
| 5 | Análisis de resultados..... | 53 |
| 5.1 | Análisis de volumen total captado | 53 |
| 5.2 | Análisis de hidrogramas y limnigramas | 54 |
| 6 | Conclusiones | 56 |
| 7 | Referencias | 57 |
| 8 | Anexos | 58 |
| 8.1 | Anexo A. Diseño tubería de salida laguna de regulación..... | 58 |
| 8.2 | Anexo B. Perfiles característicos del modelo..... | 61 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Ilustración 1. Diagrama de flujo general del modelo EPASWMM Run off | 3 |
| Ilustración 2. Diagrama de bloque de la transición de estados de SWMM..... | 4 |
| Ilustración 3. Diagrama de modelo de almacenamiento no lineal. | 5 |
| Ilustración 4. Triangulo textural USDA..... | 9 |
| Ilustración 5. Descripción estadística de la conductividad hidráulica saturada. | 9 |
| Ilustración 6. Imagen del urbanismo de la etapa Málaga. | 11 |
| Ilustración 7. Planta del urbanismo y trazado de tendencia original del flujo. | 11 |
| Ilustración 8. Planta de la zona de estudio con curvas cada nivel 5m y 0.5m. | 13 |
| Ilustración 9. Sección representativa del plano de tuberías AUTOCAD. | 14 |
| Ilustración 10. Listado de tuberías y sus propiedades. | 15 |
| Ilustración 11. Trazado de la red de drenaje..... | 16 |
| Ilustración 12. Trazado de subcuencas de la zona de estudio..... | 17 |
| Ilustración 13. Tramo de la red y trazado de subcuencas del punto A. | 23 |
| Ilustración 14. Tramo de la red y trazado de subcuencas del punto B. | 25 |
| Ilustración 15. Tramo de la red y trazado de subcuencas del punto C. | 26 |



ÍNDICE DE GRÁFICAS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1. Lluvia de diseño para un periodo de retorno de 10 años..... | 18 |
| Gráfico 2. Punto A. Factor de pendiente vs Volumen (Método Green and Ampt)..... | 28 |
| Gráfico 3. Punto B. Factor de pendiente vs Volumen (Método Green and Ampt)..... | 29 |
| Gráfico 4. Punto C. Factor de pendiente vs Volumen (Método Green and Ampt)..... | 29 |
| Gráfico 5. Punto A. Impermeabilidad vs Volumen (Método Green and Ampt)..... | 30 |
| Gráfico 6. Punto B. Impermeabilidad vs Volumen (Método Green and Ampt)..... | 31 |
| Gráfico 7. Punto C. Impermeabilidad vs Volumen (Método Green and Ampt)..... | 31 |
| Gráfico 8. Punto A. Humedad vs Volumen (Método Green and Ampt)..... | 32 |
| Gráfico 9. Punto B. Humedad vs Volumen (Método Green and Ampt)..... | 33 |
| Gráfico 10. Punto C. Humedad vs Volumen (Método Green and Ampt)..... | 33 |
| Gráfico 11. Punto A. Humedad vs Volumen (Método Green and Ampt)..... | 34 |
| Gráfico 12. Punto B. Factor de pendiente vs Volumen (Método SCS)..... | 35 |
| Gráfico 13. Punto C. Factor de pendiente vs Volumen (Método SCS)..... | 35 |
| Gráfico 14. Punto A. Impermeabilidad vs Volumen (Método SCS)..... | 36 |
| Gráfico 15. Punto B. Impermeabilidad vs Volumen (Método SCS)..... | 37 |
| Gráfico 16. Punto C. Impermeabilidad vs Volumen (Método SCS)..... | 37 |
| Gráfico 17. Punto A. Número de curva vs Volumen (Método SCS)..... | 38 |
| Gráfico 18. Punto B. Número de curva vs Volumen (Método SCS)..... | 39 |
| Gráfico 19. Punto C. Número de curva vs Volumen (Método SCS)..... | 39 |
| Gráfico 20. Punto A. Limnigrama de impermeabilidad variable..... | 40 |
| Gráfico 21. Punto B. Limnigrama de impermeabilidad variable..... | 41 |
| Gráfico 22. Punto C. Limnigrama de impermeabilidad variable..... | 41 |
| Gráfico 23. Punto A. Limnigrama de factor de pendiente variable..... | 42 |
| Gráfico 24. Punto B. Limnigrama de factor de pendiente variable..... | 42 |
| Gráfico 25. Punto C. Limnigrama de factor de pendiente variable..... | 43 |
| Gráfico 26. Punto A. Limnigrama de número de curva variable..... | 43 |
| Gráfico 27. Punto B. Limnigrama de número de curva variable..... | 44 |
| Gráfico 28. Punto C. Limnigrama de número de curva variable..... | 44 |



| | |
|--|----|
| Gráfico 29. Punto A. Limnigrama de porcentaje de humedad variable..... | 45 |
| Gráfico 30. Punto B. Limnigrama de porcentaje de humedad variable..... | 45 |
| Gráfico 31. Punto C. Limnigrama de porcentaje de humedad variable..... | 46 |
| Gráfico 32. Punto A. Hidrograma de impermeabilidad variable..... | 46 |
| Gráfico 33. Punto B. Hidrograma de impermeabilidad variable..... | 47 |
| Gráfico 34. Punto C. Hidrograma de impermeabilidad variable..... | 47 |
| Gráfico 35. Punto A. Hidrograma de factor de pendiente variable..... | 48 |
| Gráfico 36. Punto B. Hidrograma de factor de pendiente variable..... | 48 |
| Gráfico 37. Punto C. Hidrograma de factor de pendiente variable..... | 49 |
| Gráfico 38. Punto A. Hidrograma de número de curva variable..... | 49 |
| Gráfico 39. Punto B. Hidrograma de número de curva variable..... | 50 |
| Gráfico 40. Punto C. Hidrograma de número de curva variable..... | 50 |
| Gráfico 41. Punto A. Hidrograma de porcentaje de humedad variable..... | 51 |
| Gráfico 42. Punto B. Hidrograma de porcentaje de humedad variable..... | 51 |
| Gráfico 43. Punto C. Hidrograma de porcentaje de humedad variable..... | 52 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Listado de variables requeridas para la implementación. | 20 |
| Tabla 2. Listado de variables hidrológicas implementadas en el diseño original. | 21 |
| Tabla 3. Propiedades de subcuencas del punto A. | 23 |
| Tabla 4. Propiedades de subcuencas del punto B. | 24 |
| Tabla 5. Propiedades de subcuencas del punto C. | 25 |
| Tabla 6. Combinación de parámetros para el método de infiltración SCS. | 27 |
| Tabla 7. Combinación de parámetros para el método de infiltración Green and Ampt. | 27 |
| Tabla 8. Leyenda de interpretación Factor de pendiente vs Volumen. | 28 |
| Tabla 9. Leyenda de interpretación Impermeabilidad vs Volumen. | 30 |
| Tabla 10. Leyenda de interpretación Humedad vs Volumen. | 32 |
| Tabla 11. Leyenda de interpretación Factor de pendiente vs Volumen. | 34 |
| Tabla 12. Leyenda de interpretación Impermeabilidad vs Volumen. | 36 |
| Tabla 13. Leyenda de interpretación Número de curva vs Volumen. | 38 |
| Tabla 14. Relación de dispersión de volumen entre parámetros. | 53 |



ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|---|----|
| Ecuación 1. Vector de estado de las variables. Método EPA SWMM Runoff..... | 4 |
| Ecuación 2. Vector de salida de las variables. Método EPA SWMM Runoff. | 4 |
| Ecuación 3. Ecuación de Manning..... | 6 |
| Ecuación 4. Caudal de salida. Método SCS. | 6 |
| Ecuación 5. Abstracción inicial. Método SCS. | 7 |
| Ecuación 6. Simplificación caudal de salida. Método SCS. | 7 |
| Ecuación 7. Máxima retención potencial. Método SCS. | 7 |
| Ecuación 8. Tasa de infiltración. Método Green and Ampt. | 8 |
| Ecuación 9. Modelo lluvia-escorrentía. Método EPA SWMM Runoff. | 17 |
| Ecuación 10. Caudal de entrada a cámara. Método EPA SWMM Runoff..... | 18 |
| Ecuación 11. Profundidad total de lluvia a cada subcuenca. Método EPA SWMM Runoff. | 18 |
| Ecuación 12. Profundidad total de lluvia infiltrada en cada subcuenca. Método EPA SWMM Runoff. | 18 |



1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo urbanístico de las ciudades demanda protección ante riesgos naturales, y por eso es fundamental prevenirse ante estos riesgos mediante la planeación, el diseño y la construcción de infraestructura que ayude a contener estos desastres. Los desastres naturales con mayor ocurrencia en Colombia corresponden a sismos, inundaciones, y deslizamientos, entre otros. Las diferentes ramas de la ingeniería al cabo de los años se han encargado de perfeccionar sus prácticas ante estos riesgos, permitiendo a la sociedad moderna densificar sus poblaciones y a su vez evitar las pérdidas de vidas, bienes e infraestructura.

El estudio de la hidráulica y la hidrología han contribuido enormemente al desarrollo de las civilizaciones, desde los canales que surcaron en la antigua Mesopotamia hasta redes de distribución y drenaje para ciudades con millones de habitantes. Al enfatizar en el desarrollo urbano la infraestructura hidráulica se centra en cuatro tipos: redes de distribución, redes de drenaje sanitario, redes de drenaje pluvial y estructuras de contención. Algunas redes de drenaje operan con el sistema combinado (sanitario y pluvial), sin embargo, esta práctica desfavorece el aprovechamiento de este recurso vital aguas abajo.

El diseño de las redes de drenaje pluvial implica una interacción directa entre la hidráulica y la hidrología, en la cual la hidrología estima la cantidad de agua que la hidráulica debe transportar hasta su sitio de disposición final sin permitir que la falla del sistema ocasione daños graves.

La aleatoriedad natural de la lluvia conlleva a que la hidrología tenga mucha incertidumbre en su estimación. El estudio de la probabilidad ha brindado un gran aporte y gracias a los modelos probabilísticos se estiman las lluvias más críticas para el diseño.

Esta tesis se centra en evaluar algunos parámetros hidrológicos a partir de un análisis de sensibilidad, llevando sus valores a casos típicos y casos extremos a partir de la implementación del software SEWERGems y el método de lluvia-escorrentía EPASWMM Runoff. La implementación se lleva a cabo sobre la red de drenaje del proyecto ciudad Guabinas en Yumbo, Valle. Partiendo por la modelación geométrica de las tuberías, el trazado de las subcuencas y finalmente la parametrización y ejecución del modelo ante las diferentes parametrizaciones planteadas.



1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Evaluar las variaciones en la carga hídrica que recibe la red de drenaje de ciudad Guabinas ante cambios en la impermeabilidad, la topografía y los métodos de infiltración, a partir de la implementación del software SEWERGems y el método de lluvia-escorrentía EPASWMM Runoff.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Familiarizarse con la parametrización, modelación y ejecución de modelos en SEWERGems.
- Entrevistar al diseñador y modelador del proyecto.
- Modelar la red de tuberías del proyecto, trazar las subcuencas y agregar la conectividad de la red.
- Parametrizar y ejecutar el modelo ante los casos planteados de impermeabilidad, topografía y método de infiltración.
- Analizar las variaciones del volumen total captado por la red de subcuencas ante la lluvia de diseño en diferentes puntos de la red.
- Analizar los hidrogramas y Limnigramas de los puntos de salida de la red de subcuencas.



2 MARCO TEÓRICO

En el siguiente capítulo se presentan las definiciones de los métodos implementados en el desarrollo del proyecto.

2.1 EPA SWMM Runoff

El modelo de EPASWMM Runoff es un sistema de entrada y salida que incluye las pérdidas por infiltración y evaporación para simulaciones de tiempo prolongado. El diagrama de flujo del modelo que define las interacciones entre los diferentes puntos del proceso, el cual es definido por el manual de referencia para el manejo de aguas lluvia de la EPA (United States Environmental Protection Agency) (Rossman & Huber, 2016).

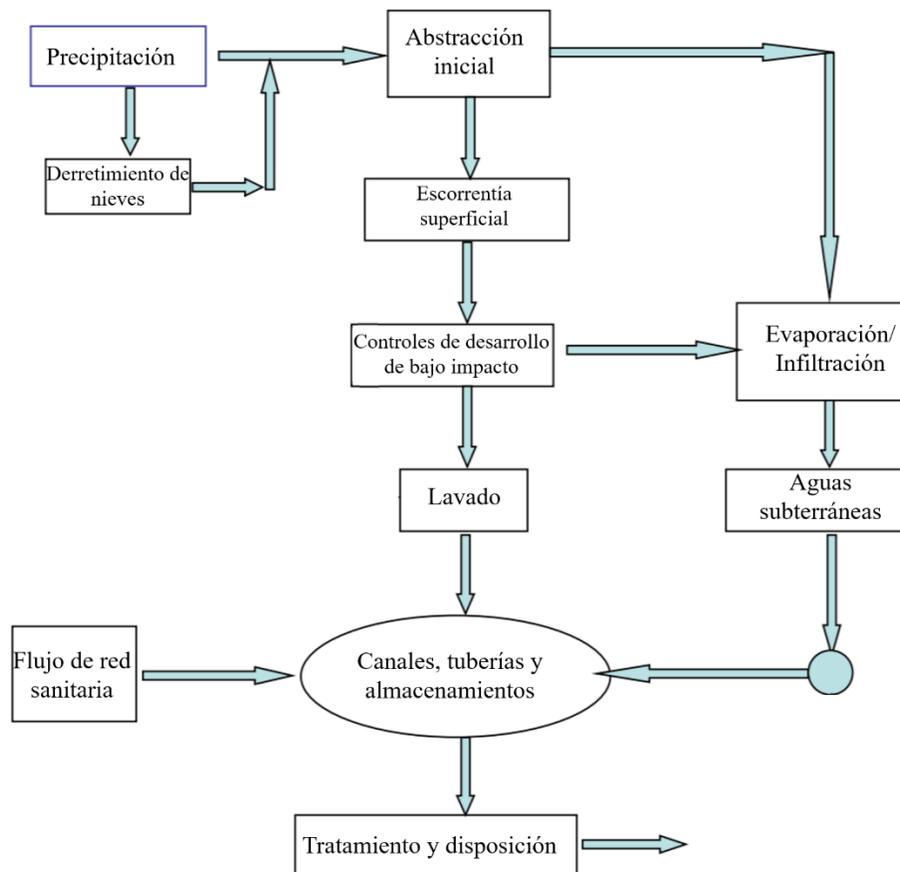


Ilustración 1. Diagrama de flujo general del modelo EPASWMM Run off



El modelo incluye los posibles puntos del sistema donde puede estar el agua, cabe resaltar que no todos los pasos del proceso son necesarios para su implementación algunos de ellos se pueden omitir dadas ciertas condiciones geográficas o del alcance del proyecto.

2.1.1 Proceso de simulación

El modelo de SWMM es un modelo de tiempo discreto distribuido. Se ejecuta a partir del estado de las variables en la secuencia de tiempo definida, cada paso de tiempo está sujeto a las condiciones iniciales definidas y el estado de las variables es actualizado a través de la ejecución del set de ecuaciones. (Rossman & Huber, 2016).

El proceso de simulación sigue la siguiente metodología expresada por el siguiente diagrama.

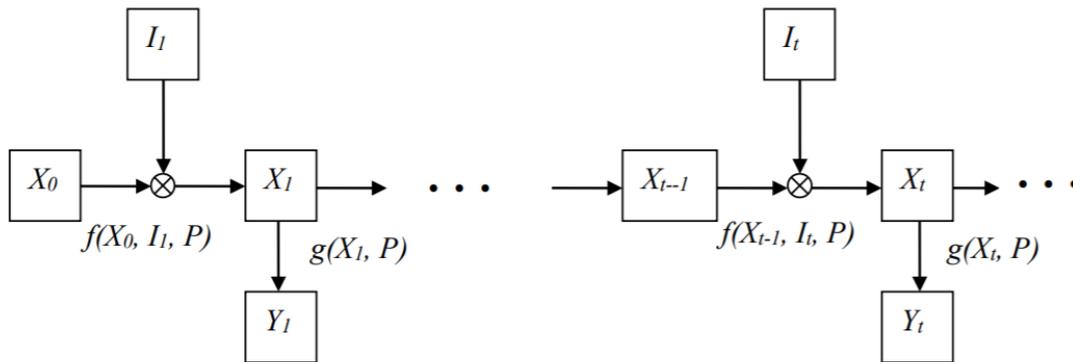


Ilustración 2. Diagrama de bloque de la transición de estados de SWMM.

Las ecuaciones que representan la transición de estados del modelo son:

$$X_t = f(X_{t-1}, I_T, P) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$Y_t = g(X_t, P) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

X_t = Vector de estado de las variables en el tiempo t .

Y_t = Vector de salida de las variables en el tiempo t .

I_T = Vector de variables de entrada en el tiempo t .

P = Vector de parametros constantes

f = Función de transición de estado con valores vectoriales.



g = Función de transformación de salida con valores vectoriales.

Las variables contenidas dentro del vector X_t hacen referencia a los procesos de escorrentía, infiltración, aguas subterráneas, enrutamiento de flujo, derretimiento de nieves y calidad de agua.

2.1.2 Precipitación

El modelo tiene la capacidad de interpretar diferentes tipos de información de lluvias, los tipos de información están relacionados con un tiempo entre pulsos, ese tiempo es el que determinará el paso de tiempo del modelo.

Uno de los tipos de información de precipitación y el cual se empleó para el desarrollo de este proyecto es el hietograma de lluvia, el cual representa las intensidades de lluvia dado un intervalo de tiempo constante durante la duración del evento de precipitación.

2.1.3 Modelación de subcuencas

La modelación de las subcuencas es la que define la totalidad del fluido que entrará al sistema de drenaje, es basada en un modelo de almacenamiento no lineal. El diagrama presentado a continuación define las interacciones del sistema. (Rossman & Huber, 2016).

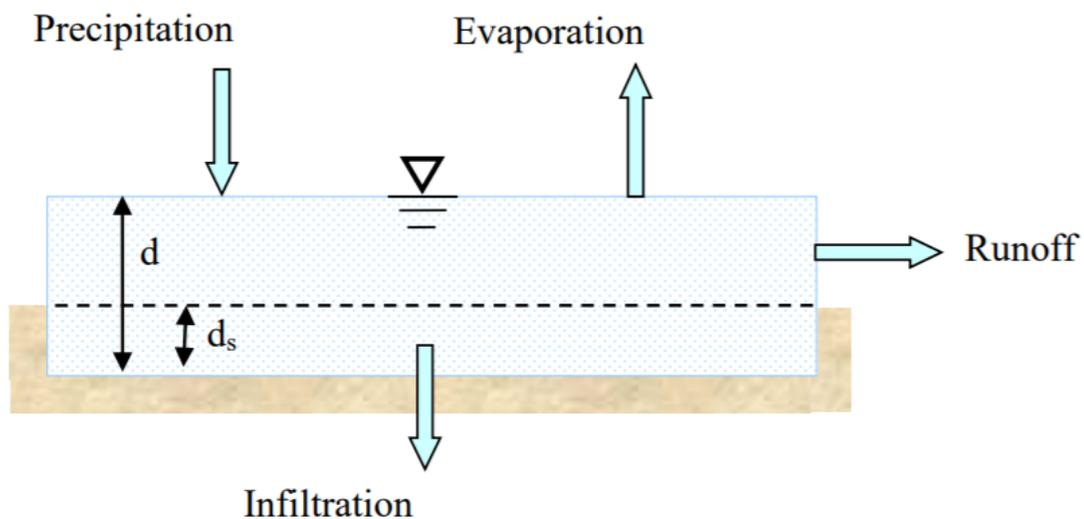


Ilustración 3. Diagrama de modelo de almacenamiento no lineal.

En este modelo la subcuenca experimenta entrada de fluido por precipitación y/o derretimiento de nieves, dos salidas definidas por las tasas de infiltración y evaporación y finalmente el resultado de escorrentía obtenido por la diferencia neta de las entradas y salidas del sistema. En el esquema



la altura d corresponde al total de fluido que entra al sistema, la altura d_s corresponde al total del fluido que se infiltra en el suelo.

El modelo asume que todo el flujo a través de la subcuenca ocurre como flujo uniforme en un canal rectangular de ancho (W), profundidad ($d-d_s$) y con una pendiente (S). El flujo es calculado a partir de la ecuación de Manning definida a continuación.

$$Q = \frac{1.49}{n} S^{1/2} R_x^{2/3} A_x \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

Q = Caudal total de salida de subcuenca (m³/s).

S = Pendiente característica del tramo las largo de la subcuenca (m/m).

R_x = Radio hidráulico de la sección representativa (m).

A_x = Área mojada de la sección representativa (m²).

Las variables de pendiente y ancho característico deben ser abstraídas de la topografía de la cuenca, las variables de área y radio hidráulico son calculadas en función de $d-d_s$.

2.2 Métodos de infiltración

2.2.1 SCS (Soil Conservation Service)

El método del Soil Conservation Service es un método desarrollado por la USDA (United States Department of Agriculture) a partir de información recolectada por más de una década, donde relacionan los tipos de suelo y condiciones de cobertura con un número de curva. El número de curva define una función que sobre los datos de lluvia determina que porción de agua se infiltra al suelo.

La ecuación que define el caudal de salida por el método del SCS se presenta a continuación.

$$Q = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a)+S} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

Q = Caudal de escorrentía (mm).

P = Precipitación (mm).

S = Máxima retención potencial después de iniciada la escorrentía.



I_a = Abstracción inicial.

La abstracción inicial corresponde a todas las pérdidas antes que inicie la escorrentía incluye las retenciones por depresiones en superficie, interceptación vegetal, evaporación e infiltración. La abstracción inicial es bastante variada y tiene una relación directa con las prácticas sobre el suelo y su tipología. El estudio desarrollado por la USDA encontró que para las parcelas donde se llevó a cabo la investigación existe una relación entre la abstracción inicial y la máxima retención potencial expresada por la siguiente ecuación. (Cronshey, McCuen, Miller, & Robbins, 1986)

$$I_a = 0.2S \quad \text{Ecuación 5}$$

Consecuente a esta simplificación la ecuación de escorrentía se simplifica a la siguiente.

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P-0.8S)} \quad \text{Ecuación 6}$$

La variable S está relacionada con el número de curva que a su vez se relaciona con las condiciones de suelo y cobertura como se menciona anteriormente. La ecuación que relaciona S con el número de curva se expresa a continuación.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad \text{Ecuación 7}$$

El SCS define la caracterización de los suelos mediante cuatro tipologías de suelos A, B, C, y D

A: suelos con bajo potencial de escorrentía y una tasa alta de infiltración incluso en condiciones de suelo saturado, suelo de textura típicamente arenosa y marga arenosa. Transmisiones mayores a 7.7 (mm/h)

B: suelos con tasa de infiltración moderada de texturas franco-limosas y marga. Transmisiones entre 3.8 y 7.7 (mm/h)

C: suelos con bajas tasas de infiltración en condiciones de saturación y moderadas en el proceso de saturación de textura franco arcillo arenosa. Transmisiones entre 1.3 y 3.8 (mm/h).

D: suelos de alto potencial de escorrentía con muy bajas tasas de infiltración en estado de saturación típicamente de textura arcillosas. Transmisiones entre 0 y 1.3 (mm/h).

El procedimiento para la selección de un número de curva inicia en determinar la cobertura del suelo que tendrá el proyecto en estudio, posteriormente se deben revisar las librerías del SCS donde tienen una asignación para cada uso cuatro números de curva diferentes en función del tipo de suelo. (Cronshey, McCuen, Miller, & Robbins, 1986)



2.2.2 Green and Ampt

El modelo de Green and Ampt es un modelo de infiltración físicamente basado el cual estima la infiltración a partir de las propiedades del suelo. El método exige la determinación de las propiedades del suelo y también se deben considerar sus variaciones en el espacio y tiempo. La ecuación que describe la tasa de infiltración de Green and Ampt se presenta a continuación. (Rawls, Brakensiek, & Miller, 1983).

$$f = K \left(1 + \frac{n\psi_f}{F} \right)$$

Ecuación 8

Donde:

f = Tasa de infiltración (cm/h)

K = Conductividad hidráulica (cm/hr)

n = Porosidad disponible (%)

ψ_f = Valor de succión capilar a lo largo del frente húmedo (cm)

F = Cantidad de infiltración (cm)

Para la implementación de este método se requiere la estimación de la conductividad hidráulica, porosidad efectiva y la succión capilar del frente húmedo.

La ecuación 8 es implementada a partir de su integración en los sets de ecuaciones de los modelos matemáticos y estima la infiltración dado un intervalo de tiempo establecido, ese intervalo generalmente esta determinado por la información de lluvia.

Diferentes autores han realizado estudios donde relacionan la conductividad hidráulica con la textura de los suelos definidas por el triángulo textural de la USDA. Los resultados de estos estudios pueden ser útiles para la implementación de este método. Entre estos estudios tenemos el de Carlos García donde él y otros autores realizan un análisis estadístico de muestras de suelo con textura homogénea obteniendo valores de conductividad para cada una de las muestras. (Gutiérrez, Pachepsky, & Martín, 2018)

A continuación, se presentan los resultados de este estudio y el triangulo textural de la USDA.



Ilustración 4. Triangulo textural USDA

| | N | Min. | 1st Q | Median | Mean | 3rdQ | Max. | SD | Skew | Kurtosis | SE |
|-----------------|--------|------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|----------|------|
| Sandy clay | 345 | 0.00 | 0.09 | 0.41 | 2.72 | 1.29 | 60.60 | 8.29 | 4.78 | 24.12 | 0.45 |
| Sandy clay loam | 2004 | 0.00 | 0.12 | 0.50 | 3.23 | 1.67 | 405.00 | 17.11 | 14.04 | 244.07 | 0.38 |
| Sandy loam | 2123 | 0.00 | 0.28 | 1.10 | 4.92 | 3.67 | 504.00 | 18.26 | 15.60 | 348.22 | 0.40 |
| Loamy sand | 1780 | 0.01 | 1.37 | 5.00 | 9.84 | 13.80 | 189.00 | 13.35 | 3.86 | 29.54 | 0.32 |
| Sand | 12 068 | 0.01 | 11.80 | 23.95 | 32.97 | 43.40 | 841.00 | 32.83 | 4.01 | 51.12 | 0.30 |
| Clay | 407 | 0.00 | 0.04 | 0.16 | 4.07 | 0.73 | 421.00 | 25.49 | 13.12 | 196.18 | 1.26 |
| Clay loam | 78 | 0.01 | 0.04 | 0.22 | 1.26 | 0.71 | 38.20 | 4.56 | 7.27 | 57.93 | 0.52 |
| Silty clay loam | 41 | 0.00 | 0.08 | 0.34 | 18.02 | 1.67 | 159.00 | 43.36 | 2.60 | 5.69 | 6.77 |
| Loam | 104 | 0.01 | 0.17 | 0.72 | 5.77 | 2.89 | 52.60 | 11.26 | 2.43 | 5.42 | 1.10 |
| Silty loam | 135 | 0.00 | 0.17 | 0.69 | 5.20 | 4.42 | 53.90 | 9.65 | 2.90 | 9.40 | 0.83 |
| Silt | 36 | 0.27 | 1.27 | 5.21 | 19.16 | 22.54 | 213.00 | 40.62 | 3.88 | 16.30 | 6.77 |

Ilustración 5. Descripción estadística de la conductividad hidráulica saturada.

Los valores de K están expresados en cm/h.



3 METODOLOGÍA

La metodología implementada para el desarrollo del análisis de sensibilidad tiene tres etapas. Primero, la preparación del modelo donde se realizan entrevistas, tutoriales y se gestiona toda la información disponible para la implementación del modelo. Segundo, la modelación a partir de la información obtenida, donde se describe su paso a paso y se definen los parámetros constantes. En tercer lugar, la parametrización y ejecución del modelo ante los casos de estudio que se plantean más adelante.

3.1 Preparación del modelo

El proyecto inicia con la voluntad de realizar un análisis de parámetros hidrológicos sobre una red de drenaje en desarrollo de construcción de un proyecto urbano. Con el fin de vivir la experiencia de interactuar en el ejercicio profesional del diseño de redes de drenaje y a su vez ejercer el ejercicio académico de análisis.

3.1.1 Definición del caso de estudio

En primera instancia, se llevó a cabo una reunión con el ingeniero hidráulico Gustavo Barrientos, donde se le solicitó formalmente información sobre un proyecto que estuviera llevando a cabo en el momento de subcuencas de diferentes tipologías. Finalizada la reunión, se determinó conjuntamente la selección de Ciudad Guabinas. Ciudad Guabinas es un proyecto de urbanización desarrollado por la constructora Jaramillo Mora en el cual el ingeniero Gustavo Barrientos y su equipo de trabajo fueron contratados para la consultoría del diseño de la red de drenaje pluvial. En consentimiento de la constructora responsable, fue entregada la información topográfica, pluvial y el trazado de la red con las propiedades definidas.

Ciudad Guabinas se sitúa en el sur del municipio de Yumbo, Valle. La totalidad del proyecto abarca un área de 120 Hectáreas, la implementación del proyecto se desarrolla en la etapa Málaga ya que es aquella que cuenta con la totalidad de la información requerida para la implementación del estudio.



Ilustración 6. Imagen del urbanismo de la etapa Málaga.

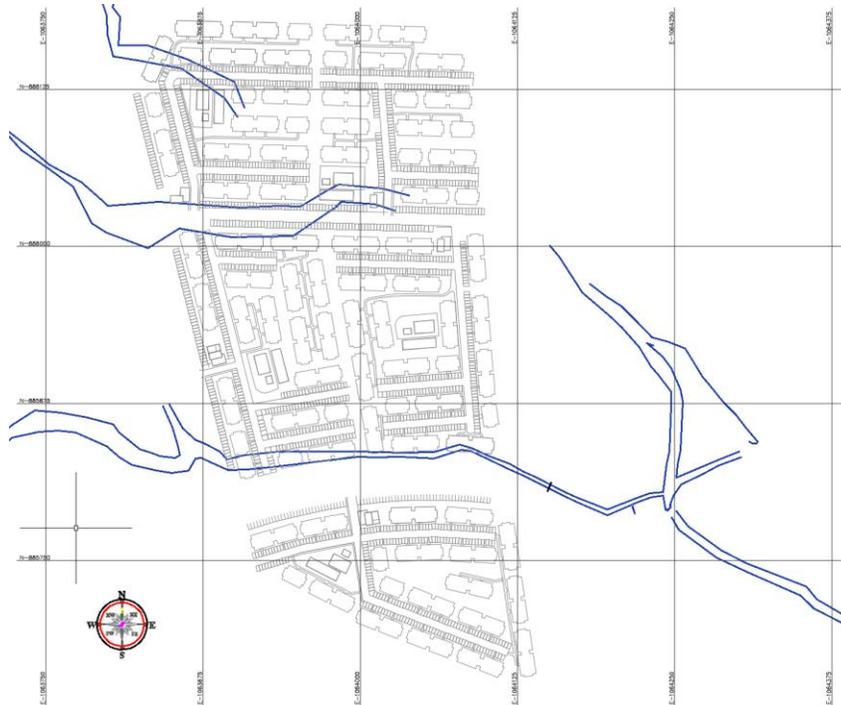


Ilustración 7. Planta del urbanismo y trazado de tendencia original del flujo.



3.1.2 Entrevistas

3.1.2.1 Geinner Martínez

Geinner Martínez es el ingeniero que desarrollo el primer modelo del proyecto, en la reunión expuso los criterios y los pasos que implemento para el modelo. El punto de partida es el trazado de tuberías con la localización de las cámaras, posteriormente se trazan los polígonos de las áreas tributarias a cada cámara. Existen varias técnicas en el trazado de áreas para este proyecto el implemento la técnica del trazado manual basándose en las curvas de nivel y en la rasante de las vías donde se ubican las cámaras. En la implementación del modelo empleó el software EPA-SWMM con su propio método de escorrentía y el método Green and Ampt. Por otra parte, mencionó los criterios de selección de parámetros donde para la impermeabilidad se basa en la normativa de ocupación máxima permitida y en los métodos de infiltración en estudios de suelo cercanos o propios del proyecto.

3.1.2.2 Gustavo Barrientos

Los primeros diseños para la aprobación del proyecto se realizaron hace mas de seis años atrás, en el transcurso del tiempo los arquitectos de la constructora realizaron cambios en el urbanismo, lo que implicó que se requería un ajuste en el diseño de la red en la nueva etapa. Dadas las circunstancias, se requería un modelo actualizado y es aquel modelo que se implementa en este proyecto. Durante la reunión se recibieron las instrucciones de como leer el plano para montar toda la geometría al software así mismo como los criterios de selección de parámetros de las tuberías.

Para la nueva red hacía falta por diseñar la tubería de salida de la laguna de regulación, semanas más tarde tuvimos una reunión donde se revisó el modelo y se empleó para el diseño de la tubería de salida de la red. (Anexo A)

3.1.3 Información de partida

Para efectuar la modelación se requiere de toda la información geométrica de la red, específicamente: diámetro, longitud y rugosidad de las tuberías; y la localización georreferenciada de las cámaras. Por otra parte, para la modelación y parametrización de las subcuencas se requiere la información topográfica del sector. A continuación, se presenta el plano de curvas de nivel de la etapa Málaga cuyas curvas primarias están espaciadas cada cinco metro y las secundarias cada 50 centímetros.

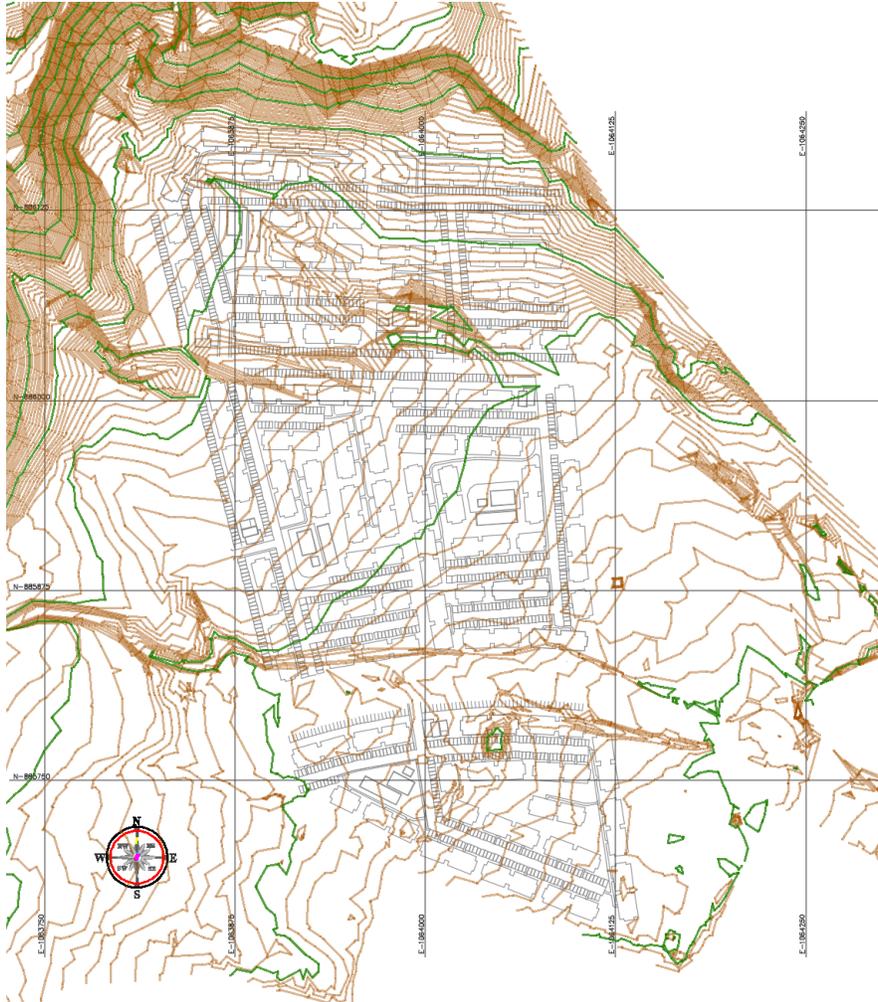


Ilustración 8. Planta de la zona de estudio con curvas cada nivel 5m y 0.5m.

3.2 Modelación

En la siguiente sección se presentará el paso a paso implementado para el proceso de modelación, desde el trazado de la red hasta la parametrización geométrica de las subcuencas.

3.2.1 Trazado de la red

El trazado de la red parte de la lectura del plano suministrado.

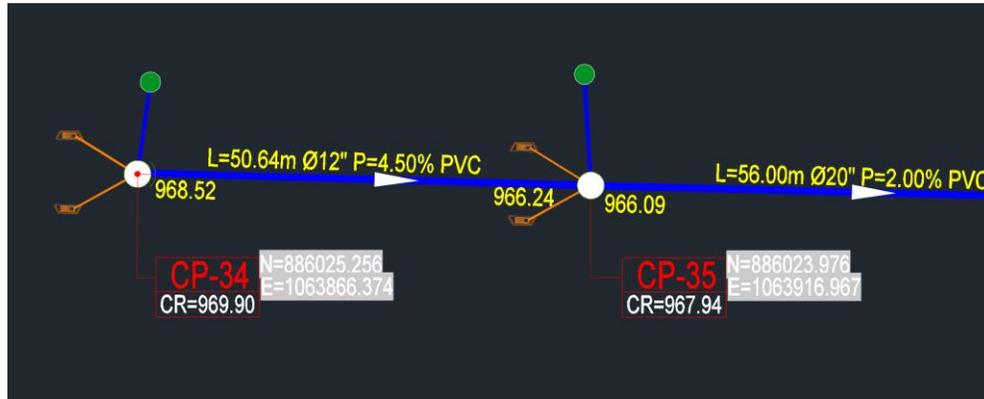


Ilustración 9. Sección representativa del plano de tuberías AUTOCAD.

A partir de la información representada en el plano se realiza la lectura de las propiedades geométricas de la red.

Donde:

L: Longitud de la tubería (m).

Θ : Diámetro de la tubería (pulgadas).

P: Pendiente de la tubería (%).

Adicionalmente, las siglas adyacentes al valor de la pendiente hacen referencia a la materialidad de la tubería, PVC o HR para aquellas tuberías de hormigón reforzado. Las cotas de batea de las tuberías se representan en las salidas y entradas de las cámaras. A cada cámara se le especifica su nomenclatura, cota rasante y georreferenciación como etiqueta. En conjunto a la lectura del plano, con ayuda del software Excel se listan todas las variables y así posteriormente introducir los valores en SEWERGems. Finalmente, se obtiene la tabla de tuberías con todas sus propiedades geométricas y de rugosidad representada a continuación. La tabla presentada es de carácter ilustrativo, no incluye todas las tuberías, el proyecto incluye 140 tuberías.



| | ID | Start Node | Invert (Start) (m) | Stop Node | Invert (Stop) (m) | Length (User Defined) (m) | Section Type | Diameter (mm) | Manning's n |
|----------------------|-----|------------|--------------------|-----------|-------------------|---------------------------|--------------|---------------|-------------|
| 83: CanalInterceptor | 83 | CP-FK | 976.00 | CP-04 | 972.65 | 212.1 | Box | | 0.013 |
| 85: CO-2 | 85 | CP-04 | 971.86 | CP-05 | 970.97 | 65.7 | Cirde | 450.0 | 0.009 |
| 86: CO-3 | 86 | CP-05 | 970.97 | CP-06 | 969.95 | 46.3 | Cirde | 450.0 | 0.009 |
| 87: CO-4 | 87 | CP-06 | 969.95 | CP-07 | 969.15 | 57.0 | Cirde | 450.0 | 0.009 |
| 88: CO-5 | 88 | CP-07 | 969.15 | CP-08 | 967.53 | 67.5 | Cirde | 450.0 | 0.009 |
| 89: CO-6 | 89 | CP-08 | 967.53 | CP-09 | 965.82 | 64.0 | Cirde | 500.0 | 0.009 |
| 90: CO-7 | 90 | CP-34 | 968.52 | CP-35 | 966.24 | 50.6 | Cirde | 300.0 | 0.009 |
| 91: CO-8 | 91 | CP-35 | 966.09 | CP-36 | 964.97 | 56.0 | Cirde | 500.0 | 0.009 |
| 92: CO-9 | 92 | CP-36 | 964.85 | CP-37 | 963.80 | 53.1 | Cirde | 600.0 | 0.009 |
| 93: CO-10 | 93 | CP-37 | 963.78 | CP-37A | 963.04 | 53.8 | Cirde | 600.0 | 0.009 |
| 94: CO-11 | 94 | CP-37A | 963.02 | CP-38 | 962.32 | 50.1 | Cirde | 600.0 | 0.009 |
| 95: CO-12 | 95 | CP-38 | 962.25 | CP-39 | 961.63 | 44.4 | Cirde | 675.0 | 0.009 |
| 96: CO-13 | 96 | CP-39 | 961.46 | CP-40 | 960.77 | 49.0 | Cirde | 675.0 | 0.009 |
| 97: CO-14 | 97 | CP-40 | 960.76 | CP-41 | 960.25 | 36.4 | Cirde | 675.0 | 0.009 |
| 98: CO-15 | 98 | CP-41 | 960.20 | CP-42 | 959.53 | 47.6 | Cirde | 675.0 | 0.009 |
| 99: CO-16 | 99 | CP-42 | 959.51 | CP-43 | 959.13 | 25.1 | Cirde | 675.0 | 0.009 |
| 103: CO-20 | 103 | CP-44A | 958.65 | CP-44 | 958.05 | 66.1 | Cirde | 327.0 | 0.009 |
| 104: CO-21 | 104 | CP-44 | 957.95 | CP-45 | 957.36 | 83.6 | Cirde | 450.0 | 0.009 |
| 127: CO-22 | 127 | CP-68 | 969.24 | CP-69 | 968.19 | 52.5 | Cirde | 900.0 | 0.013 |
| 128: CO-23 | 128 | CP-69 | 967.77 | CP-67 | 966.95 | 41.0 | Cirde | 900.0 | 0.013 |
| 129: CO-24 | 129 | CP-67 | 965.06 | CP-70 | 964.71 | 58.1 | Cirde | 1,400.0 | 0.013 |
| 130: CO-25 | 130 | CP-70 | 964.71 | C-71 | 964.47 | 44.5 | Cirde | 1,400.0 | 0.013 |
| 131: CO-26 | 131 | C-50 | 975.30 | C-51 | 972.90 | 79.8 | Cirde | 400.0 | 0.009 |
| 132: CO-27 | 132 | C-51 | 972.10 | C-52 | 969.62 | 81.5 | Cirde | 400.0 | 0.009 |
| 133: CO-28 | 133 | C-52 | 966.10 | CP-66 | 965.60 | 62.5 | Cirde | 1,200.0 | 0.013 |
| 134: CO-29 | 134 | CP-66 | 965.60 | CP-67 | 965.03 | 71.4 | Cirde | 1,200.0 | 0.013 |
| 135: CO-30 | 135 | C-21 | 971.00 | C-22 | 970.75 | 49.7 | Cirde | 600.0 | 0.009 |

Ilustración 10. Listado de tuberías y sus propiedades.

Una vez definidas las propiedades de cada una de las tuberías, y gracias a la georreferenciación de los nodos, se obtiene el trazado general de la red. Adicionalmente, se introducen hidrogramas con caudales a tubería llena para identificar como parámetro de entrada para verificar la conectividad del modelo e identificar los posibles puntos críticos. A continuación, se presenta el trazado obtenido en su representación por el programa SEWERGems. Por otra parte, se presenta en la sección de anexos algunos perfiles característicos de la red modelada. (Anexo B)

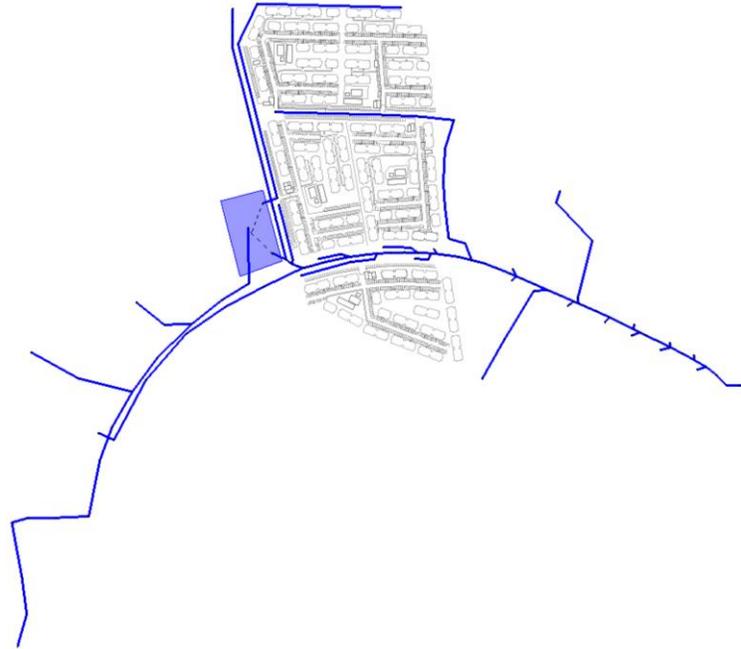


Ilustración 11. Trazado de la red de drenaje.

3.2.2 Trazado de subcuencas

Ahora bien, se cuenta con el montaje de la red de tuberías relacionada al punto de análisis el siguiente paso corresponde a el trazado de subcuencas. Si bien se menciona anteriormente, existen diferentes metodologías para el trazado de subcuencas, sin embargo, debido a que la información topográfica no es lo suficientemente robusta y la operación de la red se dará una vez realizadas las explanaciones de las parcelas por sugerencia Geinner Martínez se optó por el método de delineación manual. El método de delineación manual se lleva a cabo sobre el plano, plano que incluye la topografía, el trazado vial, la localización de las cámaras y la rasante de las vías. Primero, se trazan líneas conectando las cámaras indicando la dirección de menor pendiente de la rasante. Segundo, a cada costado de las vías entre cada cámara se comparan las cotas del terreno con la rasante de la vía, si la rasante tiene un valor menor ese costado de la vía corresponde a una subcuenca en caso contrario, el terreno adyacente o bien no pertenece al proyecto o drena a otra sección de la red de cotas más bajas. Tercero, se analiza la extensión de la subcuenca correspondiente a cada cámara, este procedimiento, se hace basándose en la observación de las curvas de nivel y para el caso considerando las posibles explanaciones no representadas en el modelo. Finalmente, sobre un software GIS o CAD se trazan las subcuencas y se calculan sus áreas.



Ilustración 12. Trazado de subcuencas de la zona de estudio.

Por otra parte, la ejecución del modelo demanda dos parámetros geométricos adicionales de la cuenca para su implementación los cuales son el ancho y la pendiente característicos de la subcuenca. El ancho característico es la relación entre el área de drenado y la máxima longitud recta de la cuenca, la pendiente característica corresponde a la pendiente promedio de la máxima longitud de recta de la cuenca. Ambos valores se abstraen del plano CAD y se incluyen dentro de los parámetros físicos de la cuenca. Finalmente, se realiza la importación de los trazados al software y dentro de las propiedades físicas de la cuenca se introducen los valores obtenidos.

3.3 Parametrización y casos de análisis

En la siguiente sección se presentarán los parámetros requeridos para la implementación, los planteamientos de parámetros para el análisis y finalmente la metodología de la implementación.

3.3.1 Parámetros requeridos

La operación del modelo lluvia-escorrentía EPASWMM Run off en su modelo de subcuenca se ilustra en la figura 3. Para el se plantea el siguiente balance de masa.

$$Escorrentia = d - d_s \quad \text{Ecuación 9}$$



Donde:

d = Profundidad total de precipitación.

d_s = Profundidad total infiltrada.

Ambas variables presentadas se discretizan en el tiempo para la modelación, esta discretización es la que define cada paso de tiempo del hidrograma de salida. La lluvia de diseño del proyecto esta discretizada cada quince minutos en sus valores de intensidad con una duración total de tres horas. La información de la lluvia de diseño se presenta a continuación.

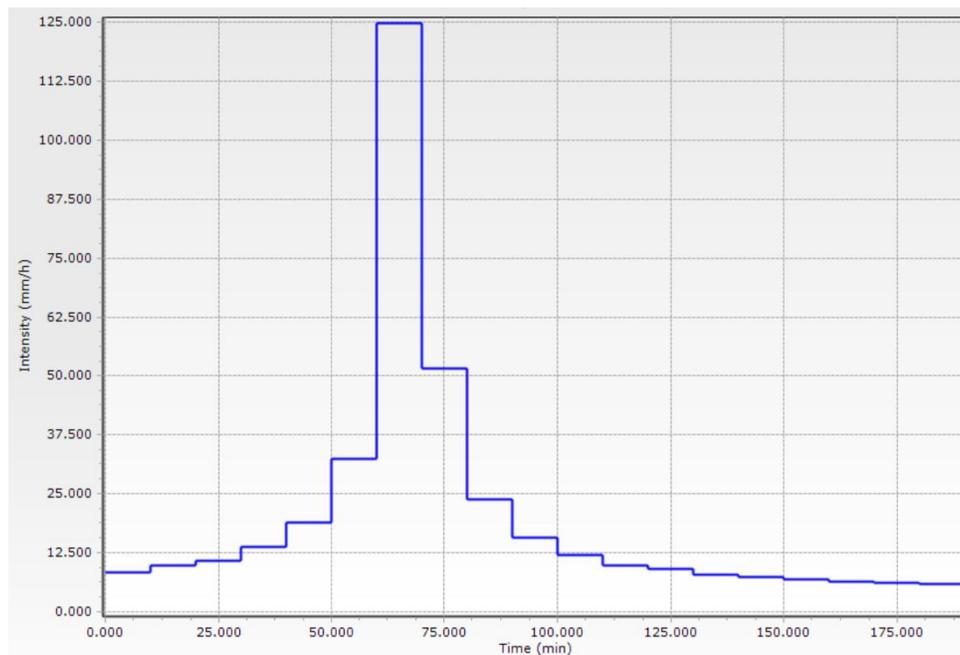


Gráfico 1. Lluvia de diseño para un periodo de retorno de 10 años.

La variable que se quiere calcular es el caudal de entrada para cada intervalo i de tiempo, este calculo se realiza a partir de la ecuación de Manning (Ecuación 3), la cual adaptándola a la discreción temporal y los datos de lluvia se obtienen las siguientes ecuaciones.

$$Q_i = \frac{1.49}{n} S^{\frac{1}{2}} \left(\frac{w(d_i - d_{si})}{w + 2(d_i - d_{si})} \right)^{\frac{2}{3}} w(d_i - d_{si}) \quad \text{Ecuación 10}$$

$$d_i = I_i * t * f(A) \quad \text{Ecuación 11}$$

$$d_{si} = f(d_i) \quad \text{Ecuación 12}$$



Donde:

Q_i = Caudal en el intervalo i (m^3/s).

S = Pendiente promedio de la subcuenca (m/m).

w = Ancho característico de la subcuenca (m).

d_i = Profundidad total de lluvia en el intervalo i (m).

d_{si} = Profundidad total de lluvia infiltrada en el intervalo i (m).

A = Área total de la subcuenca (m^2).

I_i = Intensidad de lluvia en el intervalo i (m/min).

t = Duración del intervalo i (min).

$f(d_i)$ = Función del método de infiltración.

Adicionalmente, el ingreso de este caudal a cada cámara es afectado por el tiempo de concentración simulado por los supuestos descritos en el marco teórico de canal rectangular con rugosidades parametrizadas para superficies impermeables y permeables.

Para la implementación del modelo se debe definir el porcentaje de impermeabilidad y la metodología de enrutamiento, ya que el modelo genera dos canales en su simulación uno para cada condición de impermeabilidad. La condición de enrutamiento define si los canales simulados ambos tienen una salida independiente a la cámara o si tienen una conexión interna entre ellos.

La función del método de infiltración también requiere de la determinación de los parámetros correspondientes a cada método. Para este proyecto se evaluarán los métodos SCS y Green and Ampt, los cuales fueron descritos en el marco teórico. Para la implementación del método SCS se debe determinar el número de curva y a partir de las ecuaciones 6 y 7 se determina la porción de agua que se infiltra al suelo, la determinación y selección de este valor se presenta más adelante. La implementación del método Green and Ampt requiere la determinación de los tres parámetros físicos del suelo descritos en la ecuación 8.

Finalmente, se listan todas las variables requeridas para la implantación del modelo, sus unidades, simbología y mecanismo de obtención.



| Elemento | Variable | Unidades | Símbolo | Mecanismo de obtención |
|-------------------------|-------------------------------------|----------------|----------|------------------------|
| Tubería | Longitud | m | L | Lectura de planos |
| | cota batea entrada | m | CBE | Lectura de planos |
| | cota batea salida | m | CBS | Lectura de planos |
| | diámetro | m | Θ | Lectura de planos |
| | rugosidad | adim | n | Lectura de planos |
| Cámara | coordenada X | m | E | Lectura de planos |
| | coordenada Y | m | N | Lectura de planos |
| | cota rasante | m | CR | Lectura de planos |
| | cota fondo | m | CBS | Lectura de planos |
| Subcuenca | área | m ² | A | Software CAD |
| | ancho característico | m | w | Software CAD |
| | pendiente | m/m | S | Software CAD |
| | impermeabilidad | % | Imp | Llevada a análisis |
| | rugosidad en superficie impermeable | adim | n imp | Entrevista |
| | rugosidad en superficie permeable | adim | n perm | Entrevista |
| | método de enrutamiento | N/A | N/A | Entrevista |
| Métodos de infiltración | número de curva | adim | CN | Llevada a análisis |
| | succión capilar del frente húmedo | mm | ψ_f | Estudio de suelos |
| | conductividad hidráulica | mm/hr | K | Estudio de suelos |
| | porosidad | % | n | Llevada a análisis |

Tabla 1. Listado de variables requeridas para la implementación.

3.3.2 Planteamiento de casos de análisis

Si bien todas las variables requeridas en este punto de la implementación ya se encuentran establecidas en el modelo, también se ejecuta el modelo para validar su funcionamiento con los valores que se usaron en el diseño original de las variables traídas a estudio. A continuación, se presenta el listado de variables implementadas en el primer modelo de diseño.



| Elemento | Variable | Unidades | Símbolo | Valor |
|-------------------------|-------------------------------------|----------------|----------|------------------------|
| Subcuenca | área | m ² | A | Propio en cada ítem |
| | ancho característico | m | w | Propio en cada ítem |
| | pendiente | m/m | S | Propio en cada ítem |
| | impermeabilidad | % | imp | 85% |
| | rugosidad en superficie impermeable | adim | n imp | 0.02 |
| | rugosidad en superficie permeable | adim | n perm | 0.1 |
| | método de enrutamiento | N/A | N/A | Salidas independientes |
| Métodos de infiltración | numero de curva | adim | CN | N/A |
| | succión capilar del frente húmedo | mm | ψ_f | 90 |
| | conductividad hidráulica | mm/hr | K | 10 |
| | porosidad | % | n | 0.75 |

Tabla 2. Listado de variables hidrológicas implementadas en el diseño original.

El análisis de sensibilidad de volumen máximo total captado e hidrogramas a implementar busca estudiar las variables de impermeabilidad, pendiente, número de curva y porosidad. Los planteamientos llevados al análisis para cada una de las variables mencionadas se presentan más adelante.

3.3.2.1 Impermeabilidad

La impermeabilidad define el porcentaje de la cuenca que trabaja con los parámetros n imp y la precipitación específica de esa área asociada. Debido a que la ocupación será un área urbana residencial poblada con área de parqueaderos, se toma el valor alto de 85% de impermeabilidad para el diseño. Sin embargo, lo que busca plantear el análisis es diferentes casos impermeabilidad y ver su influencia en los resultados del método. Dado lo anterior se plantean tres casos adicionales de impermeabilidad equivalentes al 0%, 33%, y 100%.

3.3.2.2 Pendiente

La pendiente de cada subcuenca depende de la topografía de esta, para la implementación del método se proponen cuatro factores multiplicativos para las pendientes del terreno original y evaluar su influencia en los resultados. Los factores propuestos corresponden al 33%, 66%, 200% y 300%.



3.3.2.3 Numero de curva

Si bien se describe en el marco teórico, el número de curva depende de dos factores: la ocupación probable y el tipo de suelo. El tipo de suelo original corresponde a un suelo con un alto potencial de escorrentía y bajo potencial de infiltración esto se atribuye a el alto nivel freático de la zona y la materialidad misma del suelo. En la caracterización del suelo este tipo de suelo corresponde al suelo tipo C y las condiciones de cobertura a urbano de población densa, para un numero de curva de 90 según las librerías de la USDA. (Rossman & Huber, 2016)

Para el análisis se plantean dos casos adicionales de numero de curva correspondientes a 74 y 50, 74 equivale a un mismo tipo de suelo para una ocupación muy baja y 50 equivale a un suelo tipo C para la misma ocupación baja.

3.3.2.4 Humedad del suelo

La humedad del suelo se relaciona al parámetro de la porosidad del método Green and Ampt, su valor se maneja como la fracción entre el volumen ocupado por agua y el volumen total de espacios de aire en el suelo. Dada la alta humedad del sector para el diseño se toma un valor del 75, para el análisis se plantean tres casos adicionales de humedad los cuales corresponden a 25%, 50% y 100%.

3.3.2.5 Puntos de análisis

A partir del modelo trabajado anteriormente se seleccionan tres puntos de la red para llevar a cabo la implementación, puntos que serán descritos a continuación.



3.3.2.5.1 Punto A

| Punto medio del drenaje de la vía interna Etapa Málaga | | | |
|--|---|--------------------------|-----------------|
| Sub Cuenca | Ancho característico (m) | Pendiente (m/m) | Área (He) |
| 1 | 26.5 | 0.002 | 0.208 |
| 2 | 19.7 | 0.001 | 0.183 |
| 3 | 28.3 | 0.002 | 0.621 |
| 4 | 17.3 | 0.001 | 0.129 |
| 5 | 31.4 | 0.003 | 0.935 |
| 6 | 33.5 | 0.002 | 0.747 |
| 7 | 34 | 0.003 | 0.888 |
| 8 | 36.3 | 0.004 | 0.799 |
| Total | Profundidad característica promedio (m) | Pendiente promedio (m/m) | Área total (He) |
| 8 | 28.375 | 0.00225 | 4.51 |

Tabla 3. Propiedades de subcuencas del punto A.



Ilustración 13. Tramo de la red y trazado de subcuencas del punto A.



3.3.2.5.2 Punto B

| Drenaje de la vía interna Etapa Málaga | | | |
|--|-----------------------------------|--------------------------|-----------------|
| Sub Cuenca | Ancho característico (m) | Pendiente (m/m) | Área (He) |
| 1 | 26.5 | 0.002 | 0.208 |
| 2 | 19.7 | 0.001 | 0.183 |
| 3 | 28.3 | 0.002 | 0.621 |
| 4 | 17.3 | 0.001 | 0.129 |
| 5 | 31.4 | 0.003 | 0.935 |
| 6 | 33.5 | 0.002 | 0.747 |
| 7 | 34 | 0.003 | 0.888 |
| 8 | 36.3 | 0.004 | 0.799 |
| 9 | 25.6 | 0.005 | 0.354 |
| 10 | 43.5 | 0.002 | 1.023 |
| 11 | 23.5 | 0.006 | 0.333 |
| 12 | 26.9 | 0.002 | 0.374 |
| 13 | 21.4 | 0.006 | 0.213 |
| 14 | 18.5 | 0.002 | 0.155 |
| 15 | 19.2 | 0.005 | 0.191 |
| Total | Ancho característico promedio (m) | Pendiente promedio (m/m) | Área total (He) |
| 15 | 27.04 | 0.00307 | 7.153 |

Tabla 4. Propiedades de subcuencas del punto B.



Ilustración 14. Tramo de la red y trazado de subcuencas del punto B.

3.3.2.5.3 Punto C

| Entrada norte de la laguna de regulación | | | |
|--|--|---------------------------------|------------------------|
| Sub Cuenca | Ancho característico (m) | Pendiente (m/m) | Área (He) |
| 1 | 68 | 0.104 | 1.591 |
| 2 | 27.8 | 0.001 | 0.712 |
| 3 | 21 | 0.002 | 0.343 |
| 4 | 19.5 | 0.002 | 0.139 |
| 5 | 16 | 0.001 | 0.16 |
| 6 | 15.5 | 0.001 | 0.153 |
| Total | Ancho característico promedio (m) | Pendiente promedio (m/m) | Área total (He) |
| 6 | 27.967 | 0.0185 | 3.098 |

Tabla 5. Propiedades de subcuencas del punto C.

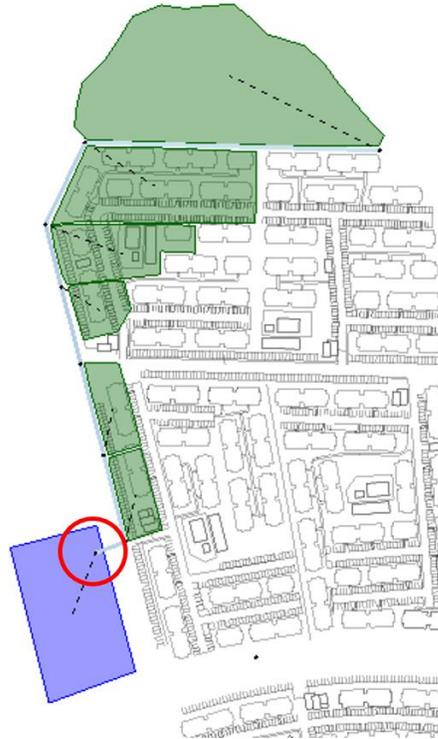


Ilustración 15. Tramo de la red y trazado de subcuencas del punto C.

En las ilustraciones de los puntos de análisis, la circunferencia roja indica el punto de salida de la red y es este mismo punto donde son tomados los datos de caudal, volumen total y nivel.

3.3.3 Casos de análisis

Si bien se menciona anteriormente, se proponen los diferentes valores de cada parámetro en estudio, ahora bien, se plantearán las combinaciones de parámetros llevadas al análisis.

El análisis de sensibilidad se desarrolla en dos instancias, primero se evalúa la dispersión de volúmenes máximos captados por las subcuencas ante la combinación de todos los casos de análisis y cada método. Segundo, a partir de las condiciones paramétricas donde el parámetro en estudio tenga mayor dispersión se generan hidrogramas y limnigramas de esta forma analizar el efecto temporal en su variación.



| Impermeabilidad | Factor de pendiente | Número de curva |
|-----------------|---------------------|-----------------|
| 100% | 300% | 90 |
| 85% | 200% | 74 |
| 33% | 100% | 50 |
| 0% | 66% | |
| | 33% | |

Tabla 6. Combinación de parámetros para el método de infiltración SCS.

| Impermeabilidad | Factor de pendiente | Humedad del suelo |
|-----------------|---------------------|-------------------|
| 100% | 300% | 100% |
| 85% | 200% | 75% |
| 33% | 100% | 50% |
| 0% | 66% | 25% |
| | 33% | |

Tabla 7. Combinación de parámetros para el método de infiltración Green and Ampt.

Cada combinación de parámetros corresponde a una ejecución del modelo y su respectiva lectura de datos para un total de 60 para el método del SCS y 80 para Green and Ampt.

3.3.4 Metodología de implementación

3.3.4.1 Análisis de volumen total captado

Este análisis se desarrolla a partir de la ejecución de los 140 modelos con las diferentes combinaciones de parámetros, cada uno de estos modelos arroja un valor de volumen en m³. Posteriormente, se tabulan todos los valores obtenidos y se realizan gráficos de cada una de las variables en función del volumen y referenciando las otras variables en el gráfico.

3.3.4.2 Análisis de hidrogramas y limnigramas

A partir del análisis de volumen total captado se identifican las condiciones donde la variable en estudio tiende más a la dispersión, para estas condiciones se ejecutan los modelos y se observan las variaciones temporales en los hidrogramas y limnigramas.



4 RESULTADOS

En el siguiente capítulo se presentan los gráficos de dispersión de volumen obtenidos para cada combinación de parámetros. En su segunda sección, se presentan los hidrogramas y limnigramas, definiendo la selección de sus valores constantes.

4.1 Resultados de volumen total captado

4.1.1 Factor de pendiente vs Volumen (Método Green and Ampt)

| Impermeabilidad (%) | Humedad (%) | | | |
|---------------------|-------------|----|----|----|
| | 100 | 75 | 50 | 25 |
| 100 | | | | |
| 85 | | | | |
| 33 | | | | |
| 0 | | | | |

Tabla 8. Leyenda de interpretación Factor de pendiente vs Volumen.

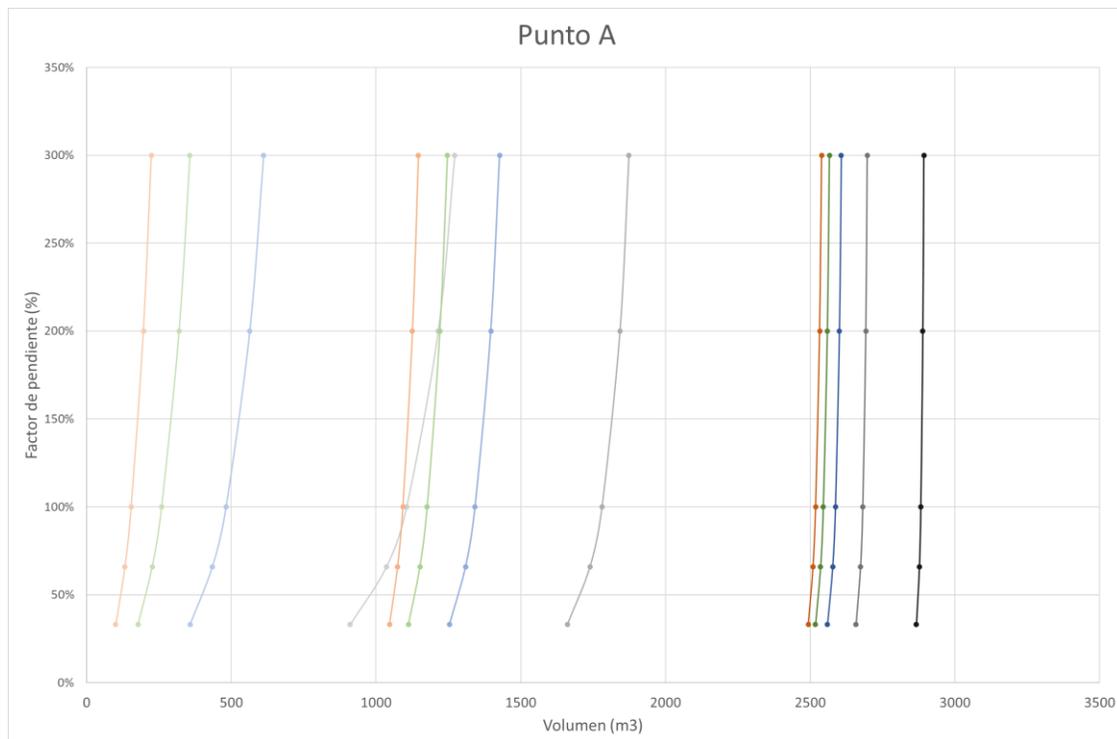


Gráfico 2. Punto A. Factor de pendiente vs Volumen (Método Green and Ampt).

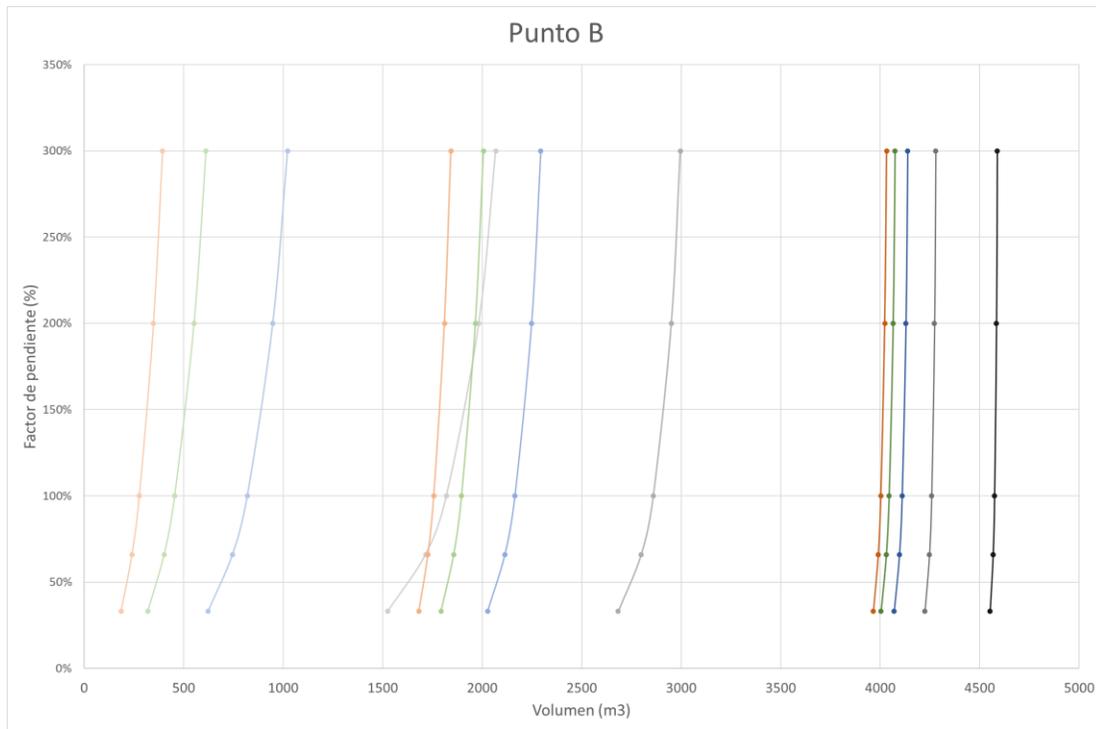


Gráfico 3. Punto B. Factor de pendiente vs Volumen (Método Green and Ampt).

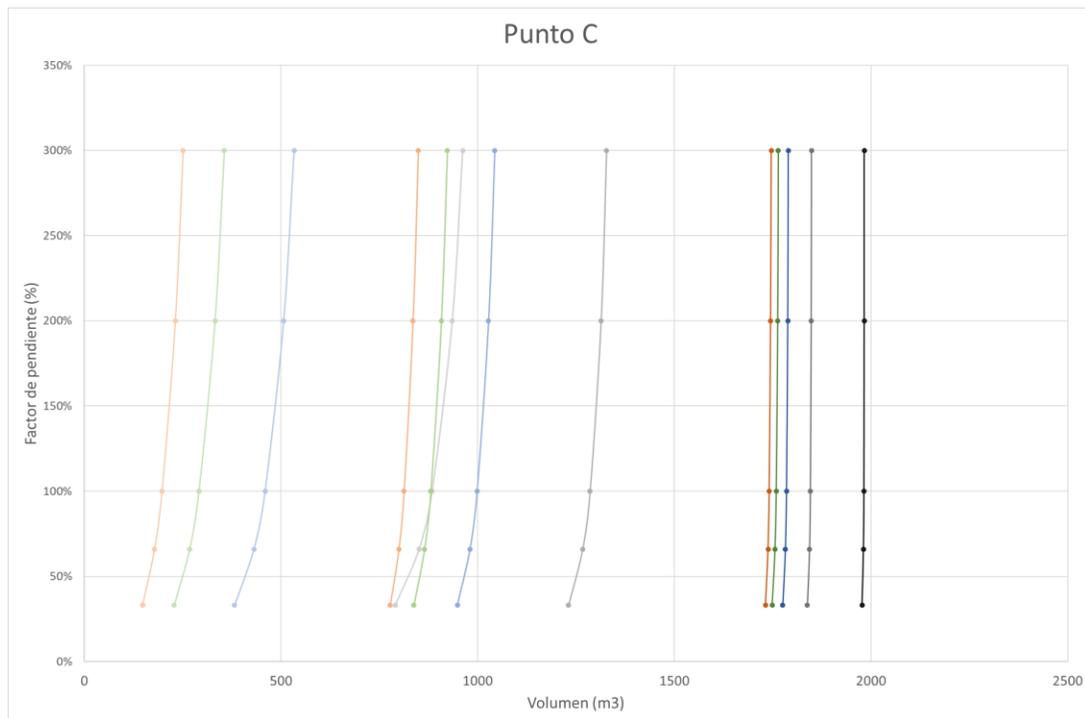


Gráfico 4. Punto C. Factor de pendiente vs Volumen (Método Green and Ampt).



4.1.2 Impermeabilidad vs Volumen (Método Green and Ampt)

| Factor de pendiente | Humedad (%) | | | |
|---------------------|-------------|----|----|----|
| | 100 | 75 | 50 | 25 |
| 300% | | | | |
| 200% | | | | |
| 100% | | | | |
| 66% | | | | |
| 33% | | | | |

Tabla 9. Leyenda de interpretación Impermeabilidad vs Volumen.

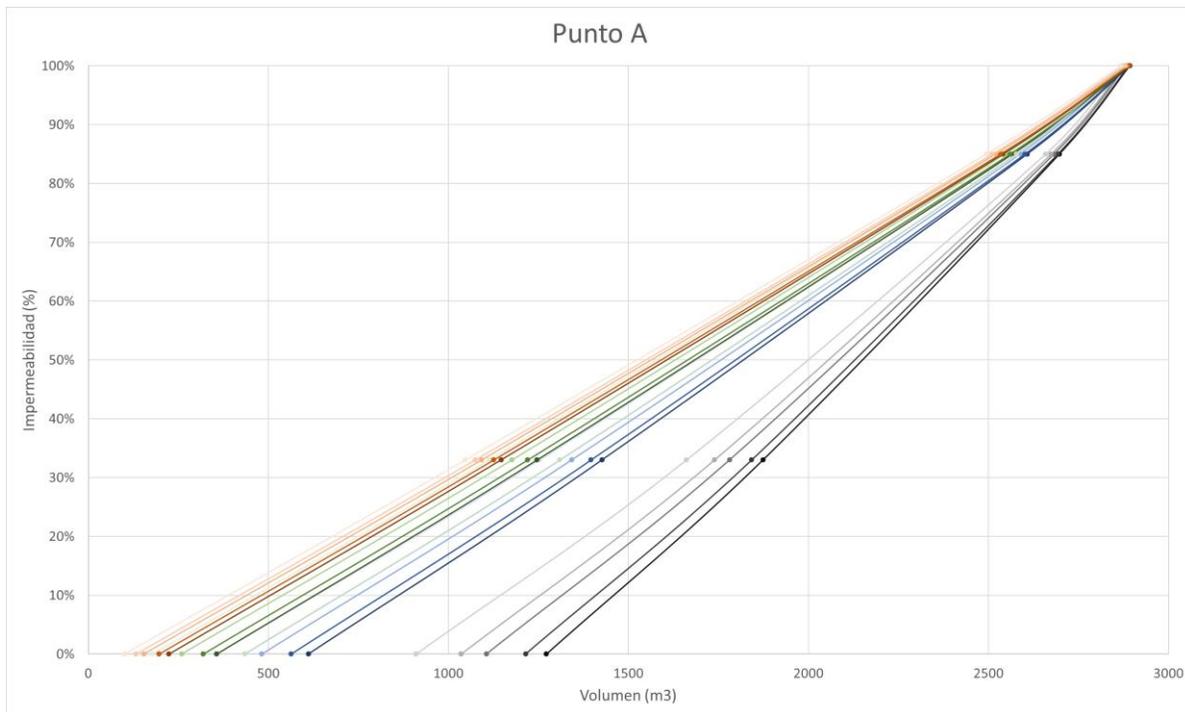


Gráfico 5. Punto A. Impermeabilidad vs Volumen (Método Green and Ampt).

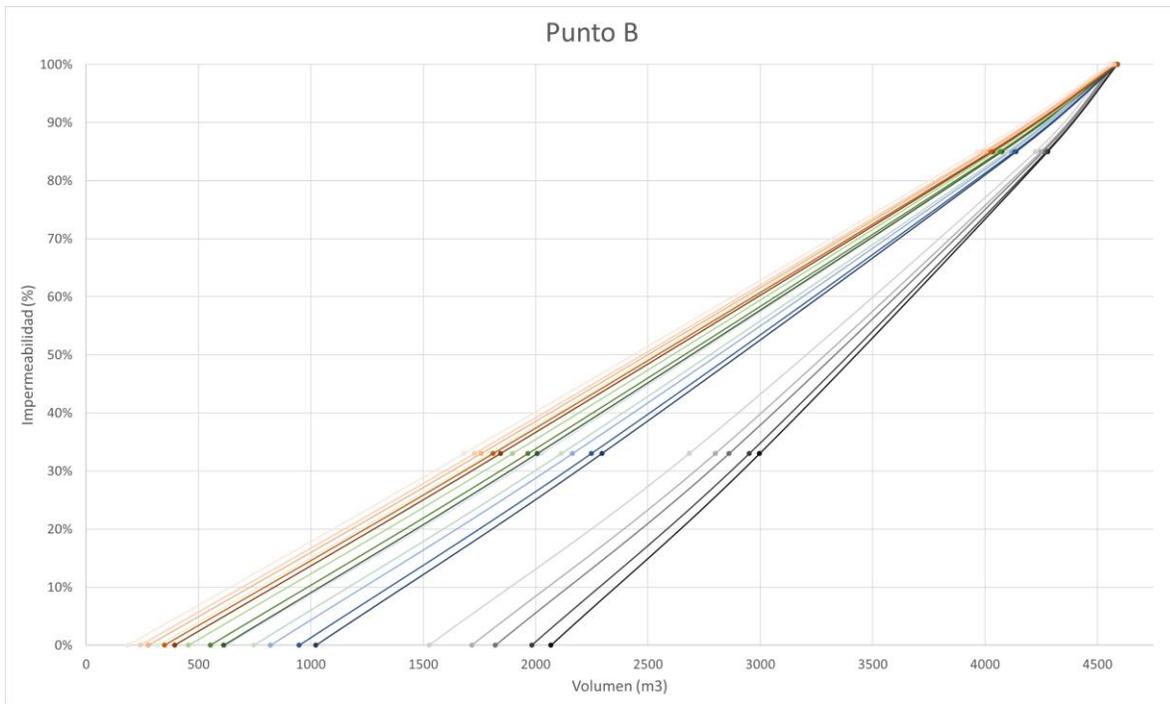


Gráfico 6. Punto B. Impermeabilidad vs Volumen (Método Green and Ampt).

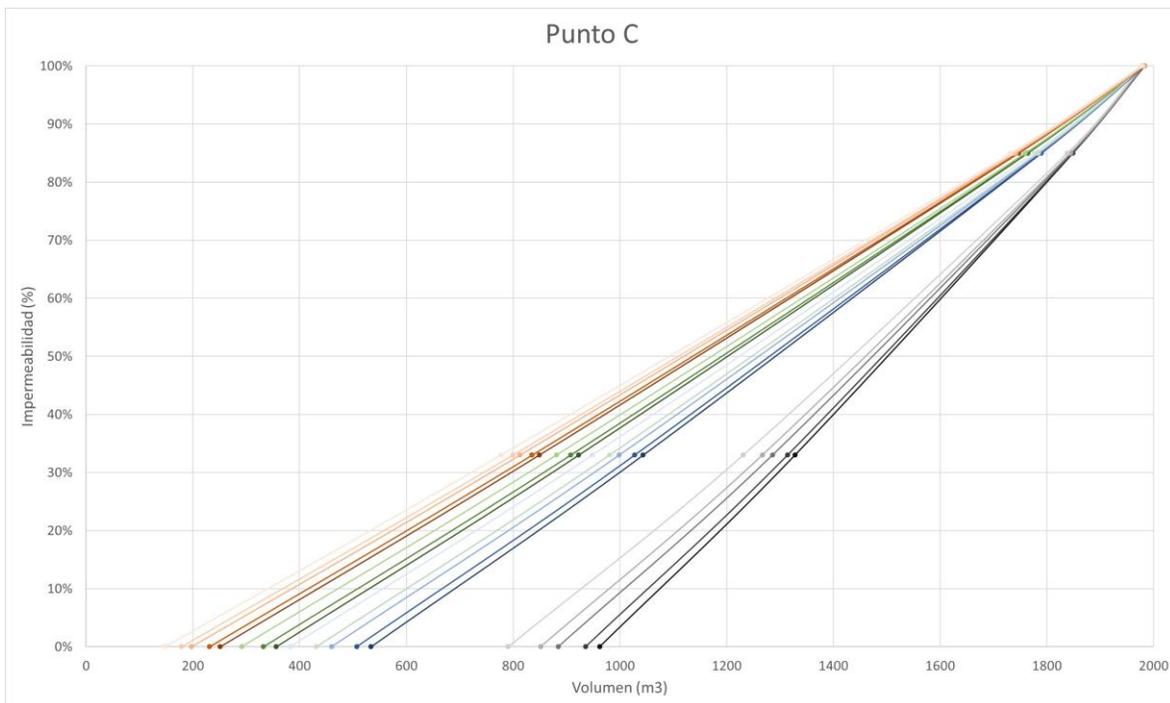


Gráfico 7. Punto C. Impermeabilidad vs Volumen (Método Green and Ampt).



4.1.3 Humedad vs Volumen (Método Green and Ampt)

| Factor de pendiente (%) | Impermeabilidad (%) | | | |
|-------------------------|---------------------|----|----|---|
| | 100 | 85 | 33 | 0 |
| 300 | | | | |
| 200 | | | | |
| 100 | | | | |
| 66 | | | | |
| 33 | | | | |

Tabla 10. Leyenda de interpretación Humedad vs Volumen.

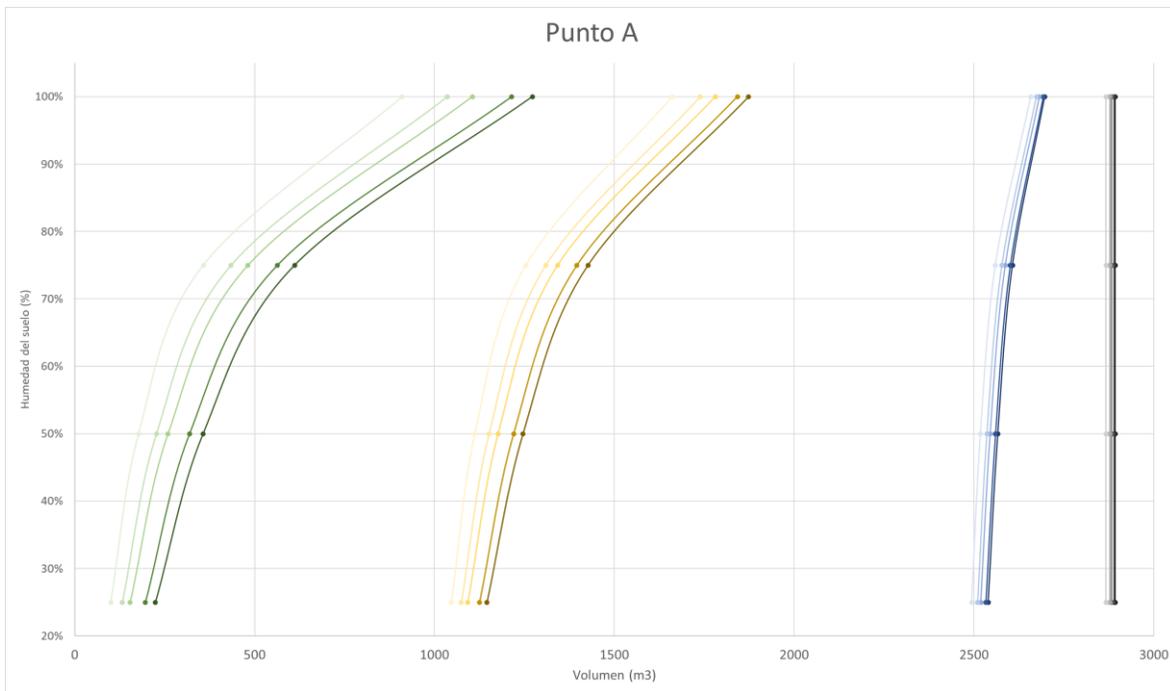


Gráfico 8. Punto A. Humedad vs Volumen (Método Green and Ampt).

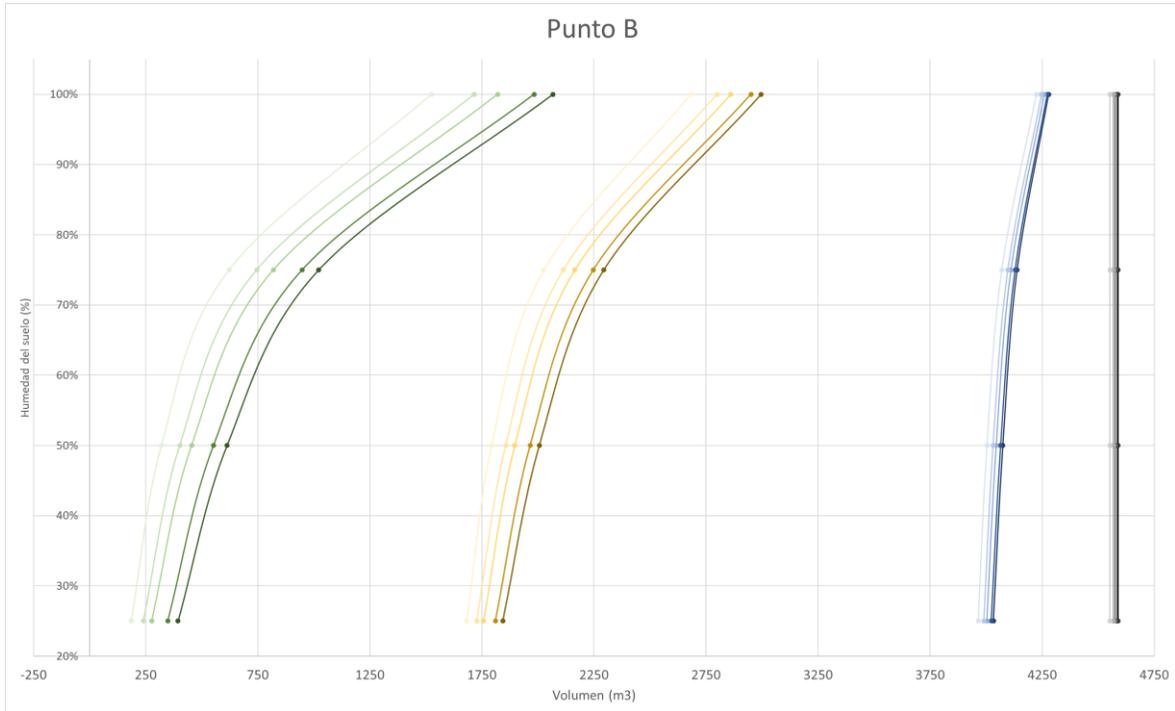


Gráfico 9. Punto B. Humedad vs Volumen (Método Green and Ampt).

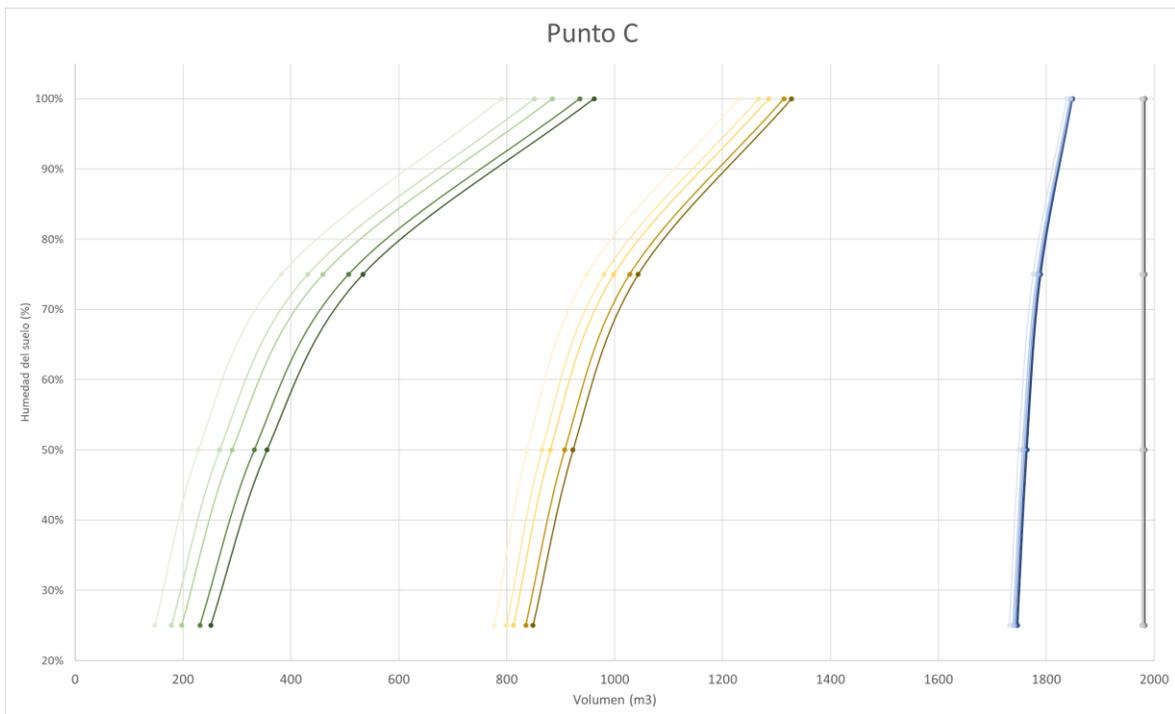


Gráfico 10. Punto C. Humedad vs Volumen (Método Green and Ampt).



4.1.4 Factor de pendiente vs Volumen (Método SCS)

| Impermeabilidad (%) | Numero de Curva | | |
|---------------------|-----------------|----|----|
| | 90 | 74 | 50 |
| 100 | | | |
| 85 | | | |
| 33 | | | |
| 0 | | | |

Tabla 11. Leyenda de interpretación Factor de pendiente vs Volumen.

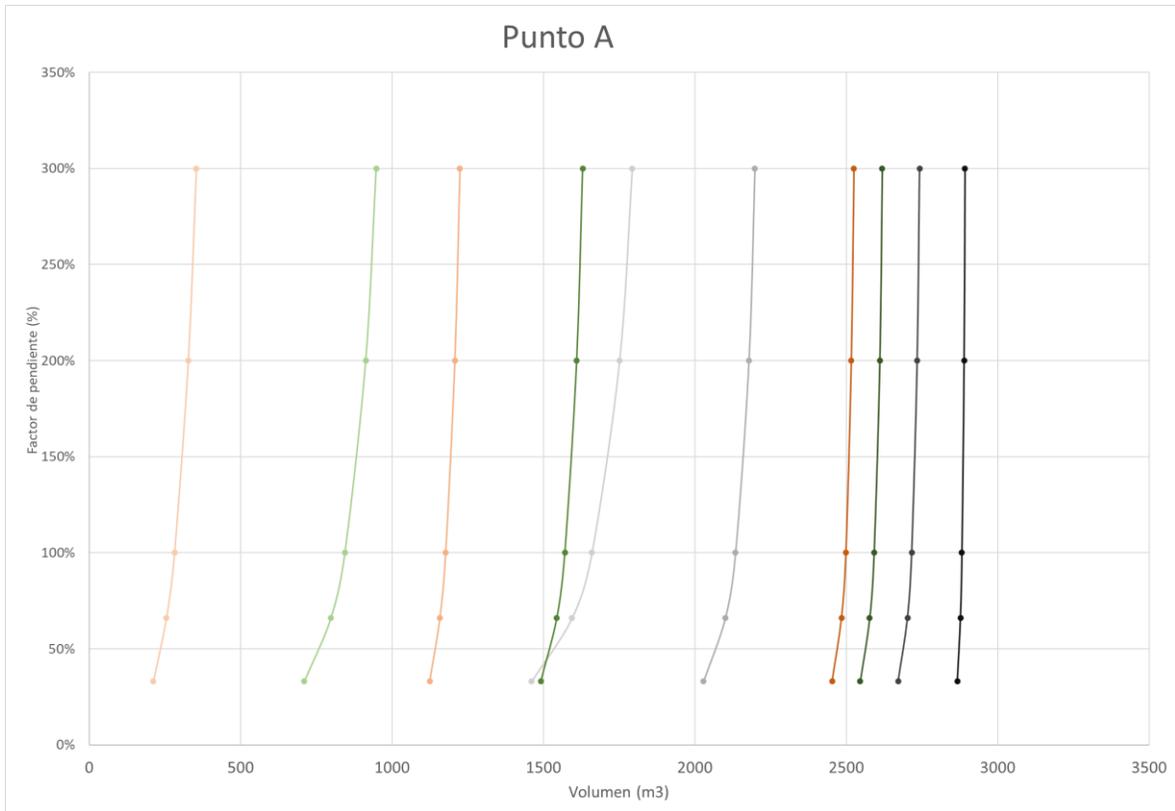


Gráfico 11. Punto A. Humedad vs Volumen (Método Green and Ampt).

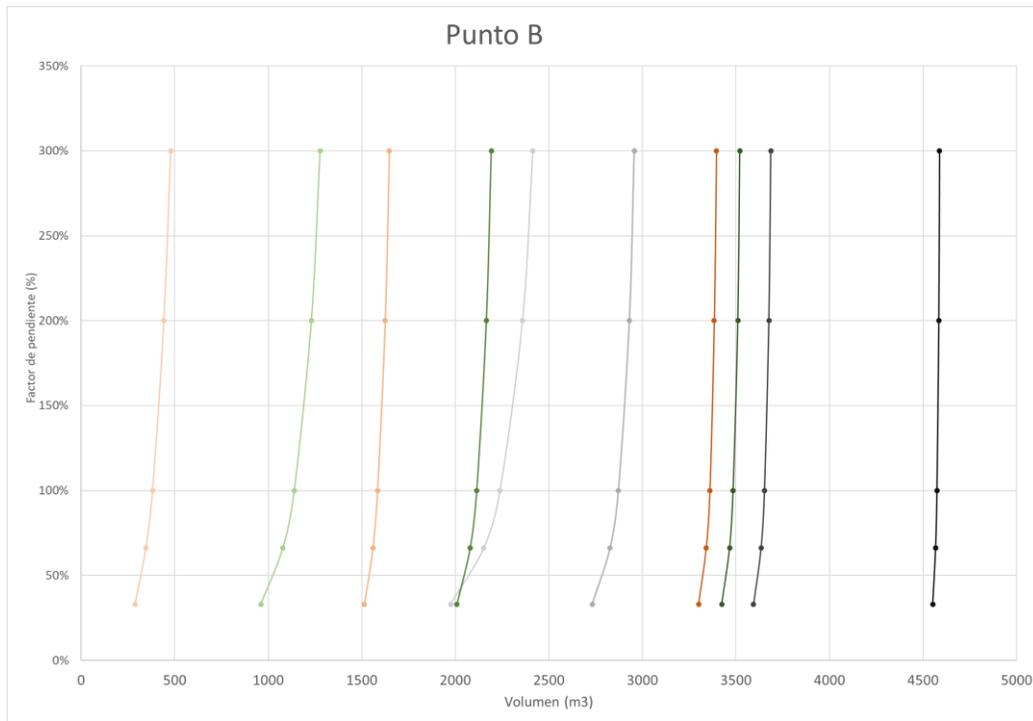


Gráfico 12. Punto B. Factor de pendiente vs Volumen (Método SCS).

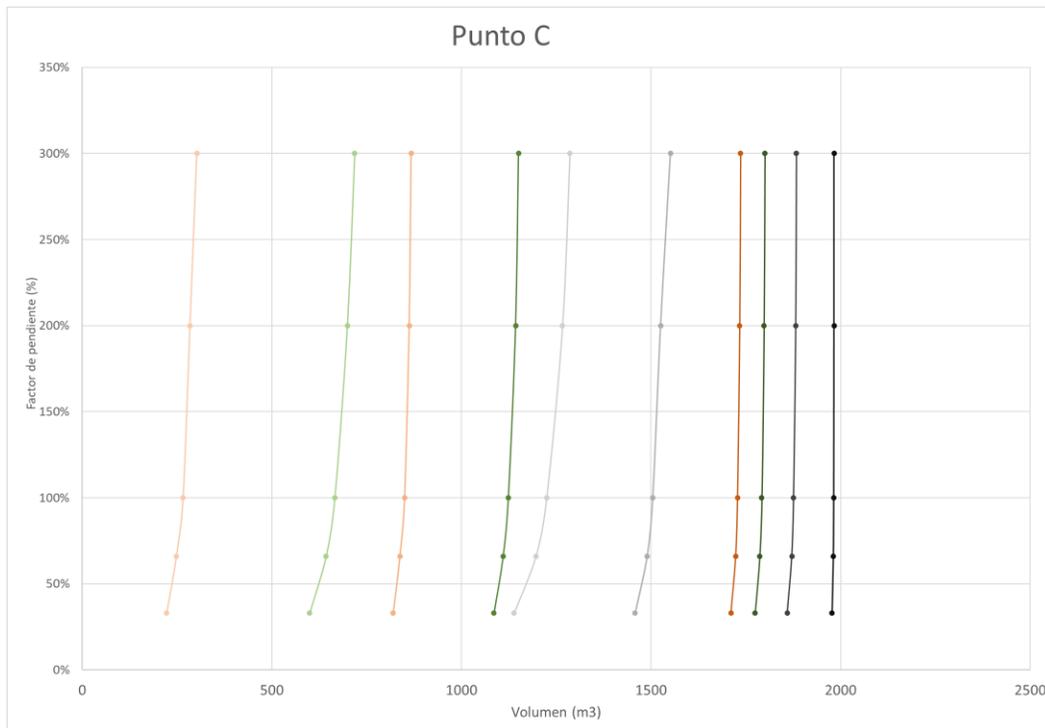


Gráfico 13. Punto C. Factor de pendiente vs Volumen (Método SCS).



4.1.5 Impermeabilidad vs Volumen (Método SCS)

| Factor de Pendiente (%) | Numero de Curva | | |
|-------------------------|-----------------|----|----|
| | 90 | 74 | 50 |
| 300 | | | |
| 200 | | | |
| 100 | | | |
| 66 | | | |
| 33 | | | |

Tabla 12. Leyenda de interpretación Impermeabilidad vs Volumen.

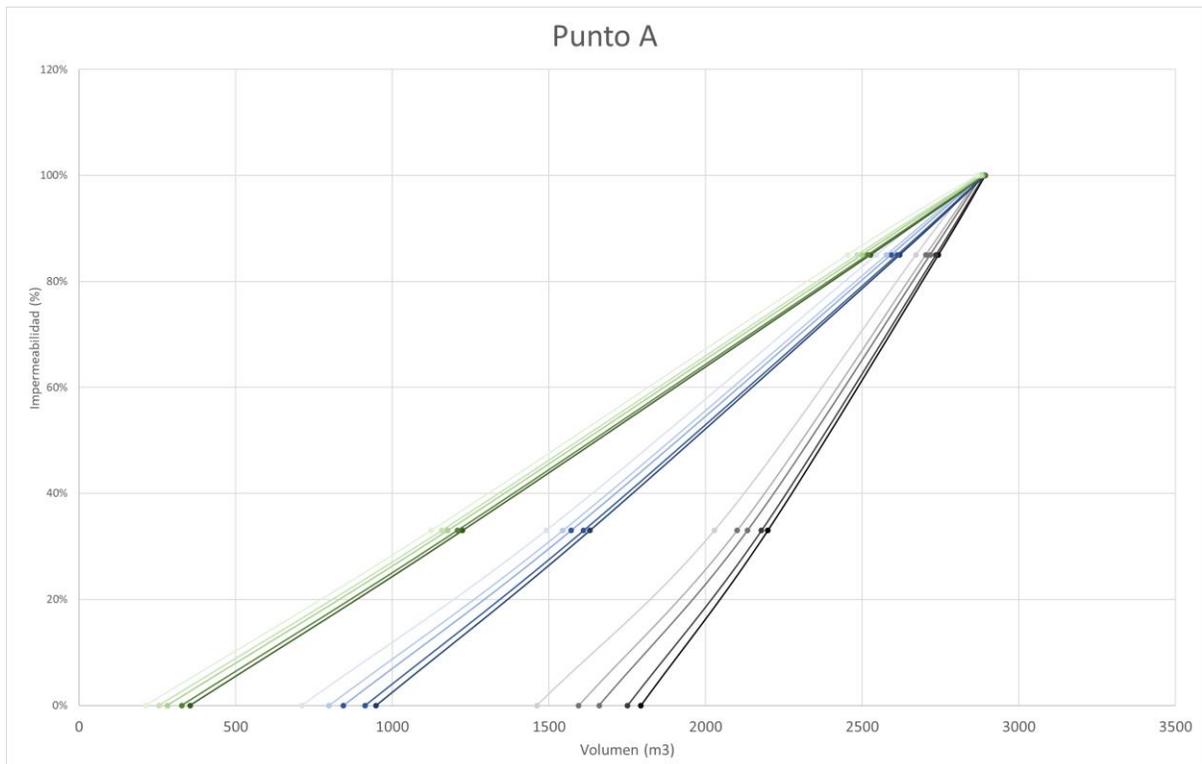


Gráfico 14. Punto A. Impermeabilidad vs Volumen (Método SCS).

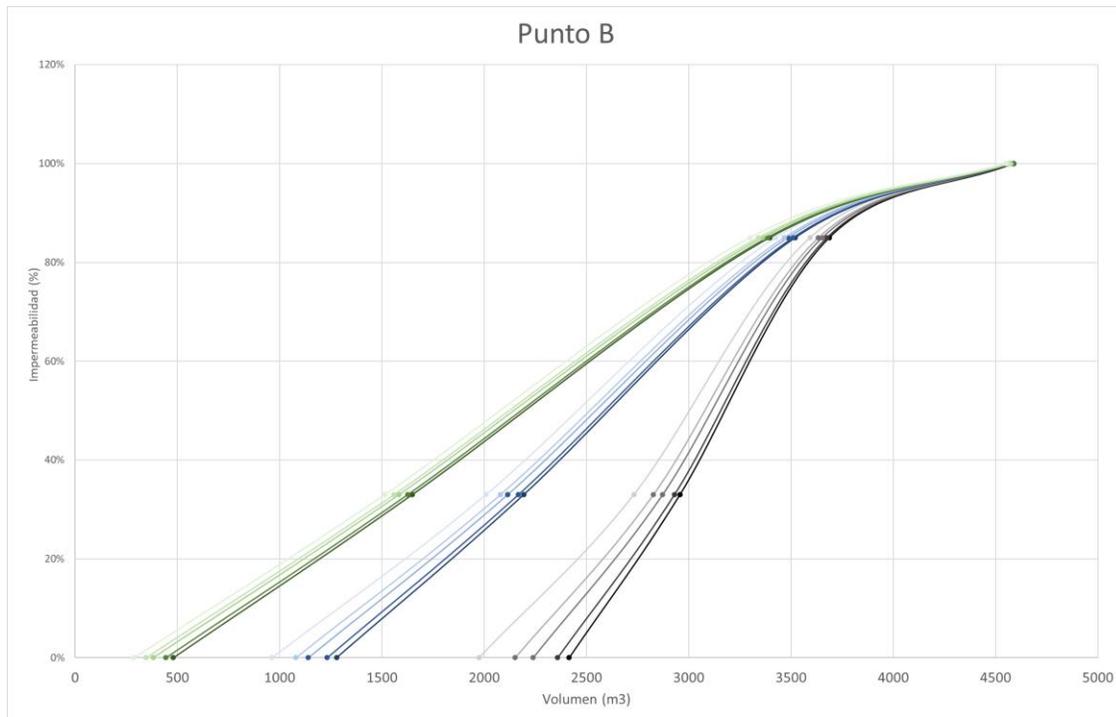


Gráfico 15. Punto B. Impermeabilidad vs Volumen (Método SCS).

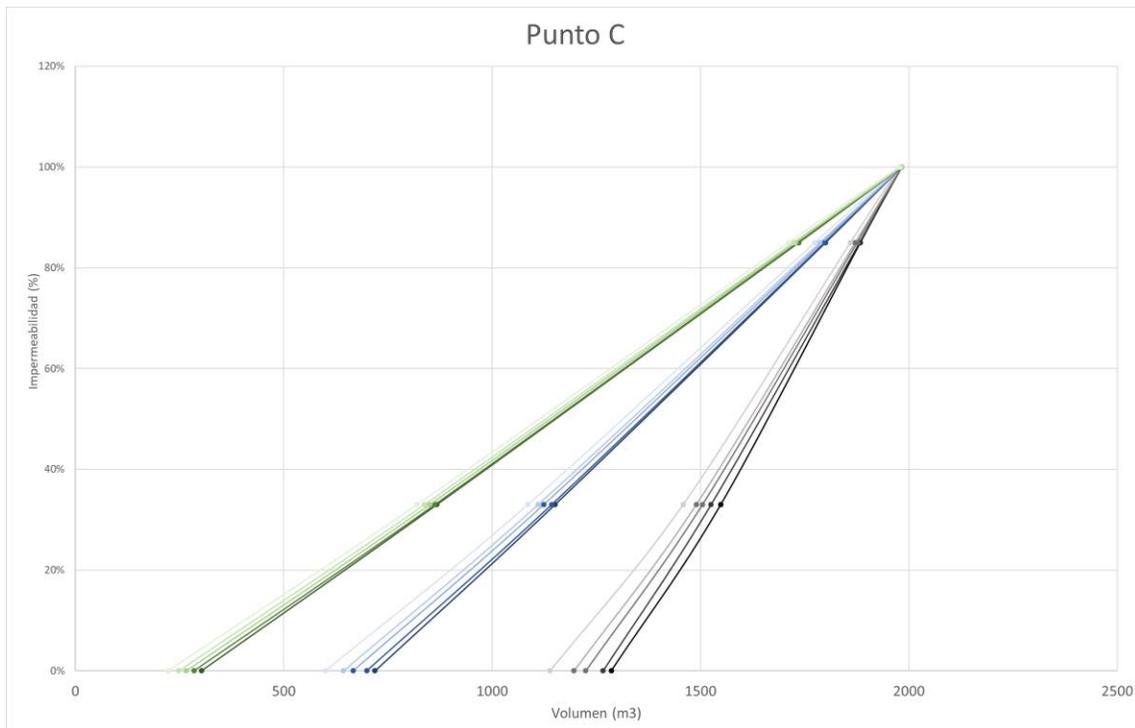


Gráfico 16. Punto C. Impermeabilidad vs Volumen (Método SCS).



4.1.6 Número de curva vs Volumen (Método SCS)

| Factor de Pendiente (%) | Impermeabilidad (%) | | | |
|-------------------------|---------------------|----|----|---|
| | 100 | 85 | 33 | 0 |
| 300 | | | | |
| 200 | | | | |
| 100 | | | | |
| 66 | | | | |
| 33 | | | | |

Tabla 13. Leyenda de interpretación Número de curva vs Volumen.

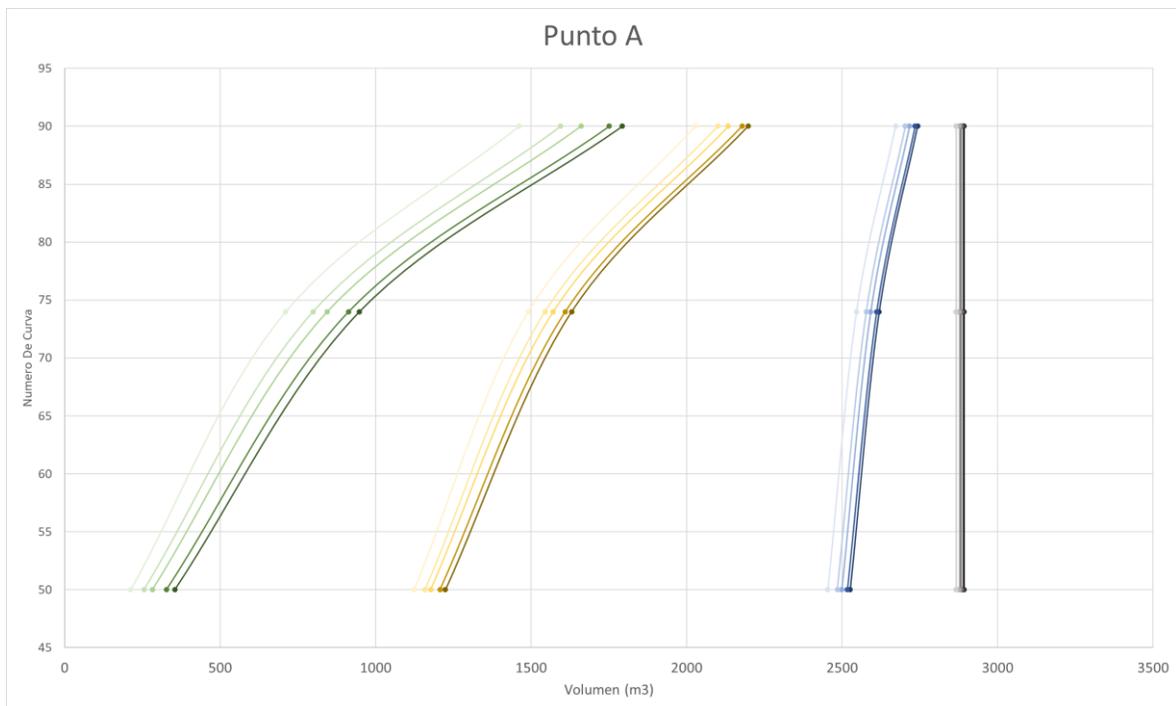


Gráfico 17. Punto A. Número de curva vs Volumen (Método SCS).

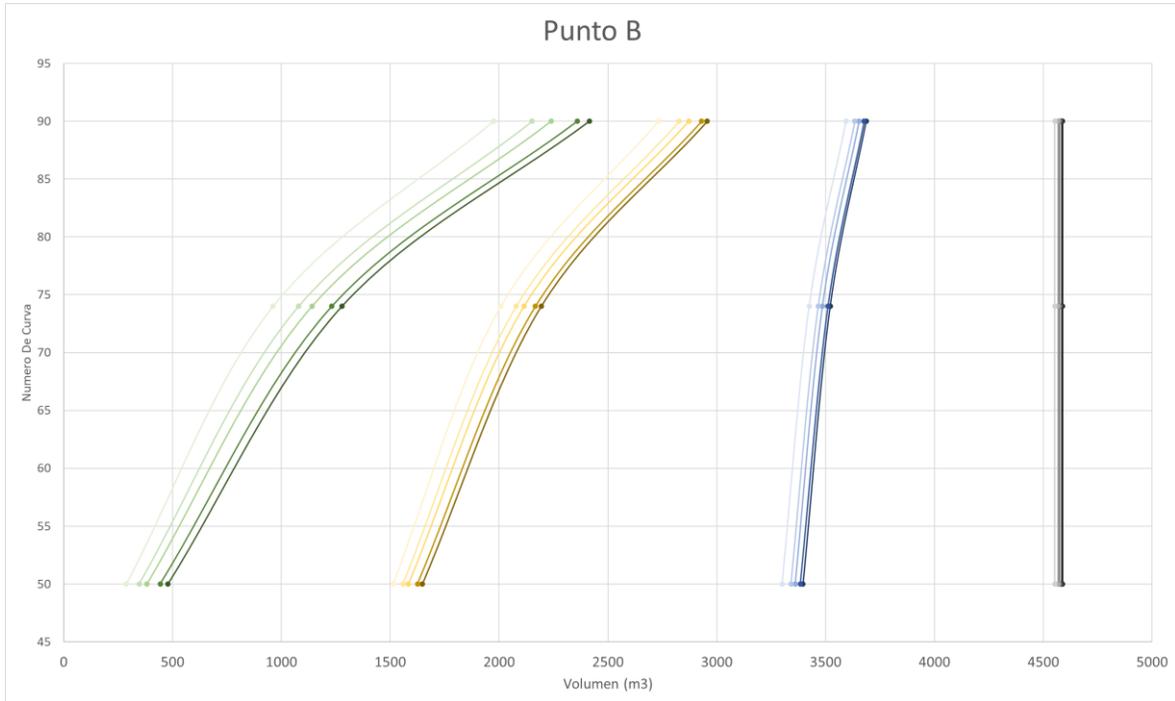


Gráfico 18. Punto B. Número de curva vs Volumen (Método SCS).

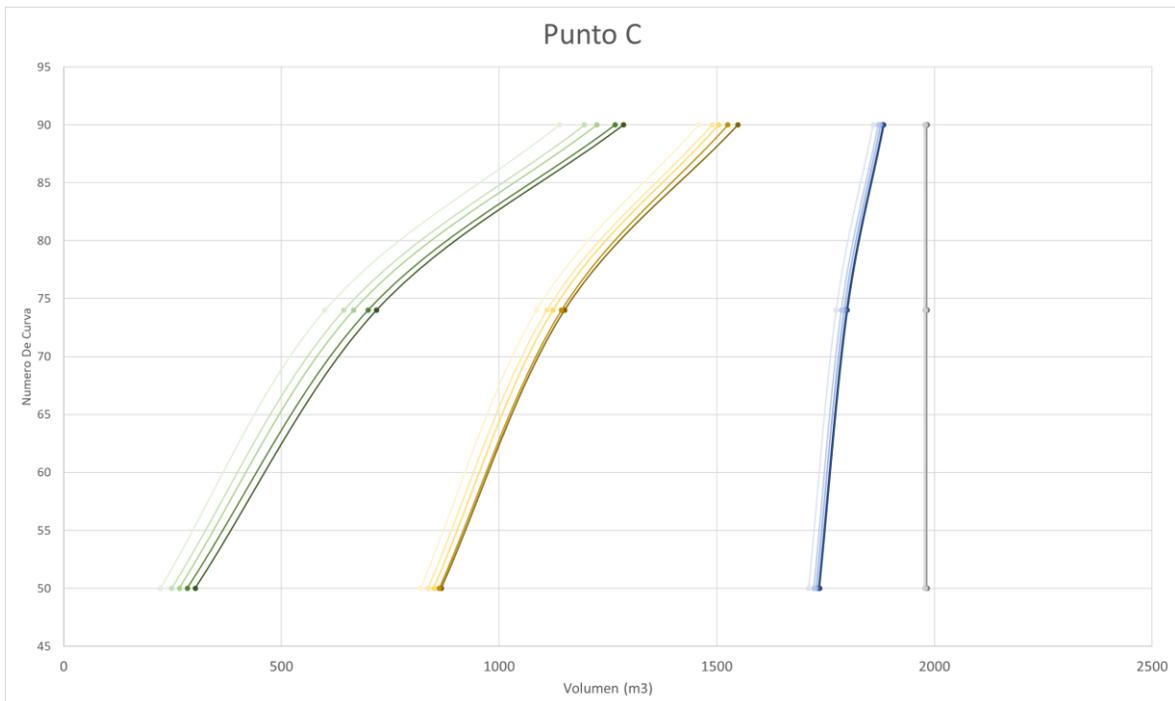


Gráfico 19. Punto C. Número de curva vs Volumen (Método SCS).



4.2 Resultados hidrogramas y limnigramas

La selección de los hidrogramas y limnigramas representativos para el análisis es derivada del análisis del volumen total captado y se expresa mas adelante en este texto. Esta sección presenta los resultados de los hidrogramas y limnigramas.

4.2.1 Limnigramas

4.2.1.1 Impermeabilidad variable

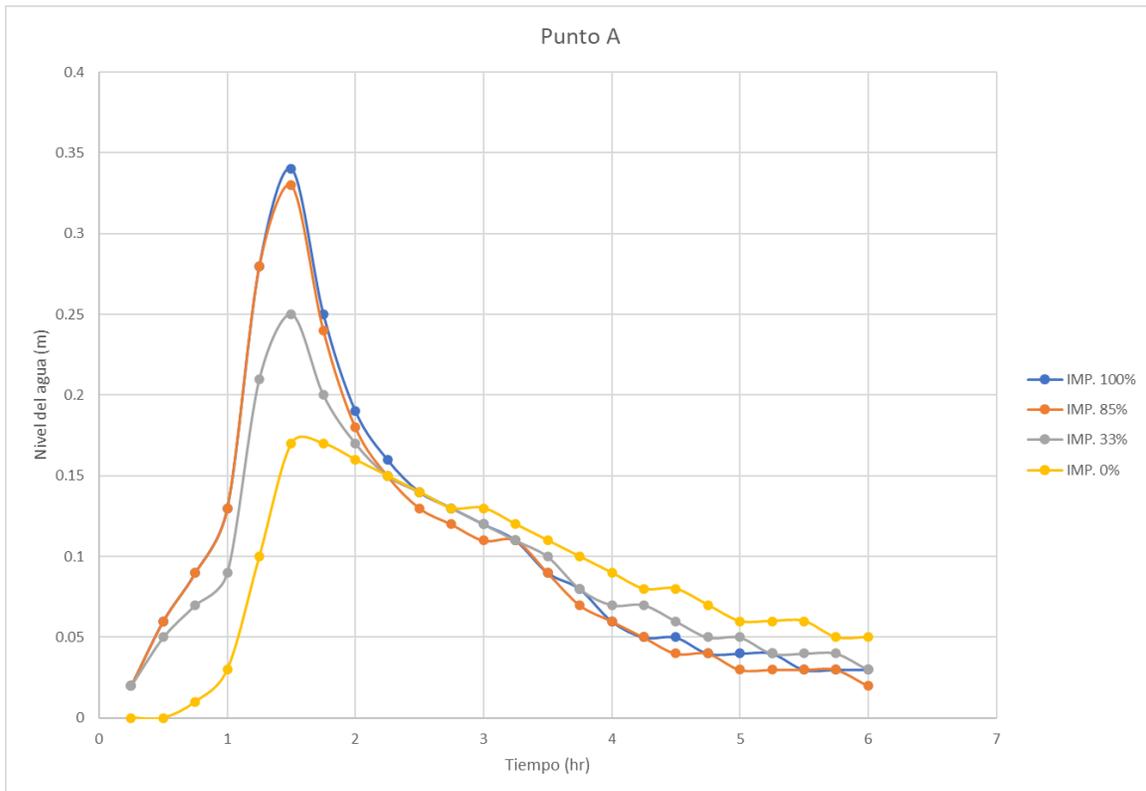


Gráfico 20. Punto A. Limnigrama de impermeabilidad variable.

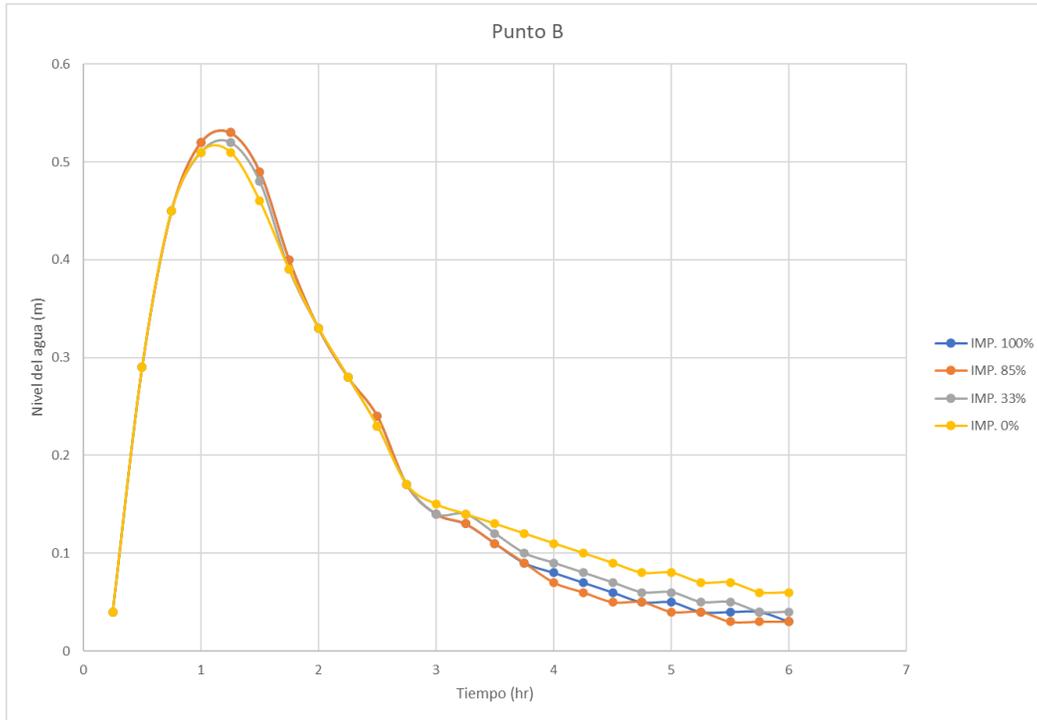


Gráfico 21. Punto B. Limnigrama de impermeabilidad variable.

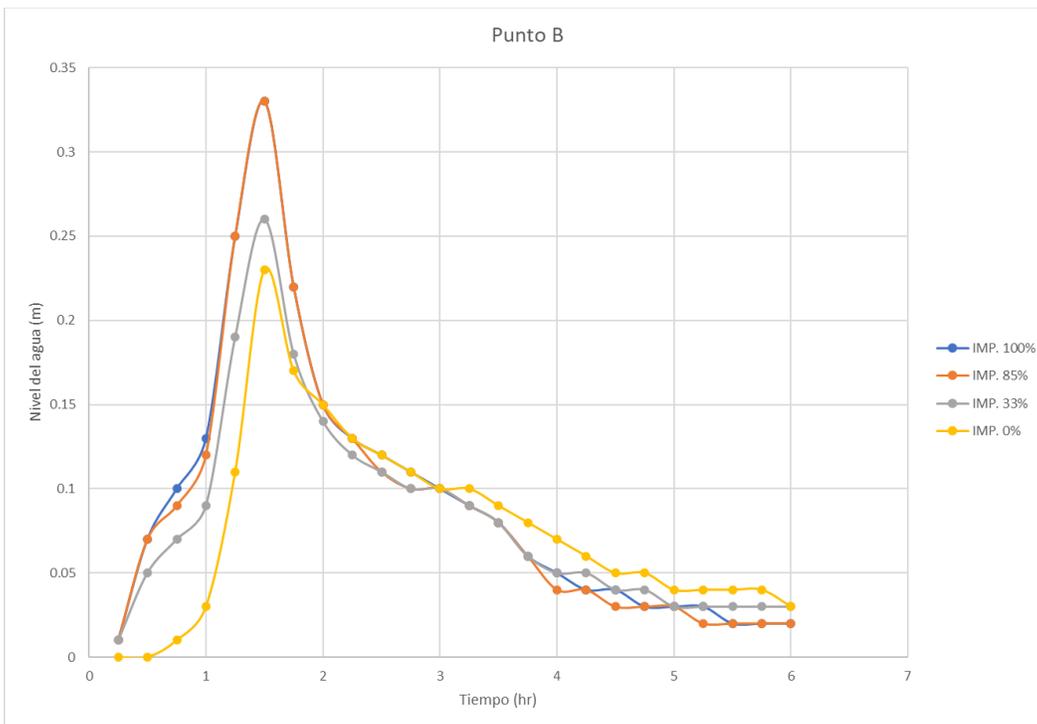


Gráfico 22. Punto C. Limnigrama de impermeabilidad variable.



4.2.1.2 Factor de pendiente variable

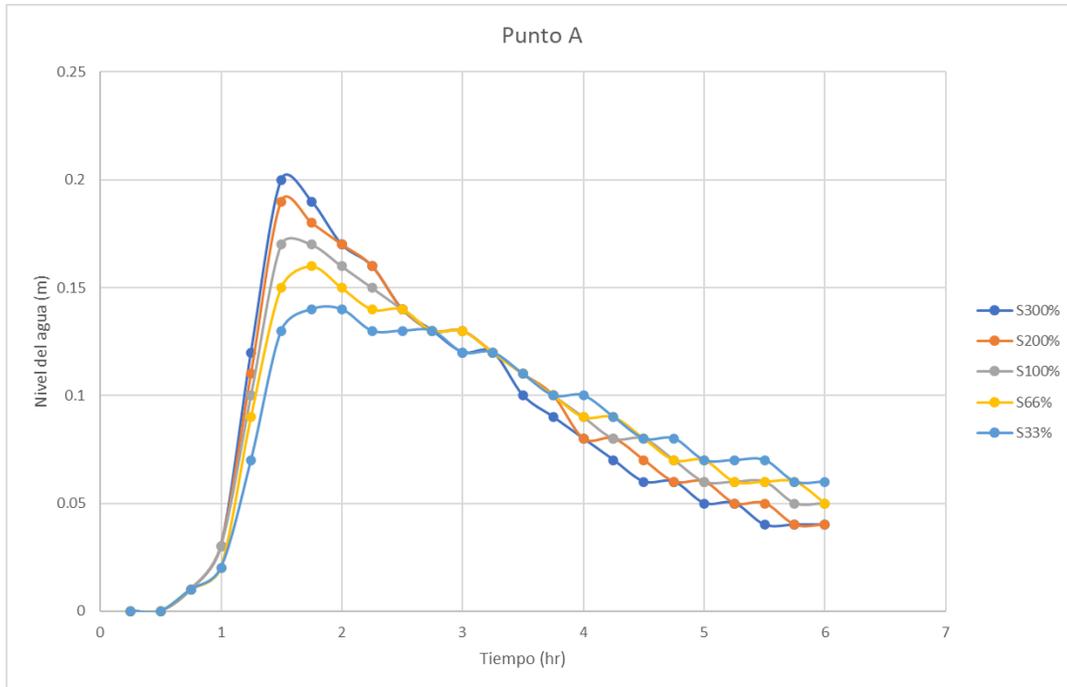


Gráfico 23. Punto A. Limnigrama de factor de pendiente variable.

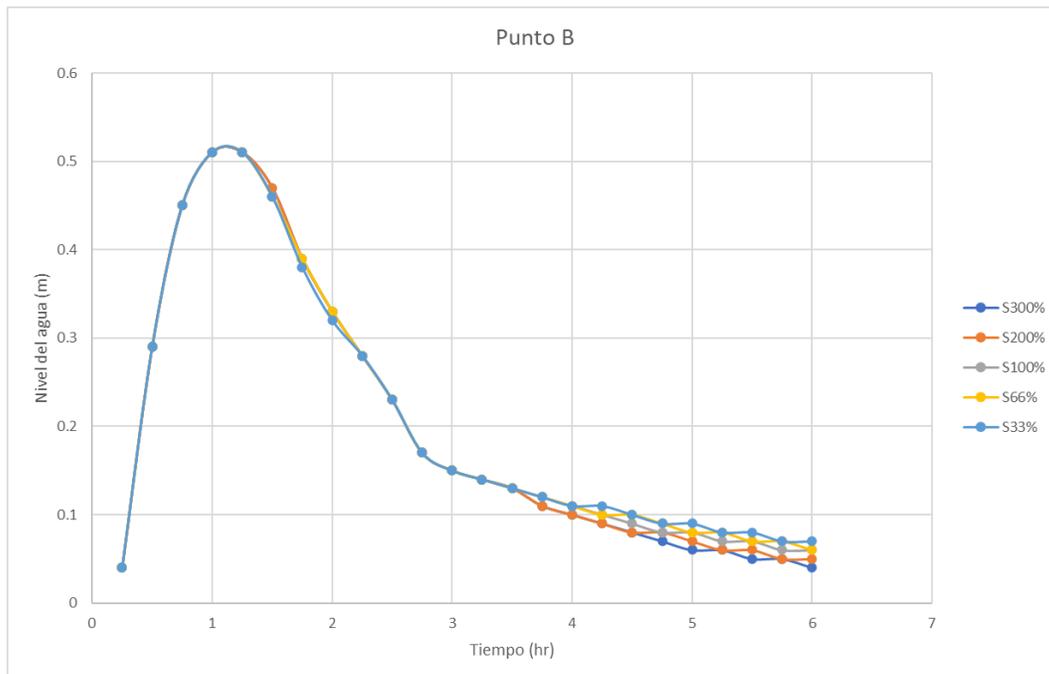


Gráfico 24. Punto B. Limnigrama de factor de pendiente variable.

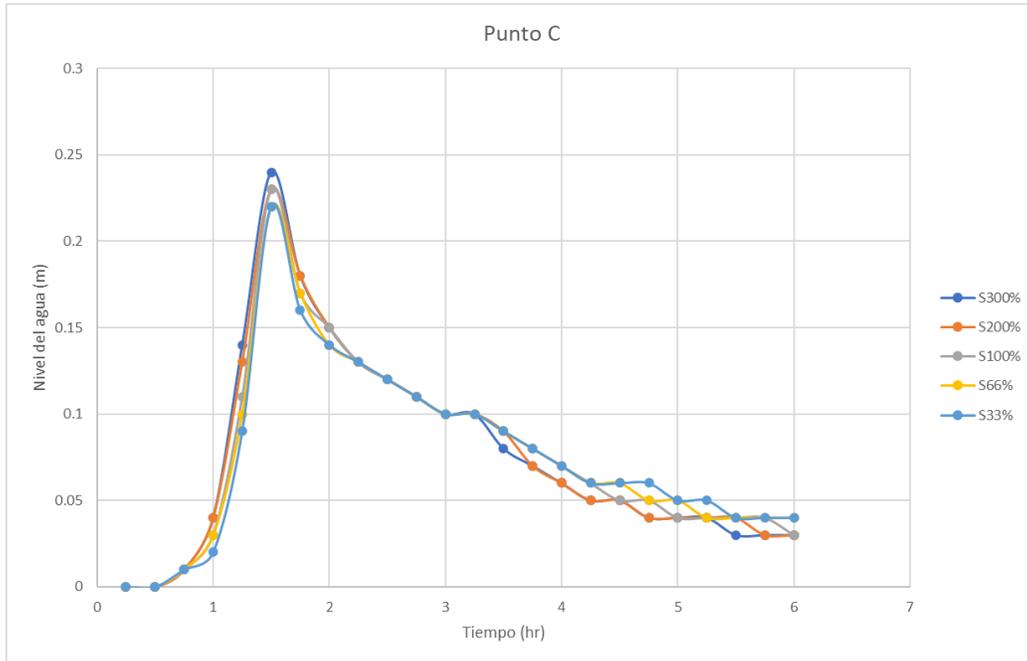


Gráfico 25. Punto C. Limnigrama de factor de pendiente variable.

4.2.1.3 Número de curva variable

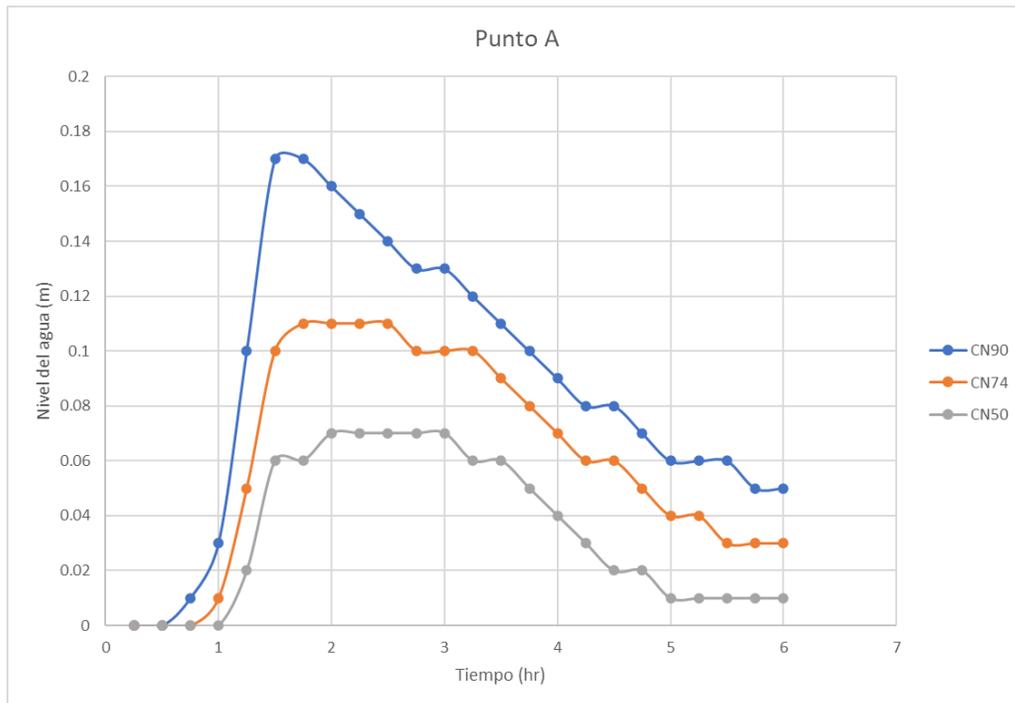


Gráfico 26. Punto A. Limnigrama de número de curva variable.

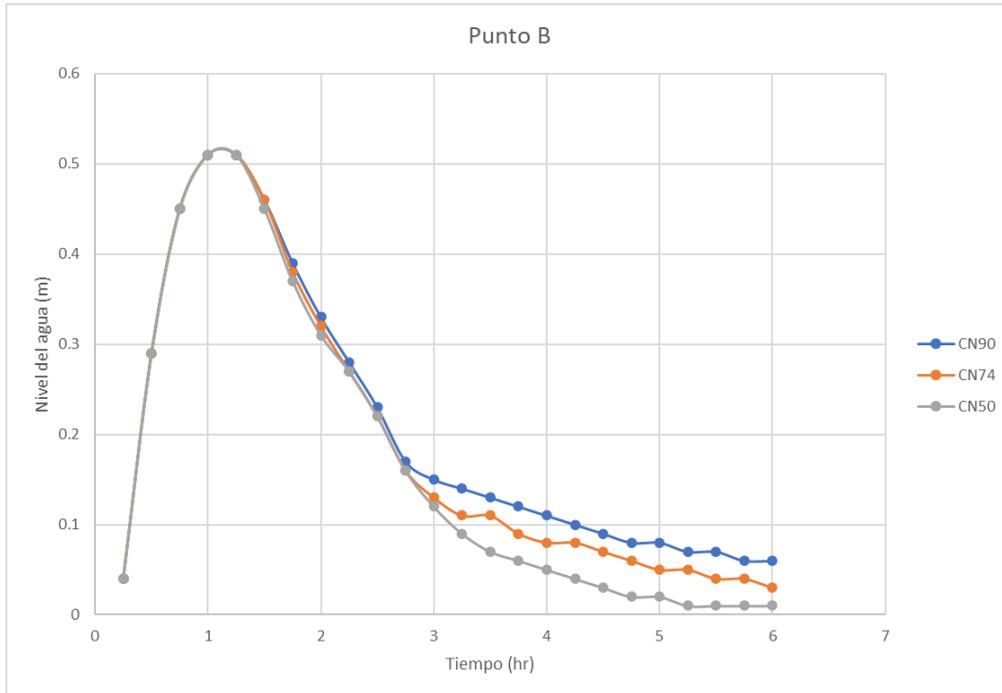


Gráfico 27. Punto B. Limnigrama de número de curva variable.

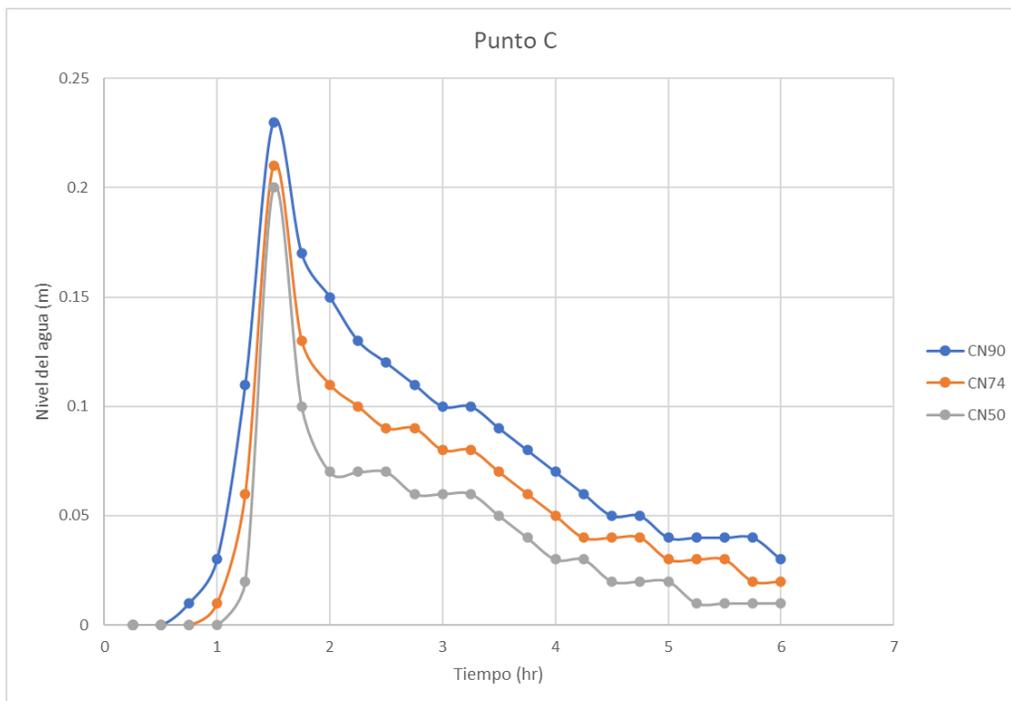


Gráfico 28. Punto C. Limnigrama de número de curva variable.



4.2.1.4 Porcentaje de humedad variable

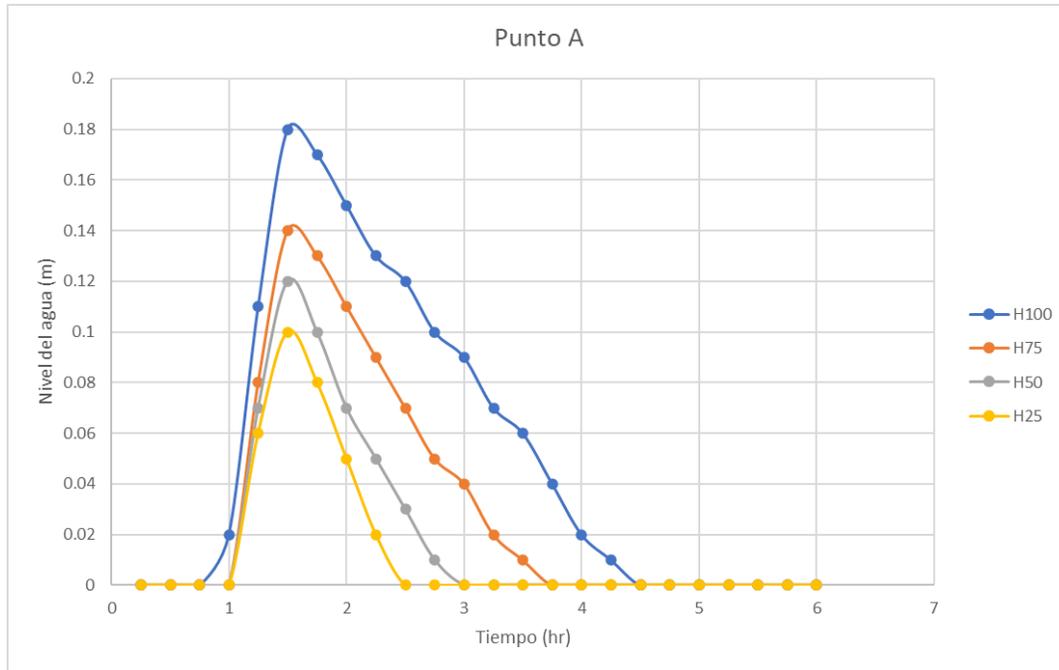


Gráfico 29. Punto A. Limnigrama de porcentaje de humedad variable.

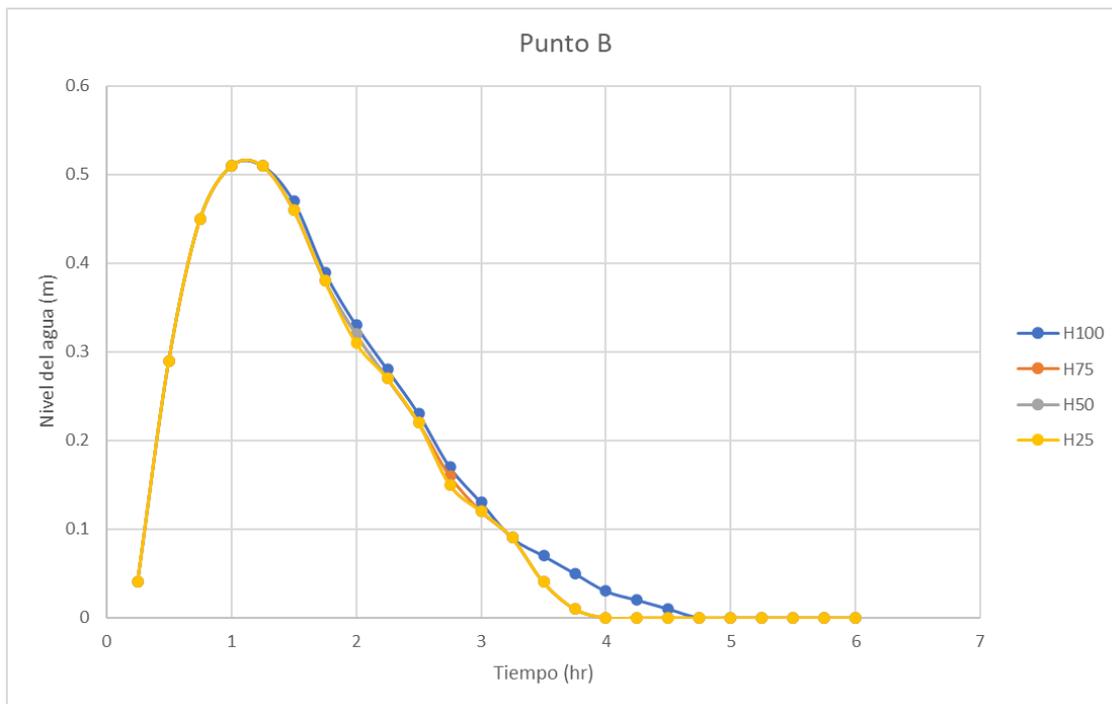


Gráfico 30. Punto B. Limnigrama de porcentaje de humedad variable.

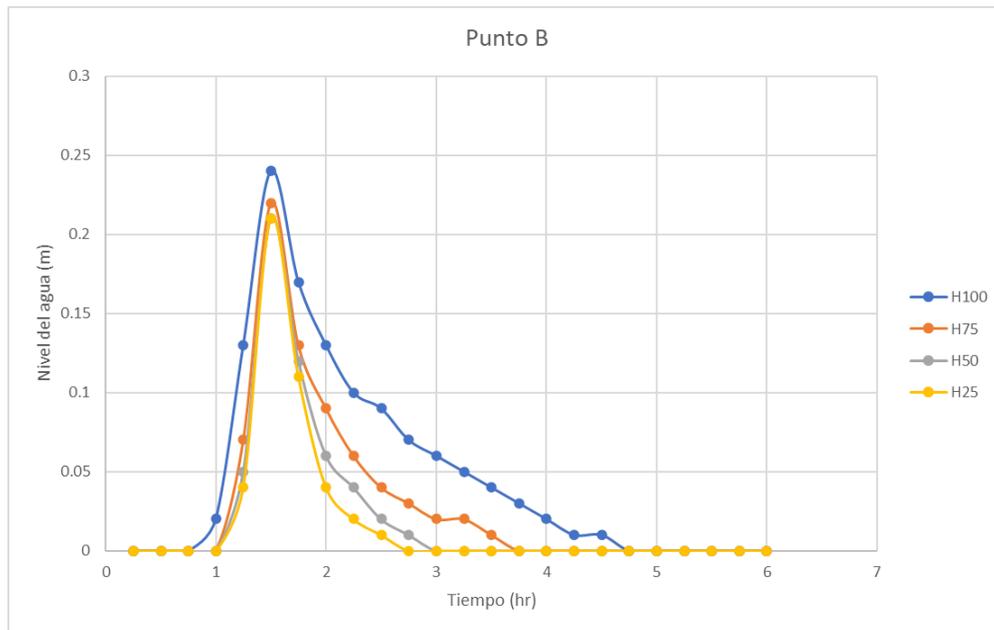


Gráfico 31. Punto C. Limnigrama de porcentaje de humedad variable.

4.2.2 Hidrogramas

4.2.2.1 Impermeabilidad variable

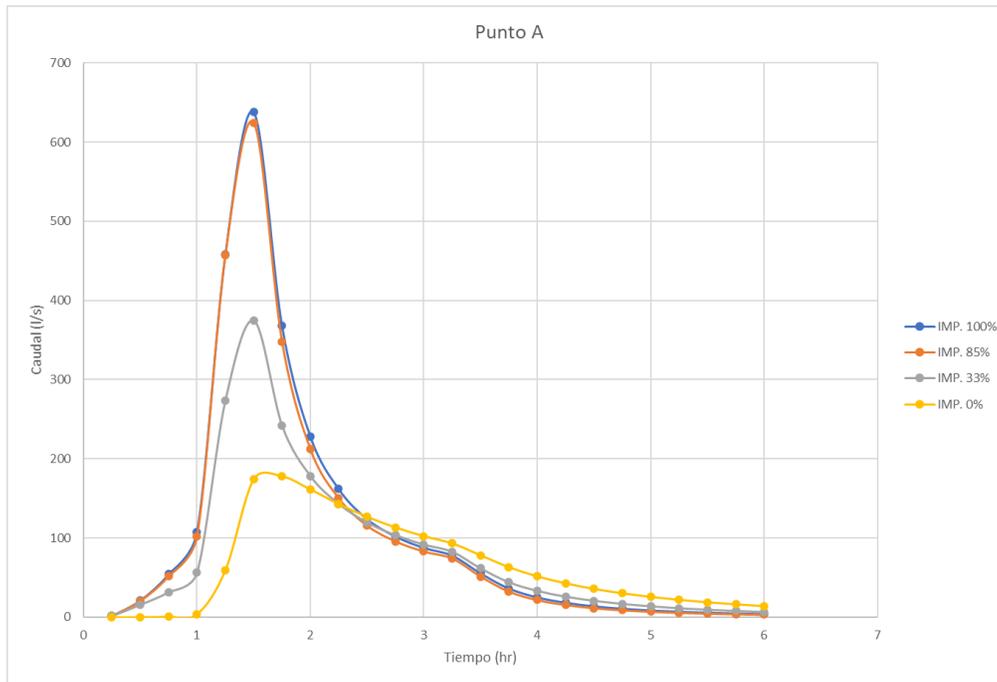


Gráfico 32. Punto A. Hidrograma de impermeabilidad variable.

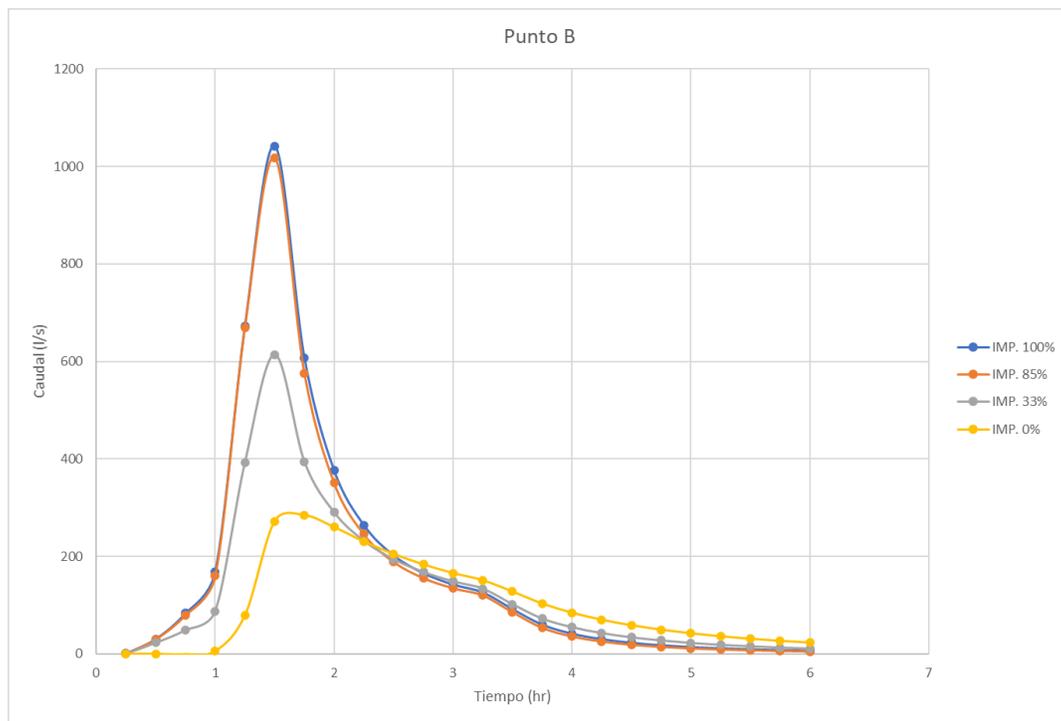


Gráfico 33. Punto B. Hidrograma de impermeabilidad variable.

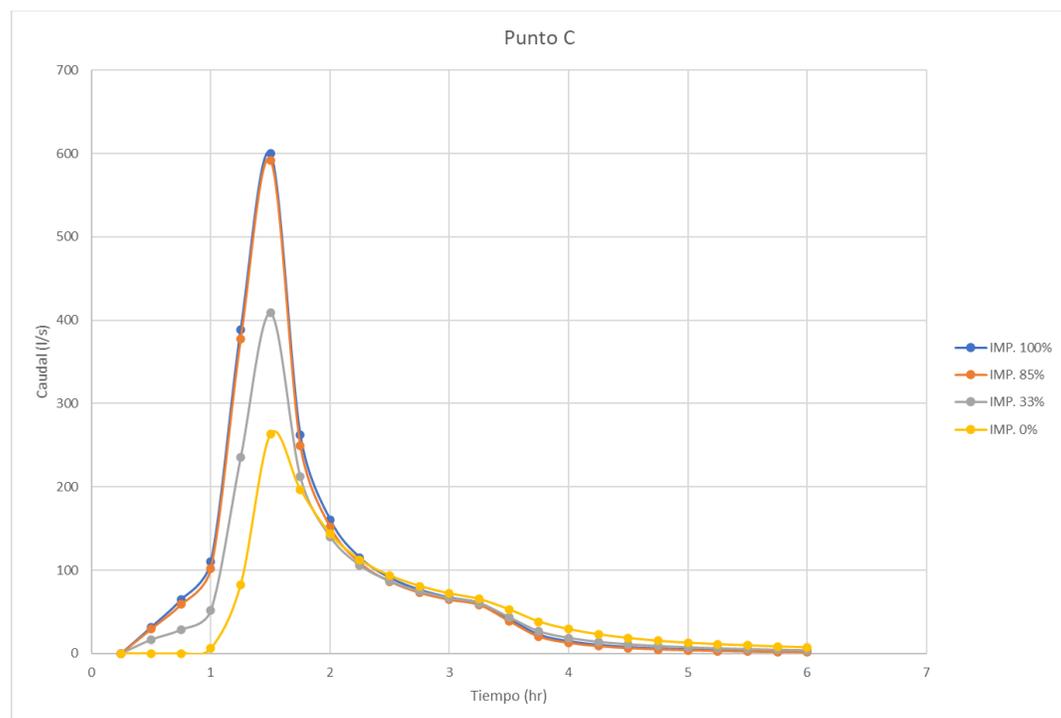


Gráfico 34. Punto C. Hidrograma de impermeabilidad variable.



4.2.2.2 Factor de pendiente variable

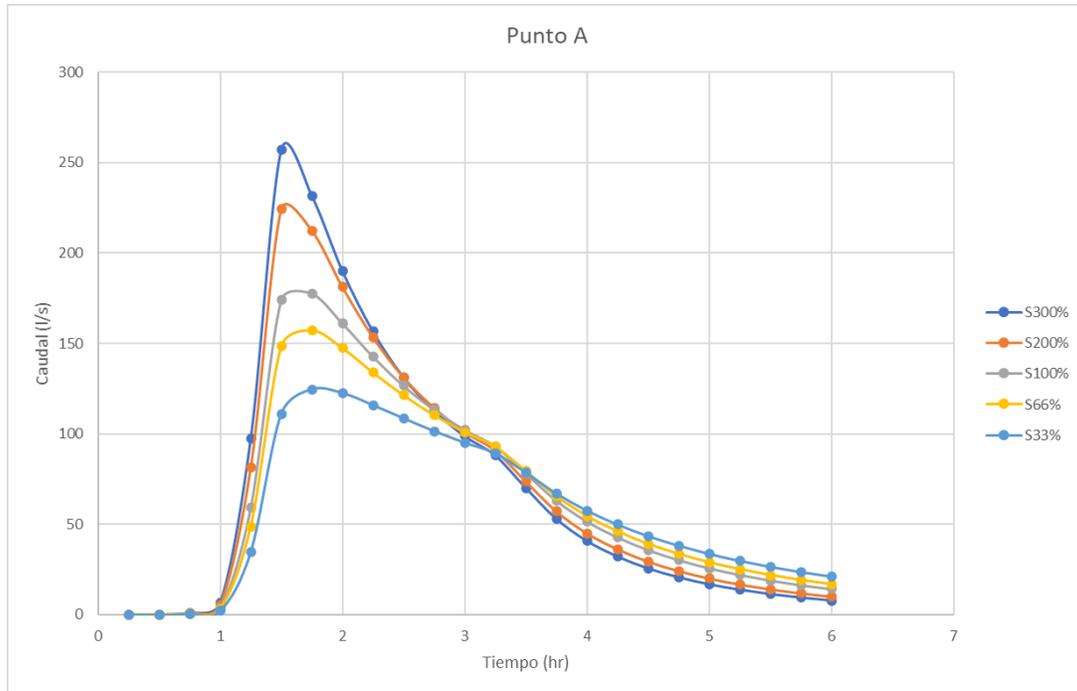


Gráfico 35. Punto A. Hidrograma de factor de pendiente variable.

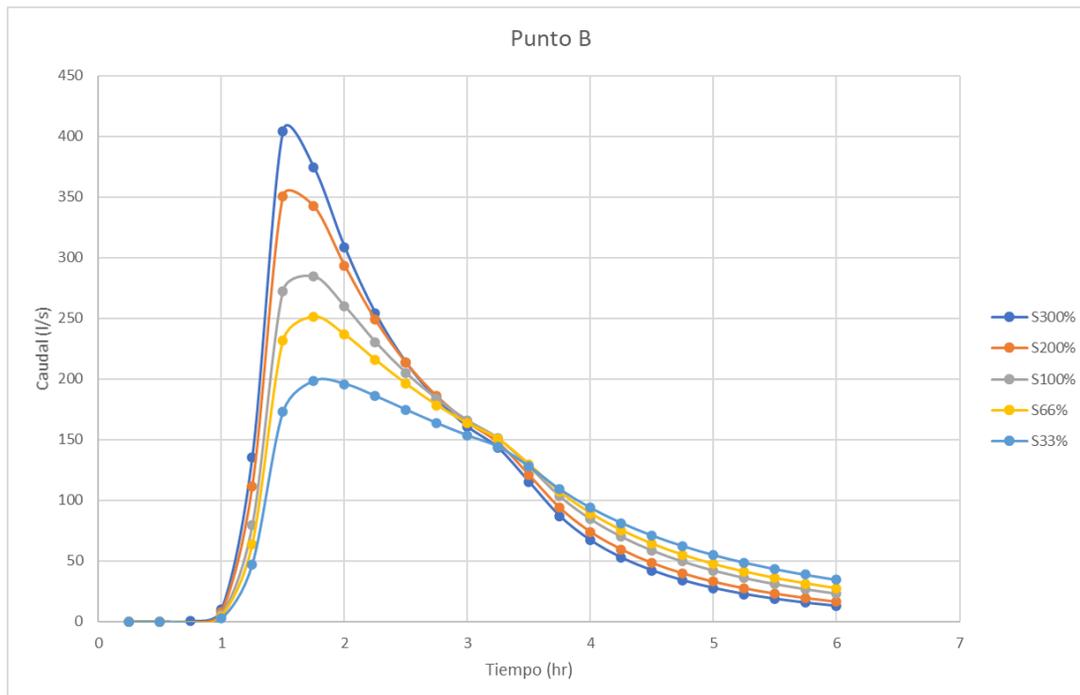


Gráfico 36. Punto B. Hidrograma de factor de pendiente variable.

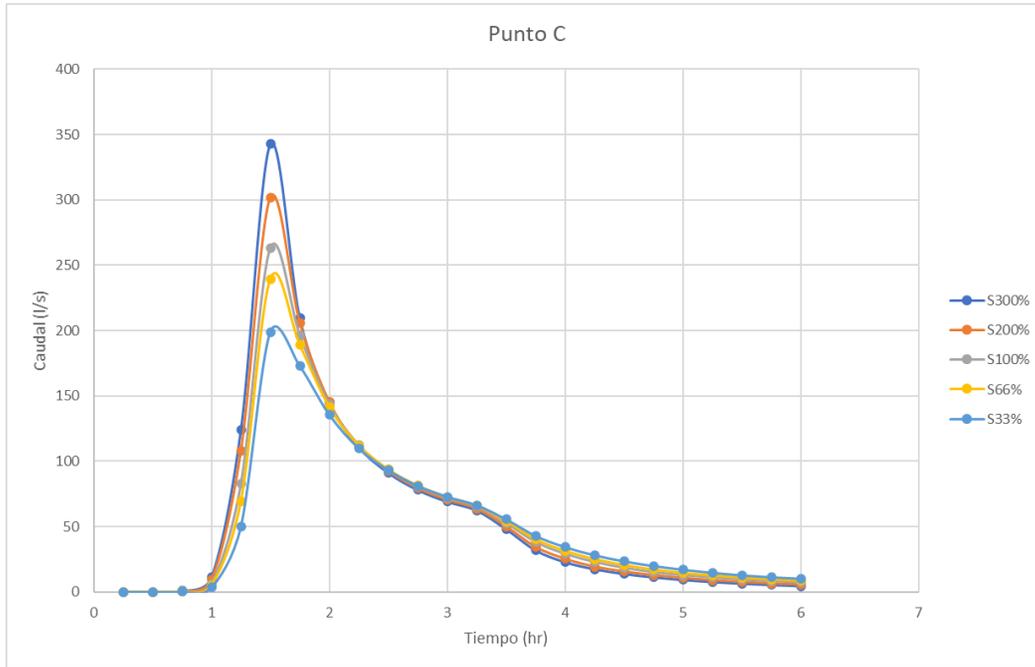


Gráfico 37. Punto C. Hidrograma de factor de pendiente variable.

4.2.2.3 Número de curva variable

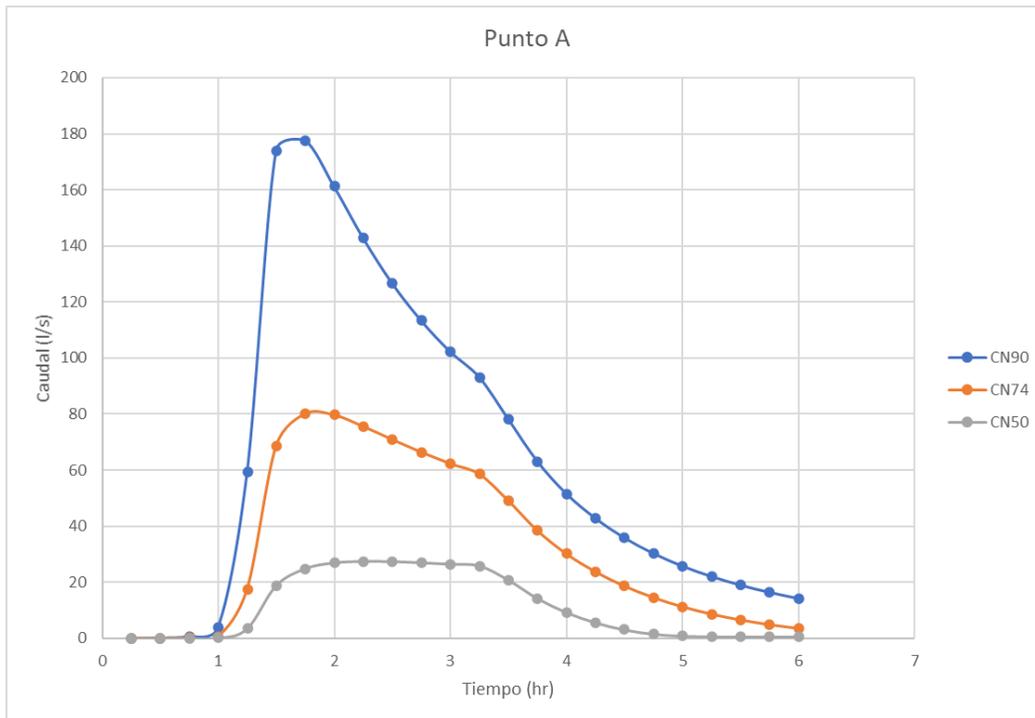


Gráfico 38. Punto A. Hidrograma de número de curva variable.

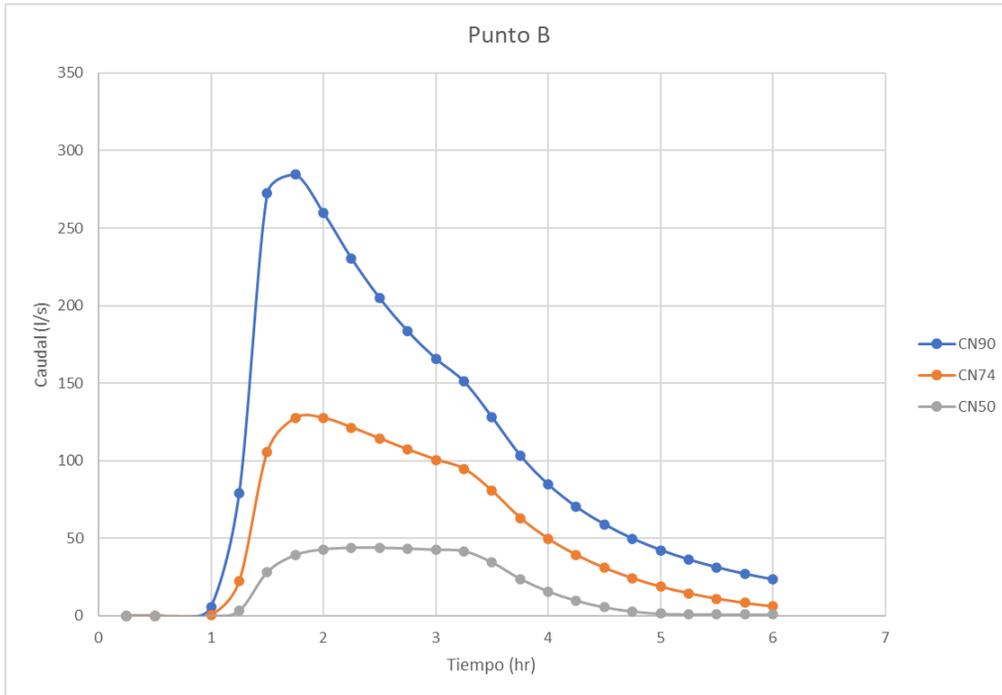


Gráfico 39. Punto B. Hidrograma de número de curva variable.

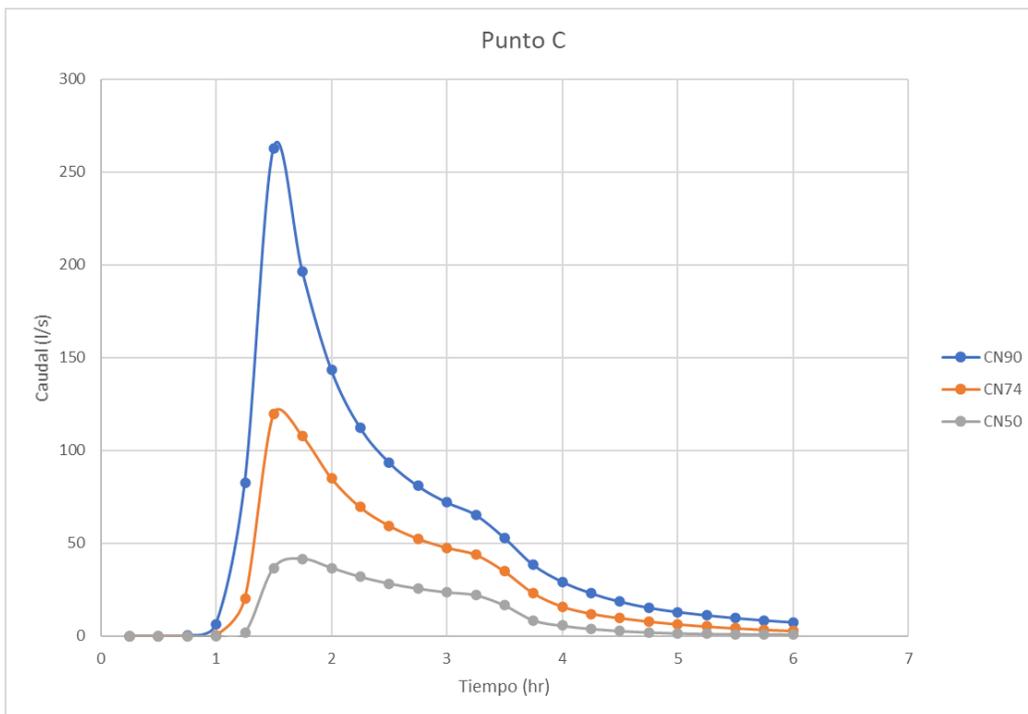


Gráfico 40. Punto C. Hidrograma de número de curva variable.



4.2.2.4 Porcentaje de humedad variable

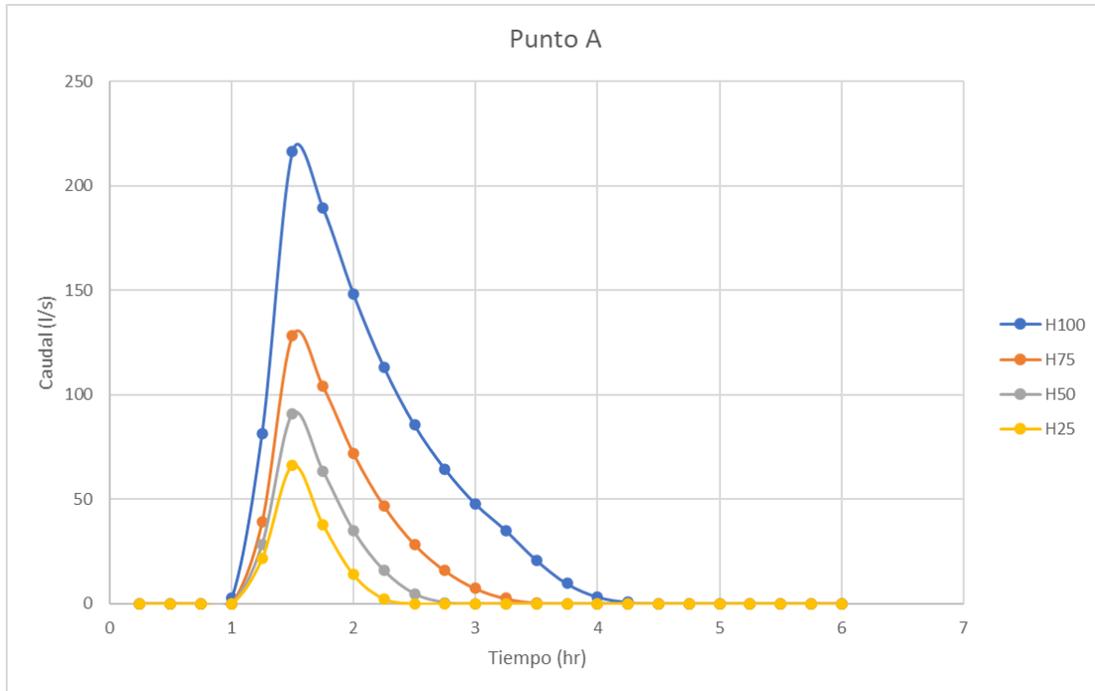


Gráfico 41. Punto A. Hidrograma de porcentaje de humedad variable.

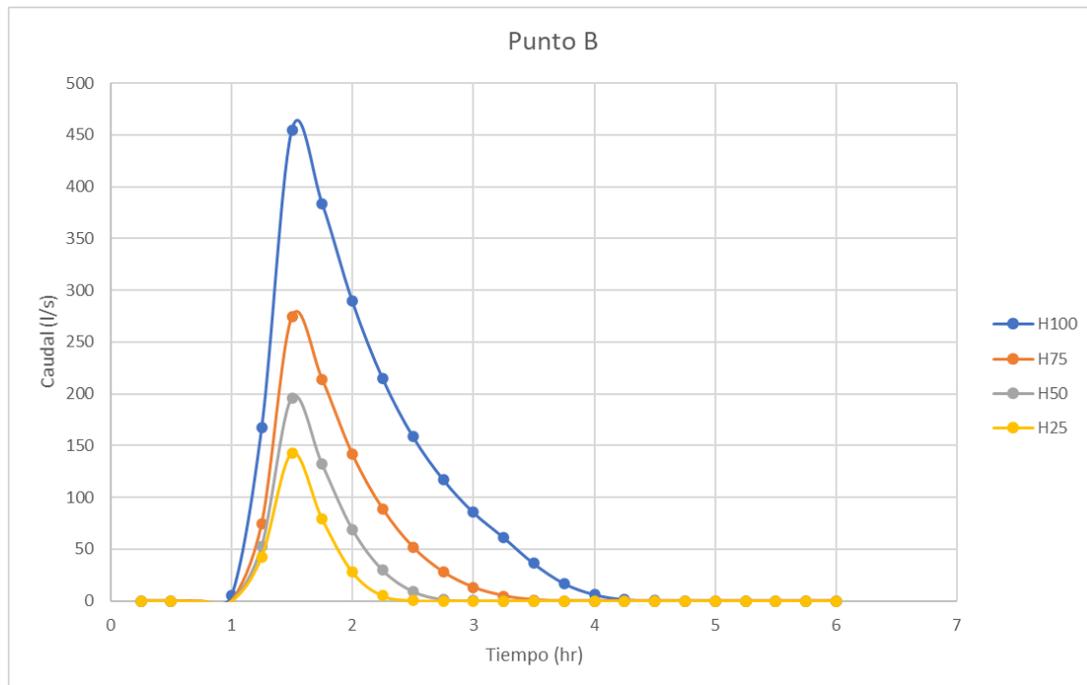


Gráfico 42. Punto B. Hidrograma de porcentaje de humedad variable.

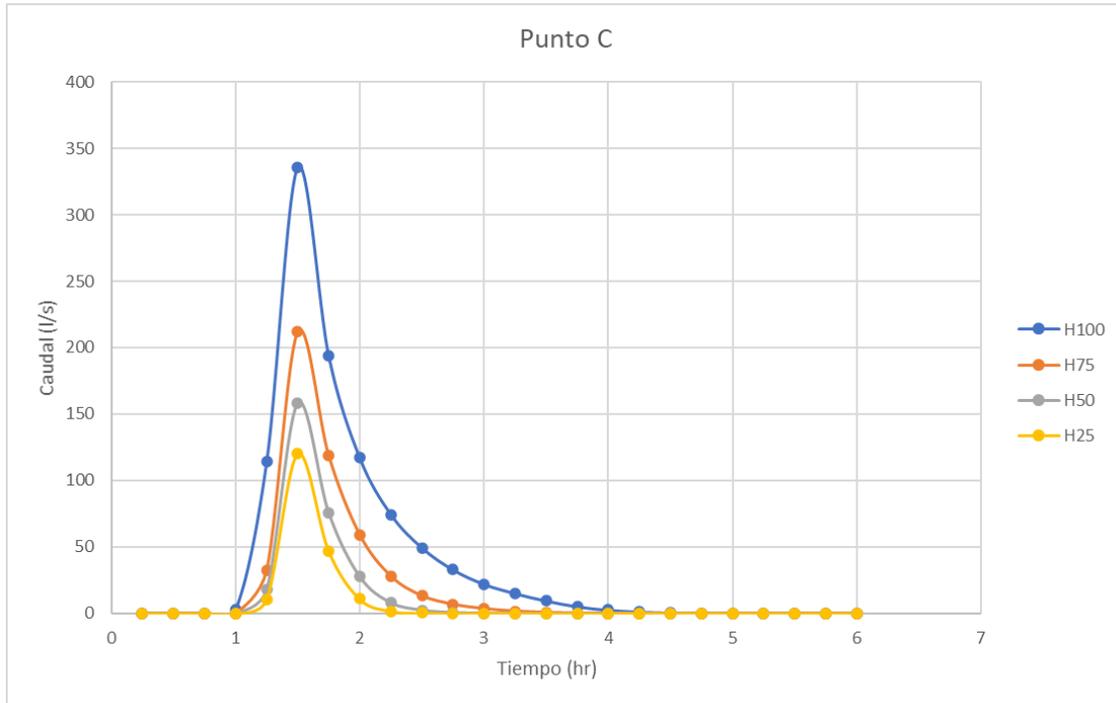


Gráfico 43. Punto C. Hidrograma de porcentaje de humedad variable.



5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Análisis de volumen total captado

El análisis de volumen total captado permite valorar las diferencias en los diferentes planteamientos de combinaciones de parámetros con un único resultado, el volumen. A partir de la observación de los puntos en el plano y su dispersión relativa se identifican las variables más influyentes en la generación de escorrentía. También, se comparan las diferencias entre los puntos de estudio A, B y C.

Para su análisis se definen seis indicadores de dispersión relativa donde el uno representa el valor de menor dispersión y el seis la dispersión máxima. En base a los indicadores se relacionan los parámetros en una tabla y respecto a su dispersión se asigna un nivel entre uno y seis.

La lectura de la tabla sigue el siguiente procedimiento. Los parámetros se denotan por las siglas: impermeabilidad (IMP), factor de pendiente (FP), número de curva (CN), humedad (H). Las variables listadas en las filas corresponden a las que se observa la dispersión dado el caso de las variables de las columnas. Adicionalmente, las variables en las columnas tienen dos coloraciones, rojo para los valores máximos de esa variable y azul para los mínimos.

| | IMP | FP | CN | H |
|-----|-----|----|----|---|
| IMP | | 1 | 1 | 1 |
| IMP | | 2 | 4 | 3 |
| FP | 6 | | 1 | 1 |
| FP | 6 | | 2 | 2 |
| CN | 4 | 1 | | |
| CN | 6 | 1 | | |
| H | 5 | 1 | | |
| H | 6 | 1 | | |

Tabla 14. Relación de dispersión de volumen entre parámetros.

Al interpretar la tabla anterior se encuentra que: la impermeabilidad tiene la mayor dispersión sobre todas las variables solo para números de curva altos y humedades altas la dispersión relativa disminuye, el factor de pendiente tiene la menor dispersión entre todas las variables solo alcanza una dispersión notoria para impermeabilidades bajas, el número de curva llega a mayores dispersiones para impermeabilidad baja y factor de pendiente bajo, comportamiento que comparte la humedad con un poco de mejor dispersión para impermeabilidades bajas.



Por otra parte, se observa el comportamiento entre los diferentes puntos, si bien fueron descritos anteriormente, cabe resaltar que las principales diferencias entre ellos son: el terreno (A) tiene pendientes similares que el (B) pero el (B) tiene una mayor extensión, el terreno (C) es el de menor tamaño, pero tiene pendientes más ligeramente más altas. Mencionadas estas diferencias, se observó en análisis de volumen captado que a mayor extensión de la cuenca los volúmenes máximos incrementan en una mayor proporción que los volúmenes mínimos. También que para la cuenca de mayores pendientes la dispersión por pendiente decrece.

Las relaciones entre parámetros más representativas observadas son cuando: la impermeabilidad alcanza su dispersión mínima para los números de curva altos, el factor de pendiente alcanza su dispersión máxima para las impermeabilidades mínimas, y tanto el número de curva como la humedad alcanzan su máximo en impermeabilidades mínimas. Las combinaciones mencionadas anteriormente, se representan en los hidrogramas y limnigramas para el siguiente análisis.

5.2 Análisis de hidrogramas y limnigramas

Gracias a los resultados de volumen total captado, se identificaron las relaciones entre los parámetros que aumentan la dispersión del parámetro a estudiado. Dadas estas condiciones que aumentan la dispersión, se generaron los hidrogramas y limnigramas cuyo análisis se presenta en la siguiente sección.

- Impermeabilidad variable

A medida que se reduce la impermeabilidad el pico de caudal se alcanza minutos más tarde, sin embargo, este aumento en el tiempo entre la máxima y la mínima no supera los diez minutos. También, en todos los casos el pico para bajas impermeabilidades se aplanan y en tiempos tardíos de la simulación tiene mayores caudales. Al comparar el comportamiento entre los diferentes puntos de análisis, se observa que entre mayor es la extensión de la cuenca mayor es la tendencia a aplanar el pico de caudal generado o nivel para el caso de los limnigramas.

- Factor de pendiente variable

Al observar los hidrogramas se identifica claramente un punto en el tiempo, donde los caudales generados por el terreno más plano son mayores que los de terrenos inclinados, para los tiempos anteriores prevalece la tendencia del caudal más alto para el terreno más inclinado. Respecto a la morfología de los picos, la tendencia a aplanarse se da para los terrenos más planos. Para el caso de los limnigramas se da el mismo comportamiento, sin embargo, no se define un punto exacto de intersección en tiempos tardíos oscilan sus valores.

- Número de curva variable



Para el caso del número de curva, los caudales para los valores más altos prevalecen mayores durante toda la simulación, los picos de caudal tienen un ligero desfase temporal hacia tiempos más tardíos para valores bajos de número de curva. El efecto que aplanar los picos para valores bajos es bastante notorio para este caso, dado el número de curva con un valor de 50 el caudal pico permanece casi constante durante una hora y media. Al comparar entre los diferentes puntos el punto de menor área y mayor pendiente tiende menos a aplanar el pico de caudal.

- Humedad variable

Para la humedad el suelo los valores máximos prevalecen con un mayor caudal durante toda la simulación. El pico de caudal tiene un efecto de aceleración previa al pico para valores altos, sin embargo, la tendencia a aplazarse de los picos no se presenta. La caída del pico de caudal tiene pendientes casi iguales para todos los valores, dada la humedad mínima la simulación prevalece en cero durante la mayor parte de la simulación.

- Observaciones globales entre puntos de estudio

Cabe resaltar que en el análisis particular de cada variable se especifica cuando se observa un comportamiento anómalo entre los diferentes puntos en relación con el parámetro en estudio. Ahora bien, se observa que para todos los limnigramas del punto de análisis B los picos de nivel ante la variación del parámetro en estudio se unen para mantener un nivel constante, al observar este fenómeno se acude al modelo para identificar el motivo de su ocurrencia. La salida del punto de análisis está conectada aguas abajo con un canal que para el pico de la tormenta su nivel es superior al de la tubería de salida de la red en estudio por esta circunstancia se presenta este fenómeno en los limnigramas. Por otra parte, se observa que para la cuenca de menor extensión la tendencia a planar los picos se reduce para todos los casos a excepción de el evaluó de la humedad, donde la morfología del pico se conserva entre los diferentes valores.



6 CONCLUSIONES

En la implementación del método EPASWMM Runoff se establece que la impermeabilidad es el parámetro más determinante en el aumento de la generación de escorrentía. También, es el parámetro que restringe en mayor proporción la variación de los demás parámetros estudiados.

Las variaciones de pendiente de las cuencas no generan cambios significativos en la generación de escorrentía, sin embargo, para terrenos muy planos causan un efecto de remanso donde la amortiguación del pico se extiende durante toda la simulación.

La reducción del número de curva amortigua los picos casi hasta mantener un caudal pico constante, esta reducción se da para una menor extensión temporal que la ocasionada por el efecto de remanso de la pendiente.

El método del SCS tiene implícitamente una consideración de la impermeabilidad, usarlo en conjunto con el método de escorrentía EPASWMM Runoff para zonas de impermeabilidad alta tiende a ocasionar un aumento en la escorrentía generada al compararlo con la implantación del método Green and Ampt ante las mismas condiciones.

La variación de la humedad disponible en el suelo corta el hidrograma horizontalmente conservando la morfología de picos y reduciendo el caudal a medida que disminuye.

Los estudios específicos del suelo para la implantación del método Green and Ampt son muy costosos, mientras que la selección del número de curva puede hacerse con poca información de partida. Sin embargo, existen estudios donde se simplifica la selección de los parámetros del método Green and Ampt, pero todos ellos con desviaciones muestrales significativas.

Para un número de curva alto y un terreno totalmente permeable, se esperaban caudales más altos de los obtenidos, considerando la impermeabilidad implícita del método. A partir de lo anterior se puede concluir que no es una buena práctica considerar la impermeabilidad implícita del método, al compararla con la impermeabilidad simulada sus valores alcanzan a llegar a un orden de magnitud menor.

El sistema de drenaje no llega al rebosamiento de las cámaras incluso para casos de diseño más crítico que el caso de diseño, sin embargo, la presurización de algunas tuberías se da en el sistema para el caso de diseño y los casos más críticos planteados.



7 REFERENCIAS

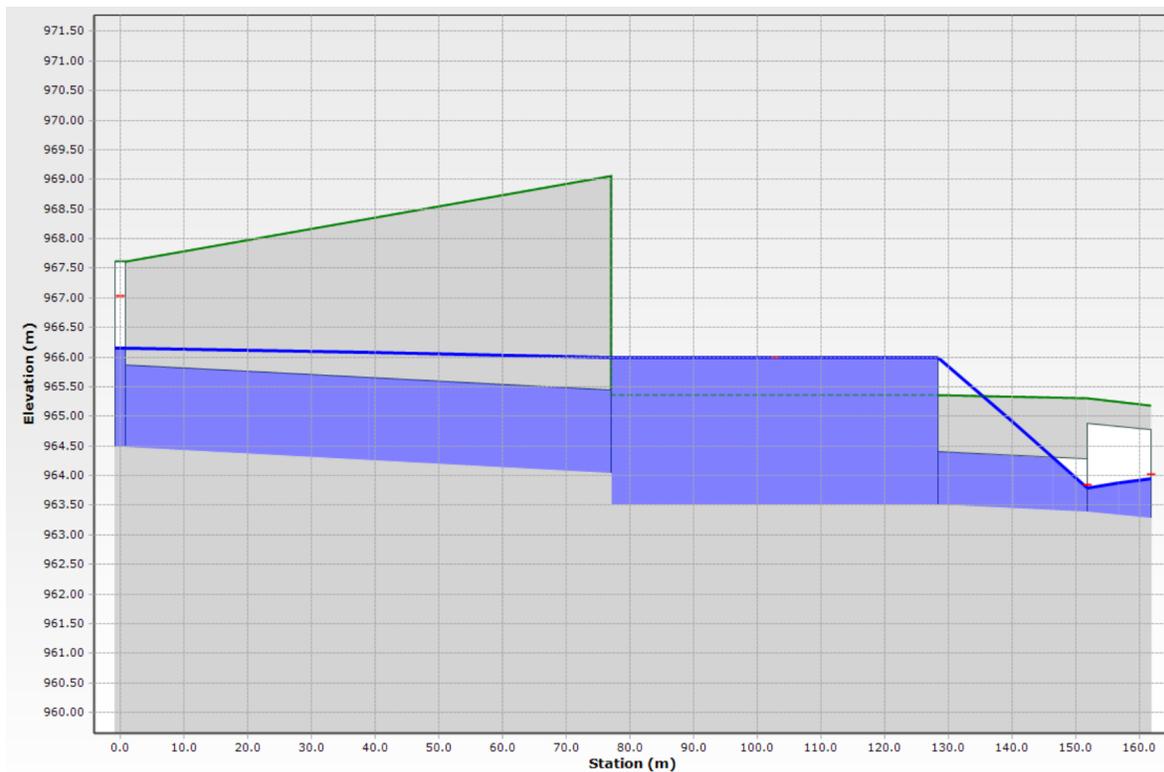
- Constructura, J. M. (2020). *JaramilloMora*. Obtenido de <https://www.jaramillomora.com/>
- Cronshey, R., McCuen, R. H., Miller, N., & Robbins, S. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds TR55*. Washinton DC.: Natural Resources Conservation Service.
- Groenendyk, D. G., Ferré, T. P., Thorp, K. R., & Rice, A. K. (2015). Hydrologic-Process-Based Soil Texture Classifications for Improved Visualization of Landscape Function. *PLoS ONE*, 1-17.
- Gutiérrez, C. G., Pachepsky, Y., & Martín, M. Á. (2018). Technical note: Saturated hydraulic conductivity and textural heterogeneity of soils. *Hydrology and Earth System Sciences*, 3923-3932.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Miller, N. (1983). GREEN-AMPT INFILTRATION PARAMETERS FROM SOILS DATA. *Journal of Hydraulic Engineering*, 62-70.
- Rossmann, L. A., & Huber, W. (2016, January). Storm Water Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology. Cincinnati, United States.
- Figura 1. Diagrama de flujo general del modelo EPASWMM Runoff. Adaptado de “Storm Water Management Model Reference Manual”, por L.A. Lewis & W. Huber, Volume I Hydrology. P. 20.
- Figura 2. Diagrama de bloque de la transición de estados de SWMM. Tomado de “Storm Water Management Model Reference Manual”, por L.A. Lewis & W. Huber, Volume I Hydrology. P. 22.
- Figura 3. Diagrama de modelo de almacenamiento no lineal. Tomado de “Storm Water Management Model Reference Manual”, por L.A. Lewis & W. Huber, Volume I Hydrology. P. 52.
- Figura 4. Triangulo textural USDA. Tomado de “Hydrologic-Process-Based Soil Texture Classifications for Improved Visualization of Landscape Function.”, por Groenendyk, D. G., Ferré, T. P., Thorp, K. R., & Rice, A. K., PLoS ONE 10(6). P. 3.
- Figura 5. Descripción estadística de la conductividad hidráulica saturada. Tomado de “Saturated hydraulic conductivity and textural heterogeneity of soils. Por Gutiérrez, C. G., Pachepsky, Y., & Martín, M. Á. *Hydrology and Earth System Sciences*. P. 3925.
- Figura 6. Imagen del urbanismo de la etapa Málaga. Tomado de “Constructora Jaramillo Mora “. www.jaramillomora.com.



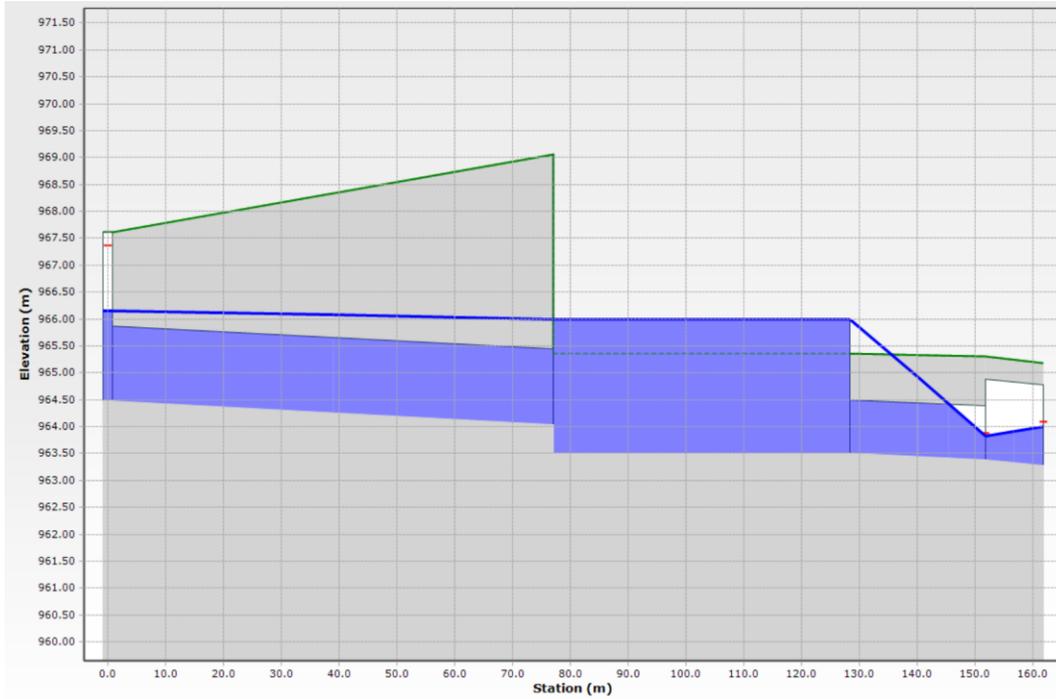
8 ANEXOS

8.1 Anexo A. Diseño tubería de salida laguna de regulación.

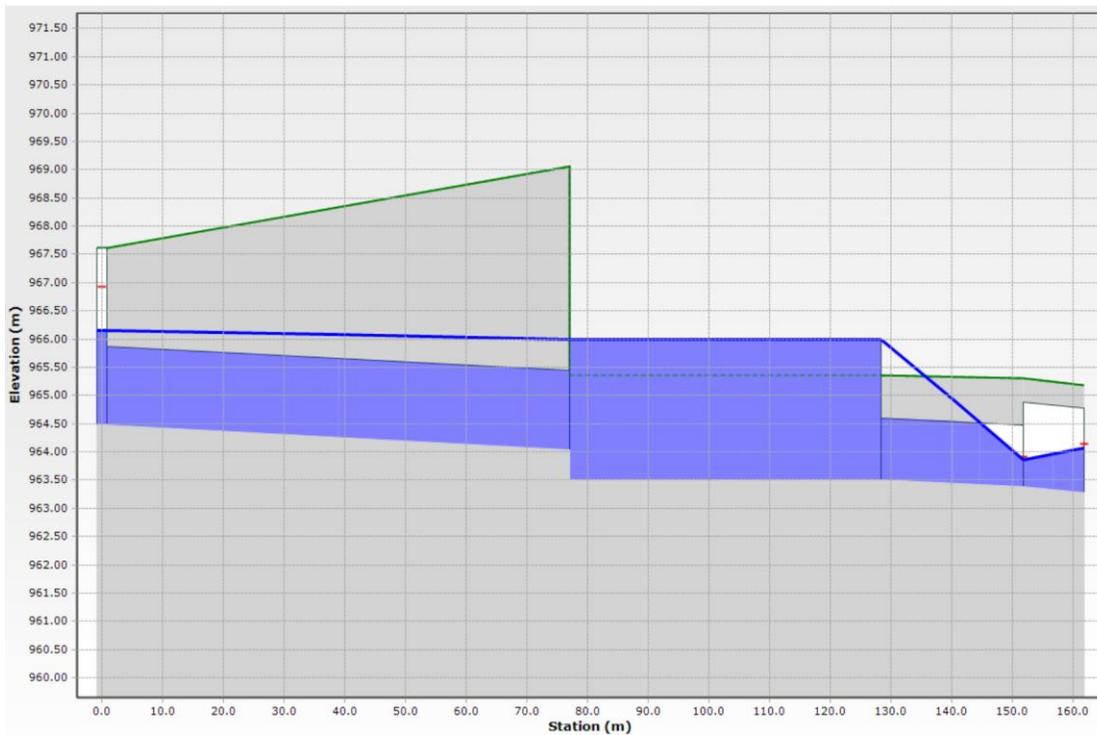
Para concluir el modelo se requería realizar el dimensionamiento de la tubería de salida de la laguna de regulación. El diseño se realiza sobre el modelo partiendo de una tubería de 900mm en ese tramo y dependiendo del nivel observado en la laguna se opta por aumentar o disminuir ese diámetro. A continuación, se presenta el perfil de la laguna para el momento más crítico de la tormenta, dados los diámetros implementados en el diseño.



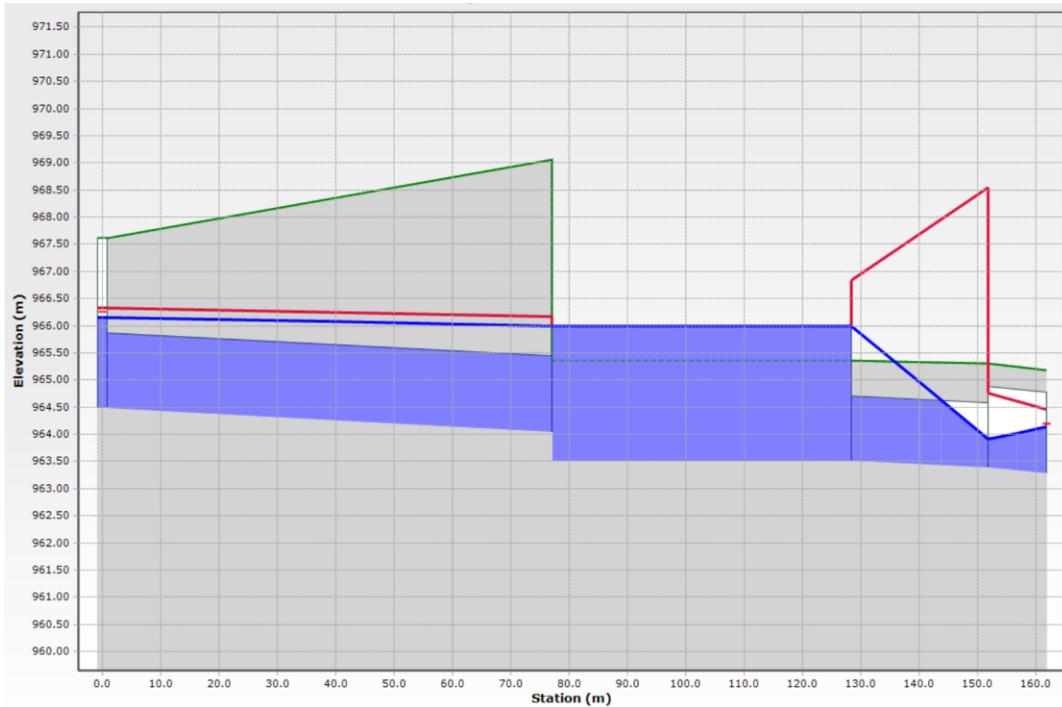
Perfil laguna de regulación tubería 900mm.



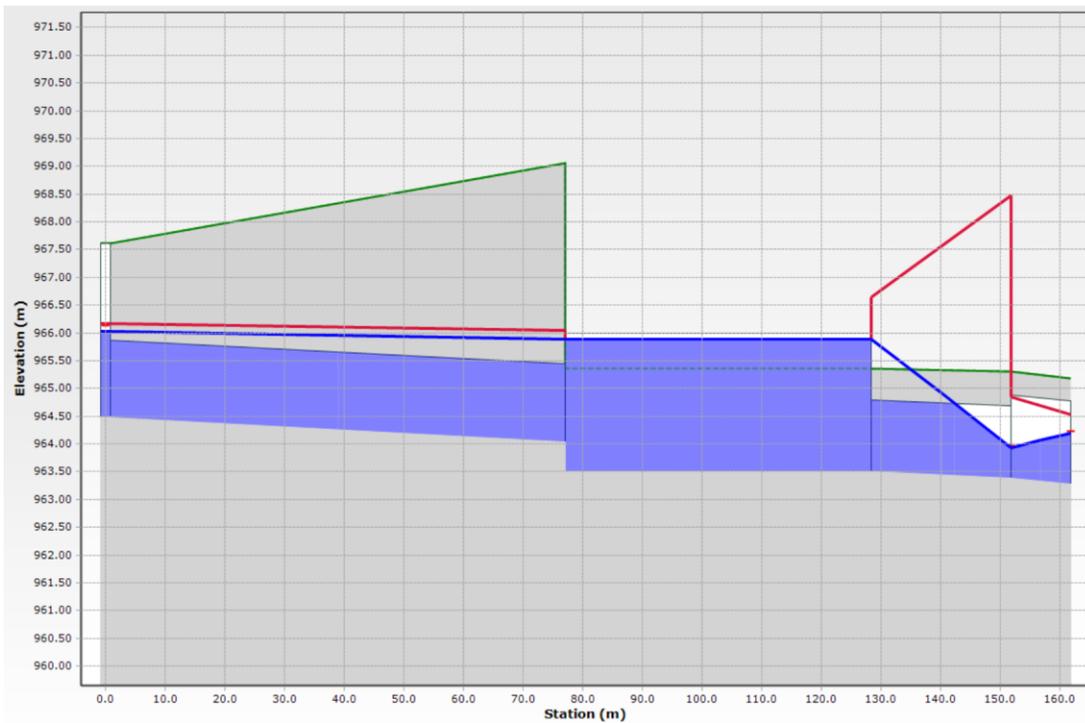
Perfil laguna de regulación tubería 1000mm.



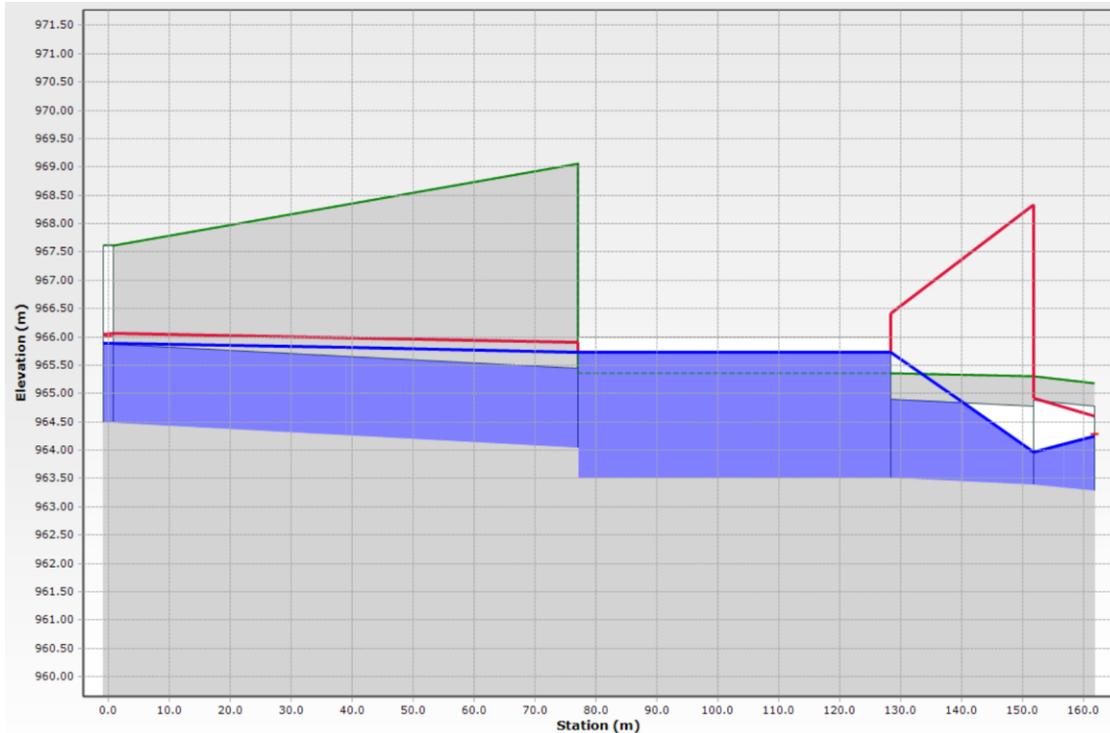
Perfil laguna de regulación tubería 1100mm.



Perfil laguna de regulación tubería 1200mm.



Perfil laguna de regulación tubería 1300mm.

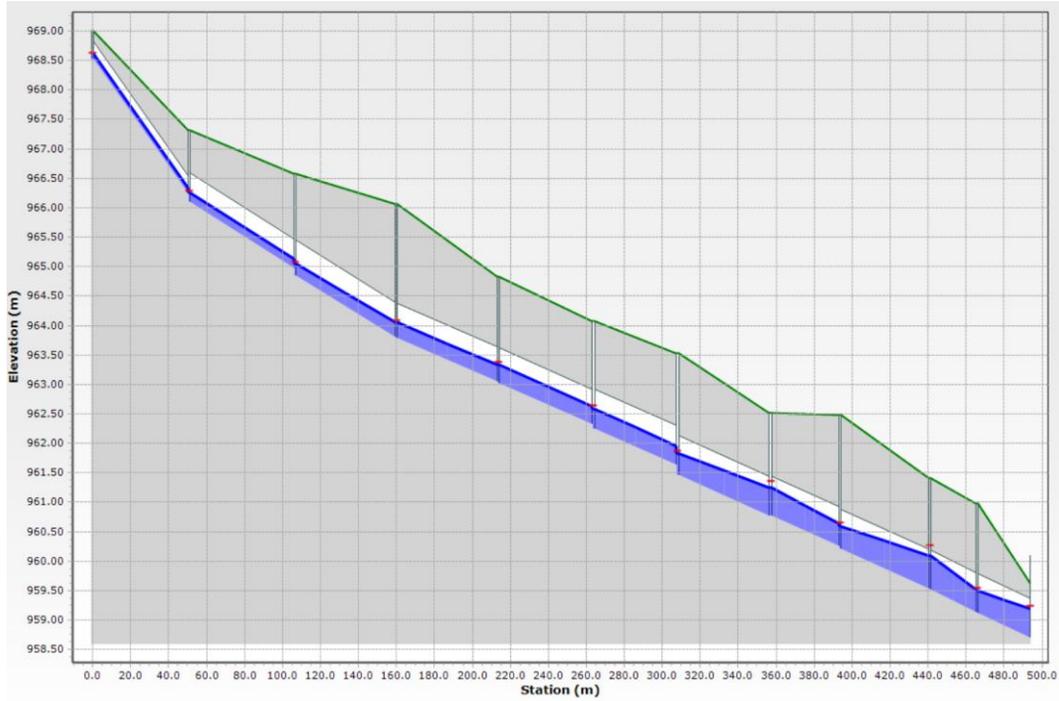


Perfil laguna de regulación tubería 1400mm.

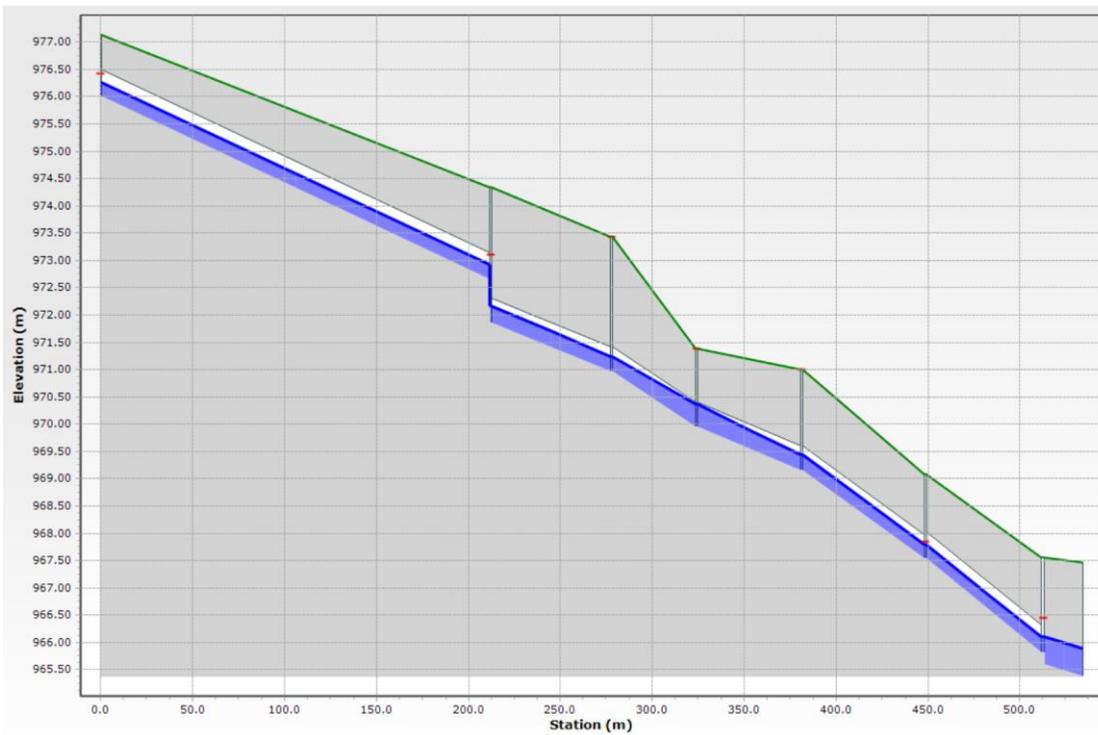
Finalmente, la tubería de 1400mm es aquella que no supera el nivel máximo para el caso de lluvia dado. Adicionalmente, en la obra in situ se diseña una tubería de mayor diámetro para que opere en paralelo evacuando toda el agua de la laguna dado el caso de rebosamiento.

8.2 Anexo B. Perfiles característicos del modelo.

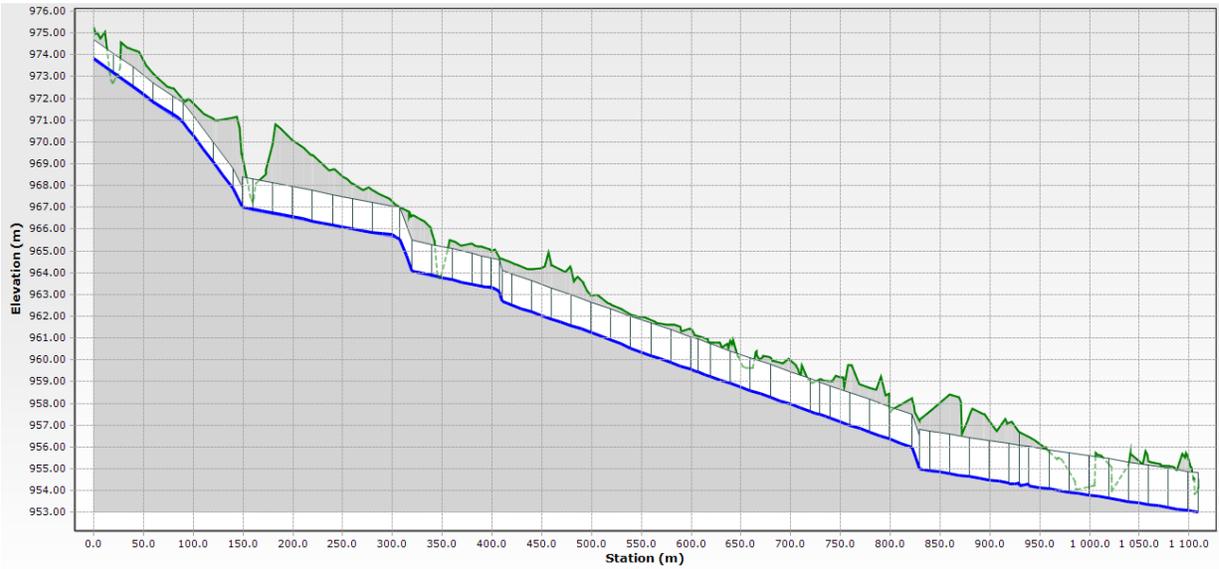
En esta sección se presentan los perfiles de los puntos llevados al análisis en el documento y adicionalmente otros perfiles del modelo donde los puntos de análisis entregan sus aguas.



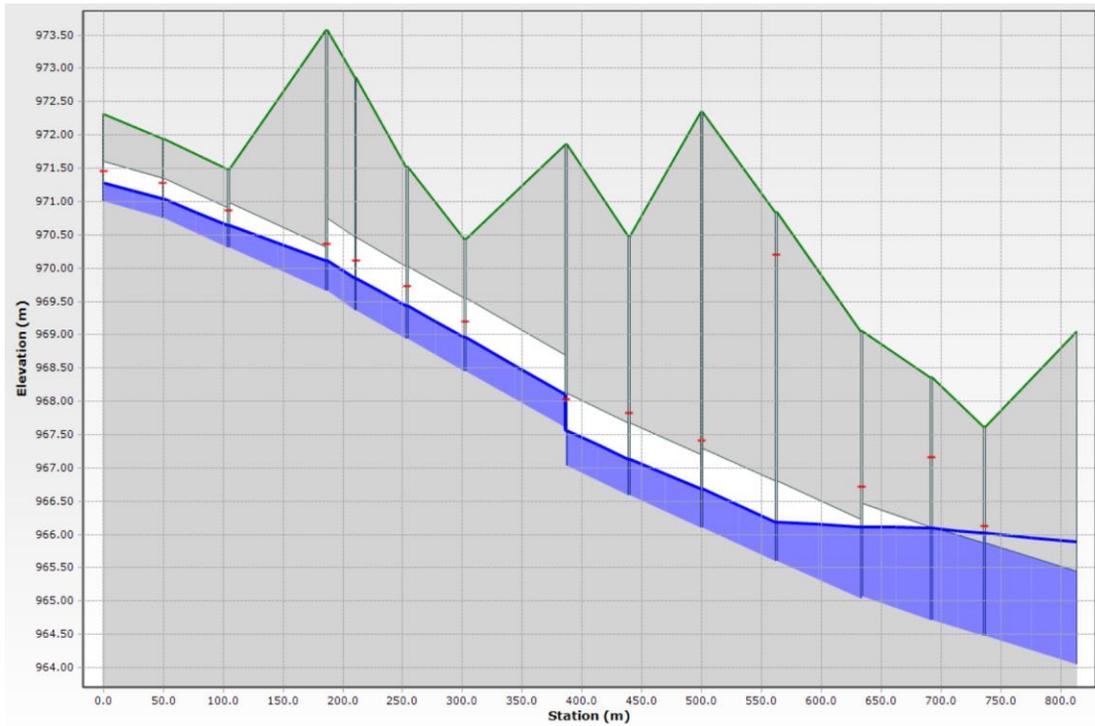
Perfil Red de drenaje Punto A y B.



Perfil Red de drenaje Punto C.



Perfil Canal de drenaje principal.



Perfil Red entrada laguna sur.



Universidad de
los Andes

Universidad de los Andes

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA

Análisis de sensibilidad de la caracterización hidrológica de una red de drenaje urbano.

ICYA-2020-1

