

Estudio de **amenazas hidráulicas** en la llanura de inundación de la **cuenca del Río Bogotá**

<https://github.com/rcfdtools/R.HydroBogota>



Para la localización y caracterización de las zonas riesgo por inundación en la llanura y los asentamientos humanos localizados de la cuenca hidrográfica del Río Bogotá, producidas por fenómenos lluvia-escorrentía o por el fallo o colapso de infraestructura hidráulica, **es necesario realizar la delimitación de la ronda hídrica de los ríos, canales y cuerpos de agua** del sistema de drenaje.

Amenaza + Vulnerabilidad = Riesgo

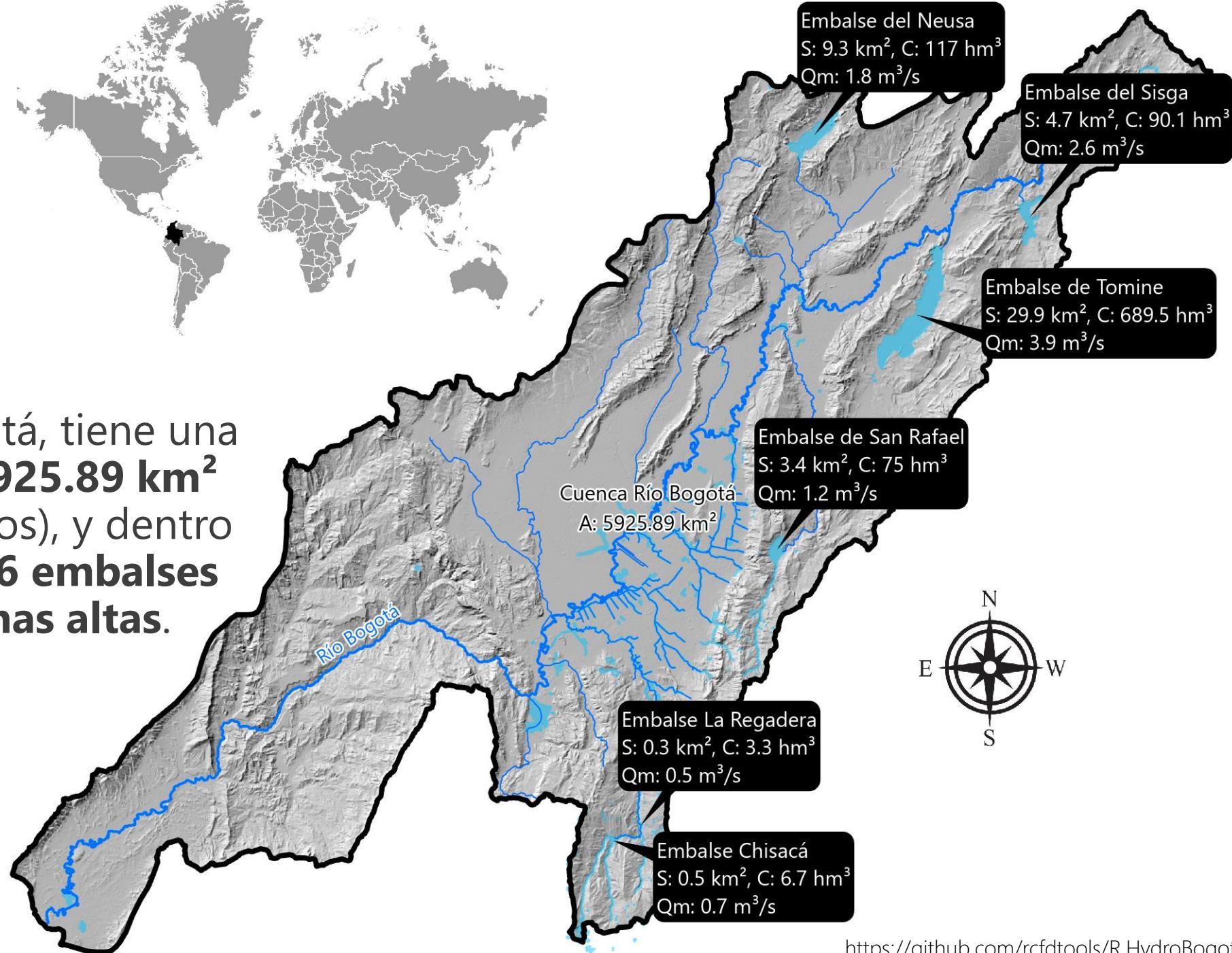
Contenido

- 1** Introducción
- 2** Modelo digital de elevación híbrido
- 3** Red de drenaje urbana y rural
- 4** Mapa de suelos y grupos hidrológicos
- 5** Mapa de usos del suelo y rugosidades
- 6** Simulación hidráulica bidimensional
- 7** Análisis de resultados
- 8** Conclusiones

1

Introducción

La cuenca del Río Bogotá, tiene una extensión planar de **5925.89 km²** (5932.79 km² geodésicos), y dentro de ella se encuentran **6 embalses reguladores en zonas altas**.



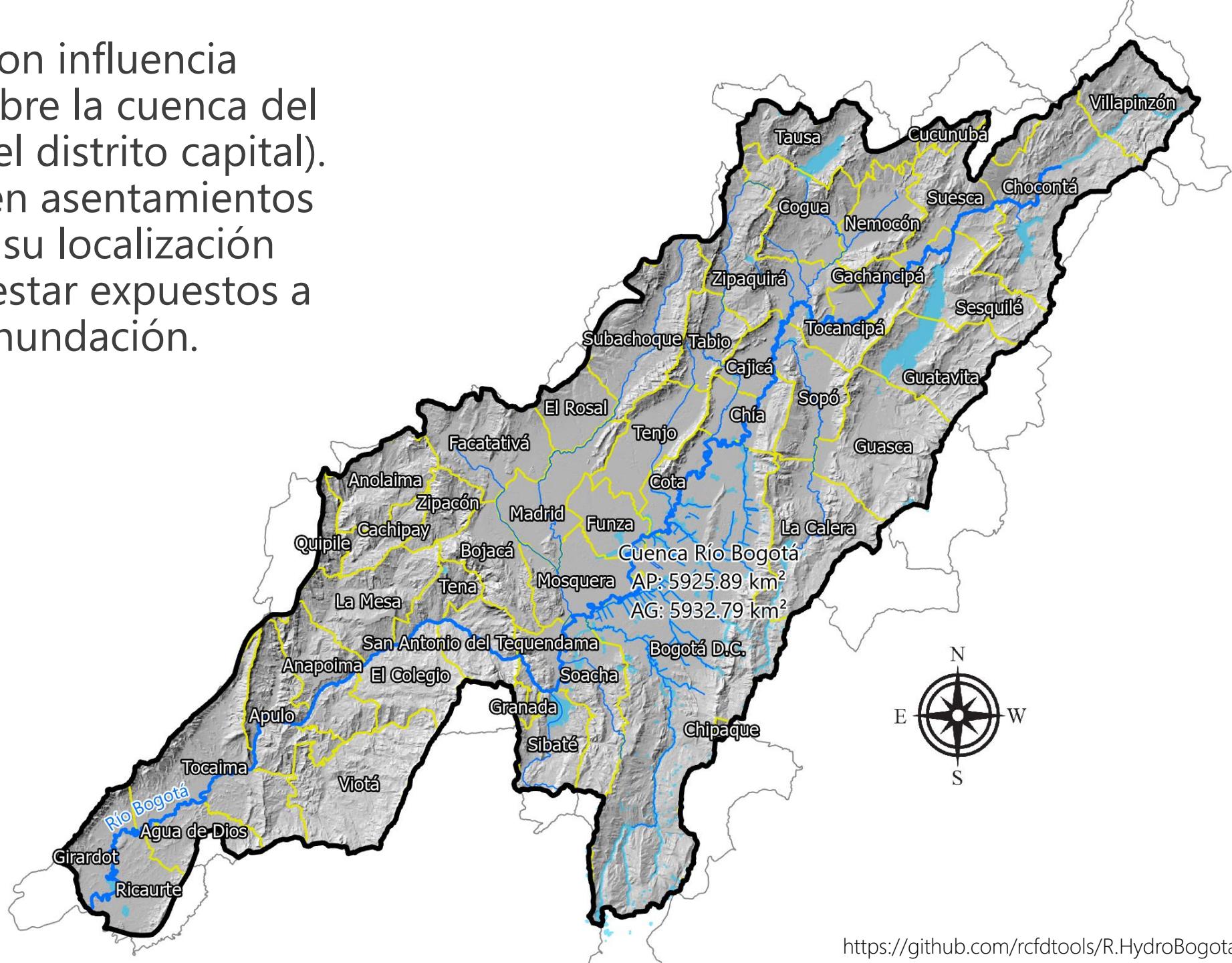
Por su localización geográfica en llanura, en esta investigación **no se consideran los Embalses de Aposentos, Muña y humedales de Bogotá como elementos generadores de riesgo**, razón por la cual, no se incluyen en la modelación de descarga súbita y son solo utilizados como cuerpos de amortiguación de crecientes.

En el embalse seco de Cantarrana, no se han incluido descargas súbitas directas; lo anterior debido a que es utilizado solo para atenuación de las crecientes provenientes de la parte alta del Río Tunjuelo y desde los embalses Chisacá y La Regadera, los cuales sí incluyen hidrogramas de descarga.



Con respecto a la **zonificación de amenaza sísmica** definida por el Servicio Geológico Colombiano, esta cuenca se encuentra mayoritariamente en zona **intermedia** y solo una **pequeña fracción** localizada cerca de la entrega al Río Magdalena, se encuentra **en zona de amenaza alta**.

47 municipios con influencia geográfica directa sobre la cuenca del Río Bogotá (incluido el distrito capital). En esta cuenca existen asentamientos humanos, que por su localización geográfica, pueden estar expuestos a amenazas de inundación.



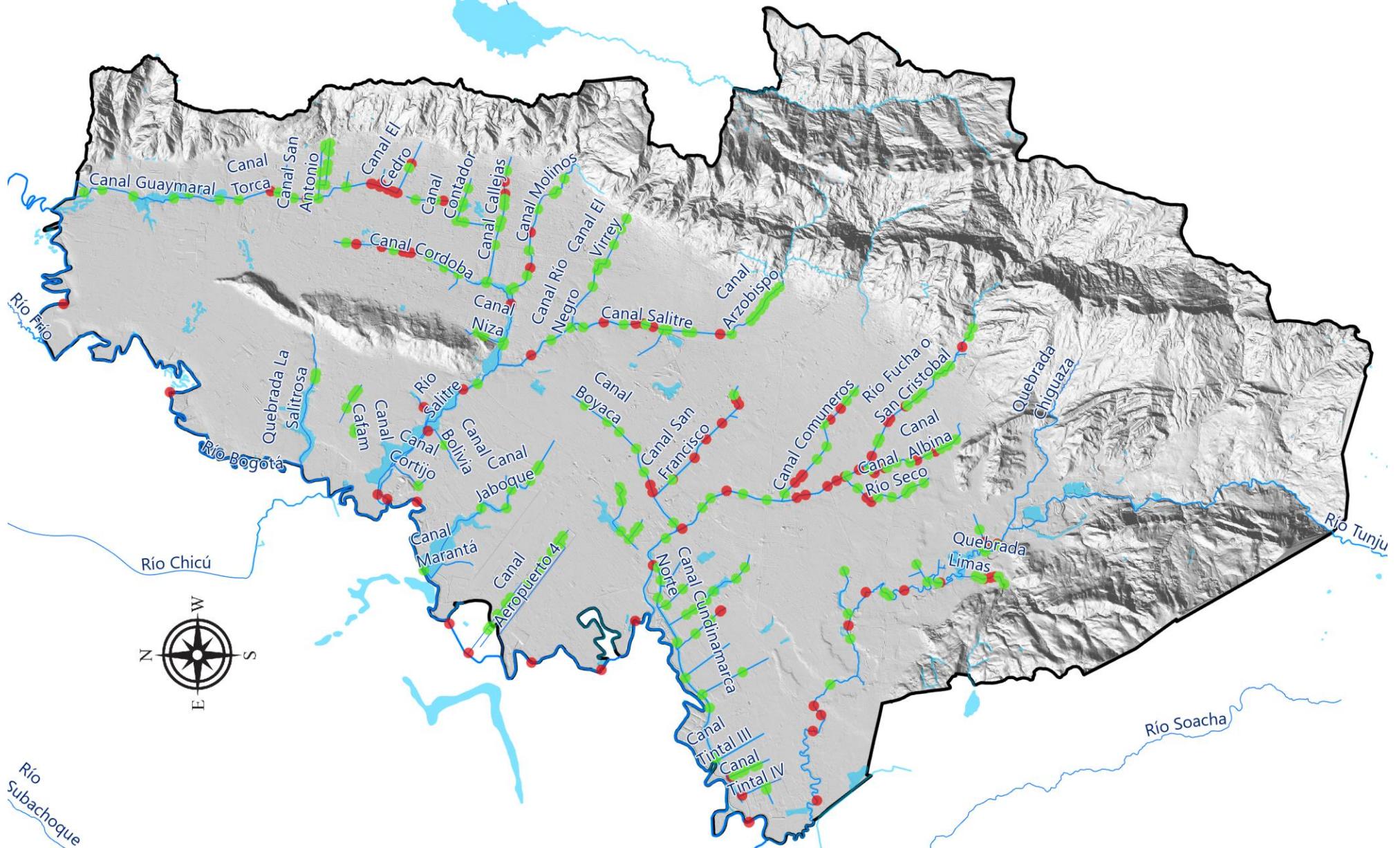
3 autoridades ambientales con
influencia geográfica directa
sobre la cuenca del Río Bogotá.



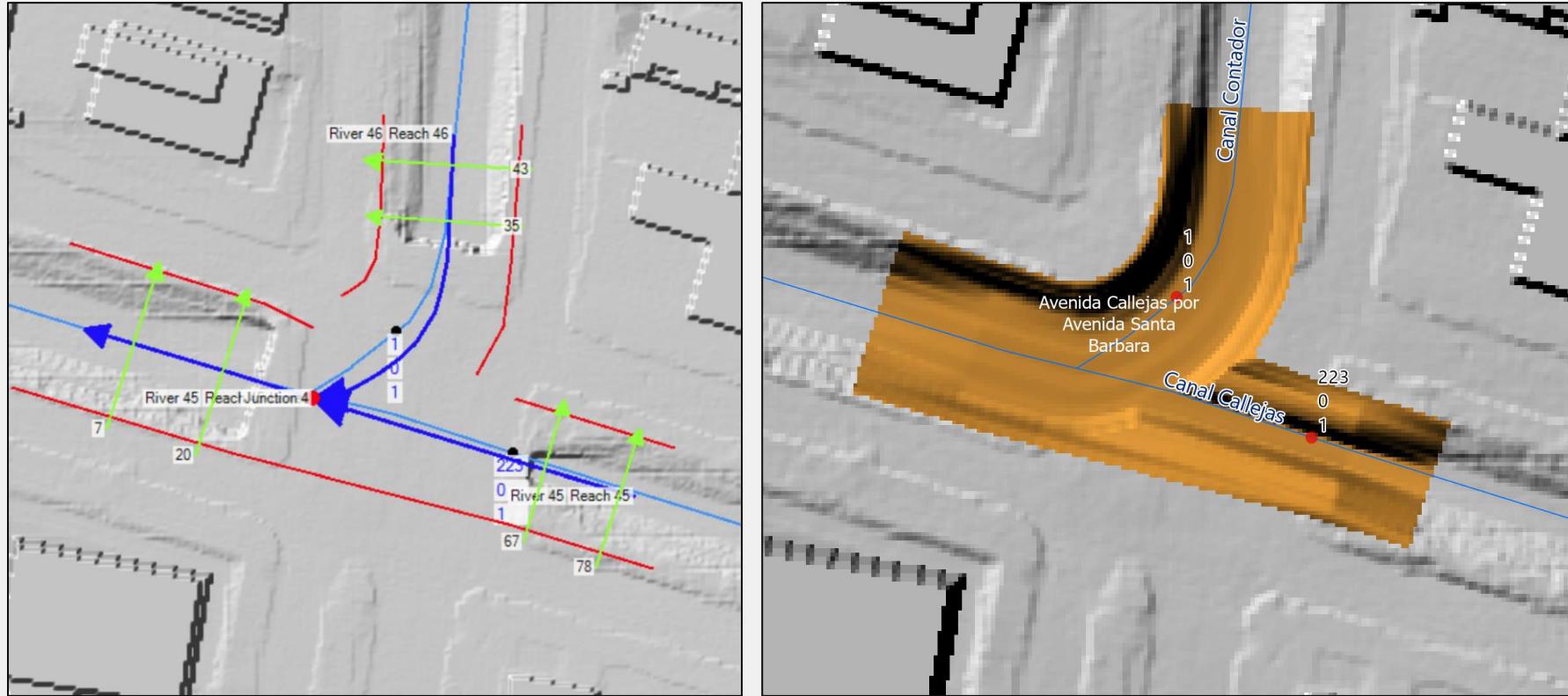
2

Modelo digital de elevación híbrido – **DEM**

Para el ensamble del modelo digital de elevación híbrido con cobertura sobre toda la cuenca, se ha utilizado el modelo digital de superficie – **DSM Copernicus** (resolución de 30 metros), los modelos digitales de terreno **LIDAR de la ciudad de Bogotá D.C.** (resoluciones de 5 y 0.5 metros), un modelo de elevación generado a partir de **polígonos de construcciones** (resolución de 0.5 metros) y un modelo digital de terreno con los **canales a superficie libre**, en puntos de intersección de drenajes con pasos de vía (resolución 0.5 metros).

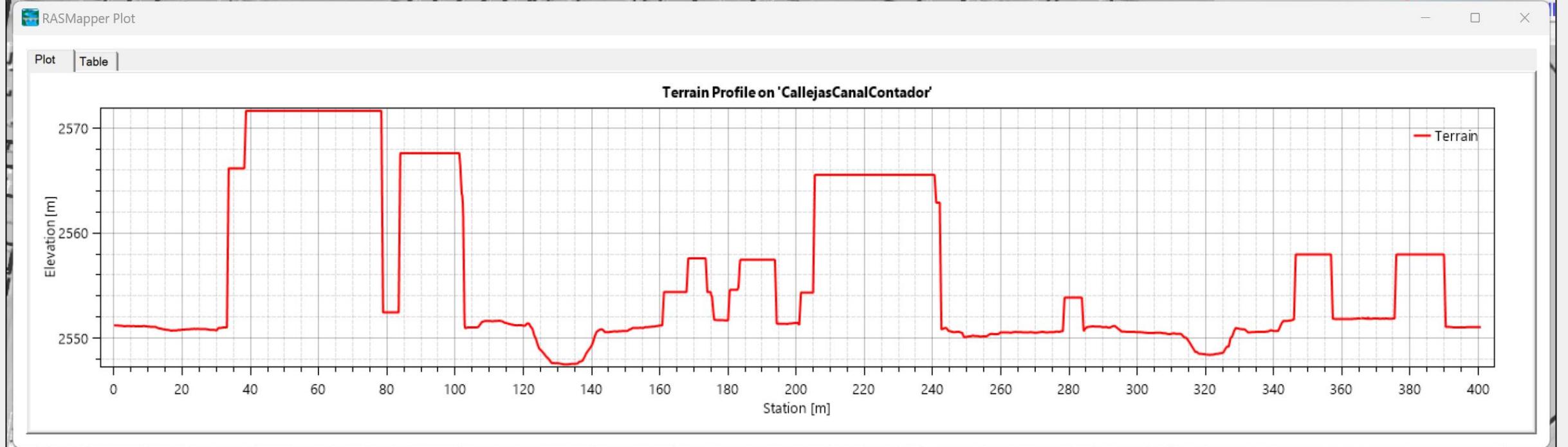


310 pasos de vía identificados dentro del área urbana de Bogotá,
de los cuales, **217 requirieron de ajuste** en el modelo de terreno.

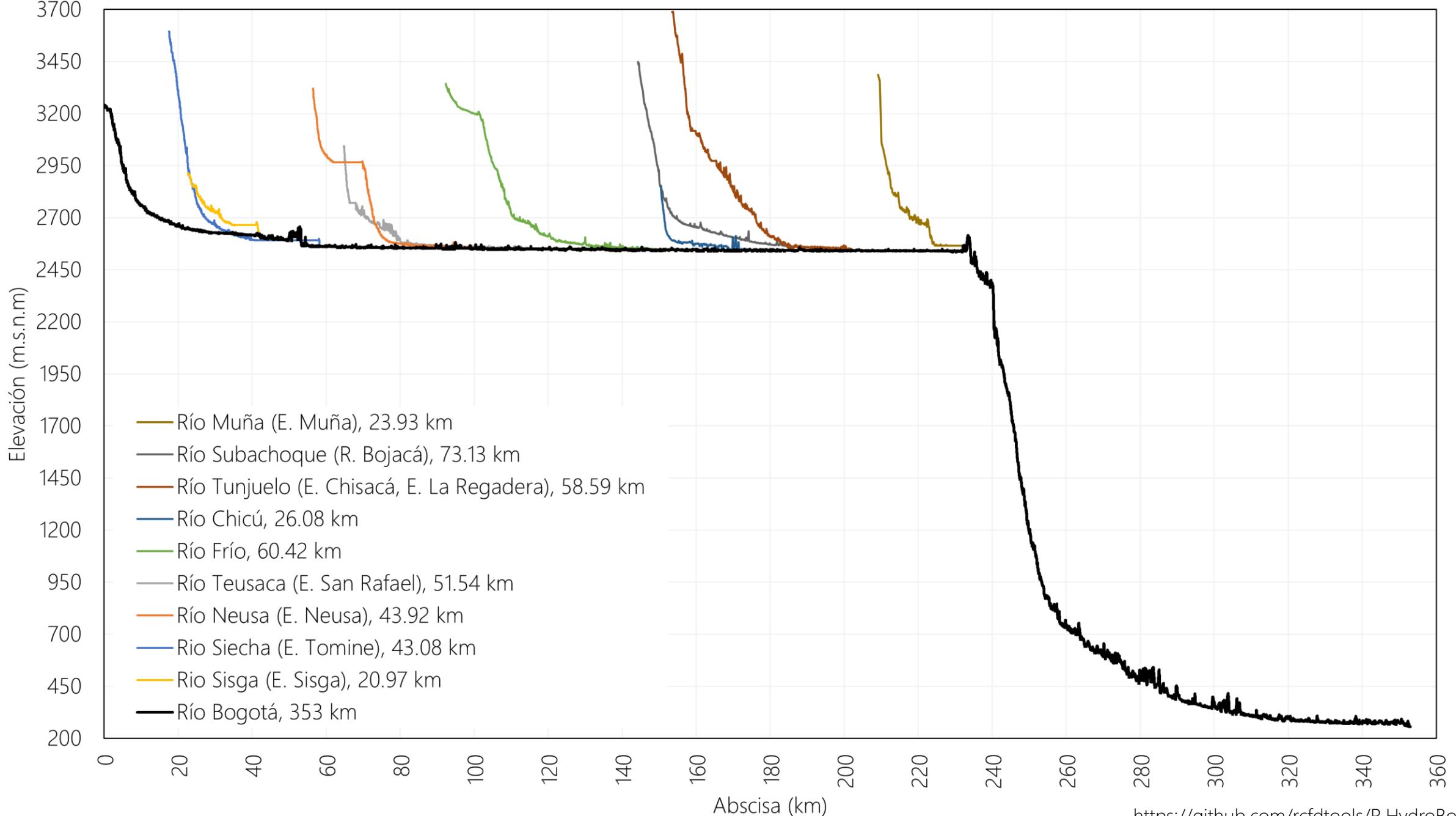


A la izquierda se puede observar el modelo digital de terreno **LIDAR** de una intersección vehicular (con secciones transversales de referencia y ejes sobre dos canales), y **a la derecha el ajuste realizado** al modelo de terreno, incorporando las secciones a superficie libre del canal.

Las **construcciones** han sido utilizadas como complemento en la creación del modelo de terreno híbrido y son consideradas en esta investigación **como bloques de obstrucción** del modelo hidráulico



Perfiles de ríos principales en Cuenca Río Bogotá (DSM Copernicus)



Animación 3D

(Zx4)



3

Red de drenaje urbana y rural

La red de drenaje, construida a partir de la capa de Corrientes de Agua de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - **EAAB**, ha sido **utilizada** en RAS Mapper de HEC-RAS, **para el refinamiento del mallado** de cauces principales **y para la visualización de perfiles** y resultados del modelo hidráulico.

Red complementada incluyendo la digitalización de **ejes en** zonas de paso por **cuerpos de agua** (embalses, lagunas, humedales), **conexión** de descarga de **embalses** a cauces receptores, extensión de continuidad en **canales bajo pasos de vía** y en conductos e interceptores.

La red de drenaje obtenida y complementada tiene una **longitud total de 8750.1 km**, de los cuales, **53.7 km** corresponden a **digitalizaciones realizadas en esta investigación**.



Los siguientes elementos que hace parte de la red de drenaje, son las **líneas de banca o corona** y las **líneas de transición de mallado**. Estos elementos, al igual que los drenajes, también son utilizados para el refinamiento del mallado y son requeridos para el confinamiento hidráulico del flujo dentro de la sección y para la lectura de tiempos de permanencia de flujo en coronas. En esta investigación, se realizó la **digitalización de 1613.9 km** de estos ejes dentro del área urbana de Bogotá

Banca izquierda (km)	Banca derecha (km)	Transición de celdas (m)	Total (m)
288.6	292.12	1033.16	1613.88

Project Map Insert Analysis View Edit Imagery Share Arc Hydro Help Feature Layer Labeling Data

ArcGISPro Command Search (Alt+Q)

(R) - Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Contents General

Search

Drawing Order

- tpuent**
 - 1
 - 2
 - <all other values>
- Breakline_9377_v0
- Breakline_9377_v1
- Banks_9377
 - BankSide**
 - Left
 - Right
 - Cell Transition**
 - <all other values>
- Charts
 - Distribution of Lm
 - Sum of Lm by BankSide
- Banks_9377
 - BankSide**
 - Left
 - Right
 - Cell Transition**
 - <all other values>
- Charts
 - Distribution of Lm
 - Sum of Lm by BankSide
- Drenaje_9377 (label all DSourceID)
 - 1
 - 4
 - <all other values>
- Drenaje_9377 (label all)
- MainRiver
 - 0
 - 1
 - <all other values>
- Drenaje_9377 (simple)
 - 0
 - 1
 - <all other values>
- Drenaje_9377
- CuerpoAgua_9377
- SZH210_9377_Envelope_Buffer250m

1:28,862

Selected Features: 0

74.0904414°W 4.7585069°N

Catalog Label Class Modify Features Geoprocessing Symbology

4

Mapa de suelos y grupos hidrológicos

Versiones recientes de **HEC-RAS**, permiten la **simulación de la precipitación** y abstracción e inclusión de mapas de **infiltración**.

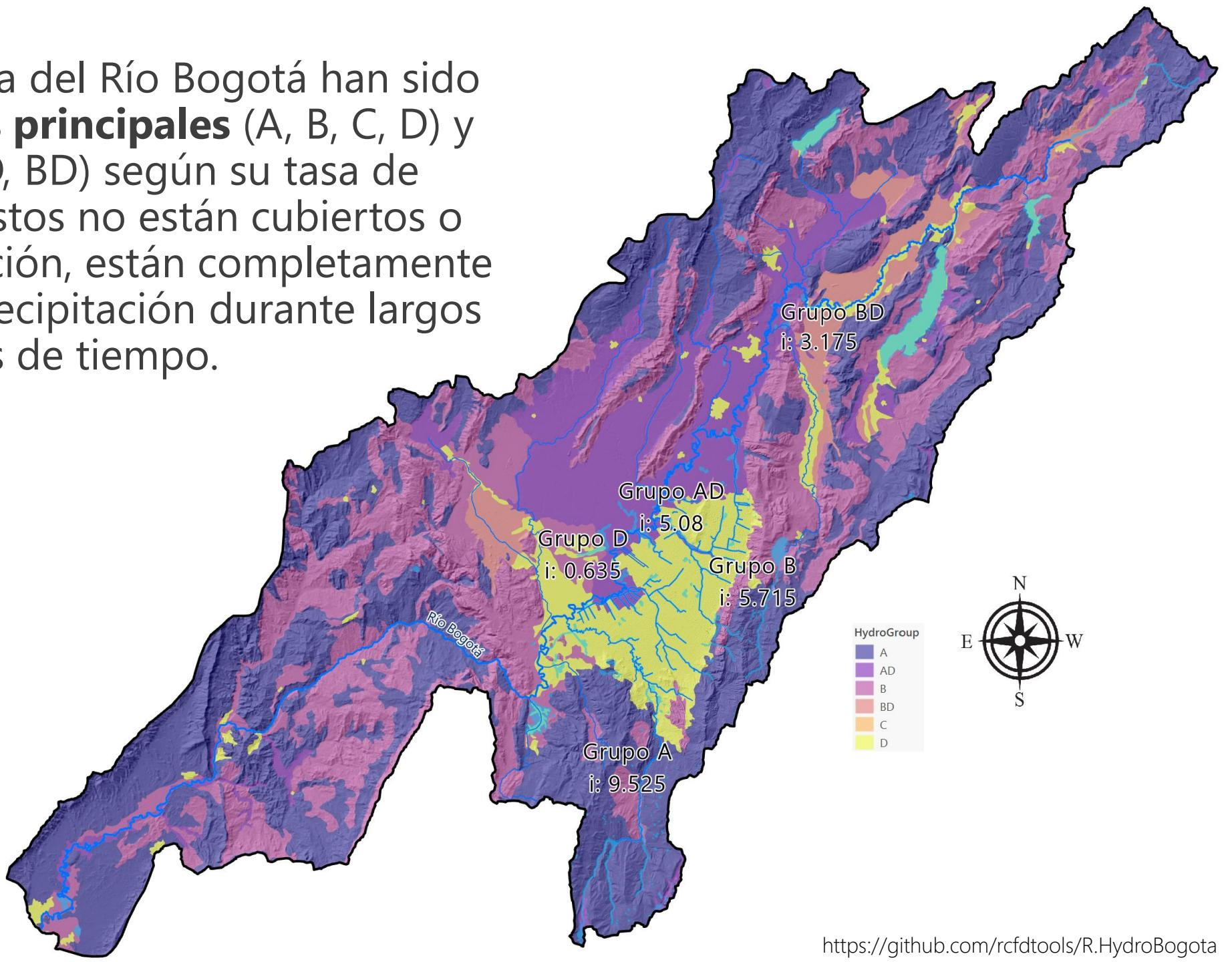
Se ha utilizado como referencia, el **Mapa Digital de Suelos del Departamento de Cundinamarca**, a escala 1:100.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, al cual **se le han asociado los grupos hidrológicos** y tasas de infiltración del Soil Conservation Service – SCS **del** Natural Resources Conservation Service o **USDA**, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América.

Grupos hidrológicos SCS y tasas de infiltración

SCS Grupo	Descripción	Mínimo (mm/hr)	Promedio (mm/hr)	Máximo (mm/hr)
A	Suelos que tienen una alta tasa de infiltración (bajo potencial de escorrentía) cuando están completamente húmedos. Se componen principalmente de arenas profundas, bien drenadas o excesivamente drenadas o arenas con grava. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua. <i>Cundinamarca - Asociación de suelo: Bien drenados. Bien a excesivamente drenados.</i>	7.62	9.525	11.43
B	Suelos con tasa de infiltración moderada cuando se encuentran húmedos. Se trata principalmente de suelos moderadamente profundos o profundos, moderadamente bien drenados o bien drenados que presentan una textura moderadamente fina a moderadamente gruesa. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión de agua. <i>Cundinamarca - Asociación de suelo: Bien a moderadamente bien drenados. Moderadamente bien drenados.</i>	3.81	5.715	7.62
C	Suelos que tienen una tasa de infiltración lenta cuando están completamente húmedos. Se trata principalmente de suelos que tienen una capa que impide el movimiento descendente del agua o suelos de textura moderadamente fina o de textura fina. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua lenta. <i>Cundinamarca - Asociación de suelo: Pobremente drenados.</i>	1.27	2.54	3.81
D	Suelos que tienen una tasa de infiltración muy lenta (alto potencial de escorrentía) cuando están completamente húmedos. Se componen principalmente de arcillas que tienen un alto potencial de contracción-expansión, suelos que tienen un nivel freático alto, suelos que tienen una capa de arcilla en la superficie o cerca de ella y suelos que son poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa muy lenta de transmisión de agua. <i>Cundinamarca - Asociación de suelo: Pobre a muy pobremente drenados. Cuerpo de agua. Pantanos. Misceláneo erosionado. Playones. Nulos o vacíos.</i>	0	0.635	1.27

Si un suelo se asigna a un grupo hidrológico dual (A/D, B/D o C/D), la primera letra corresponde a las zonas drenadas y la segunda a las zonas no drenadas. Solo los suelos que en su condición natural se encuentran en el grupo D se asignan a clases duales.

Los suelos de la cuenca del Río Bogotá han sido **asociados a 4 grupos principales** (A, B, C, D) y combinaciones (AD, BD) según su tasa de infiltración, cuando estos no están cubiertos o protegidos por vegetación, están completamente saturados y reciben precipitación durante largos periodos de tiempo.



5

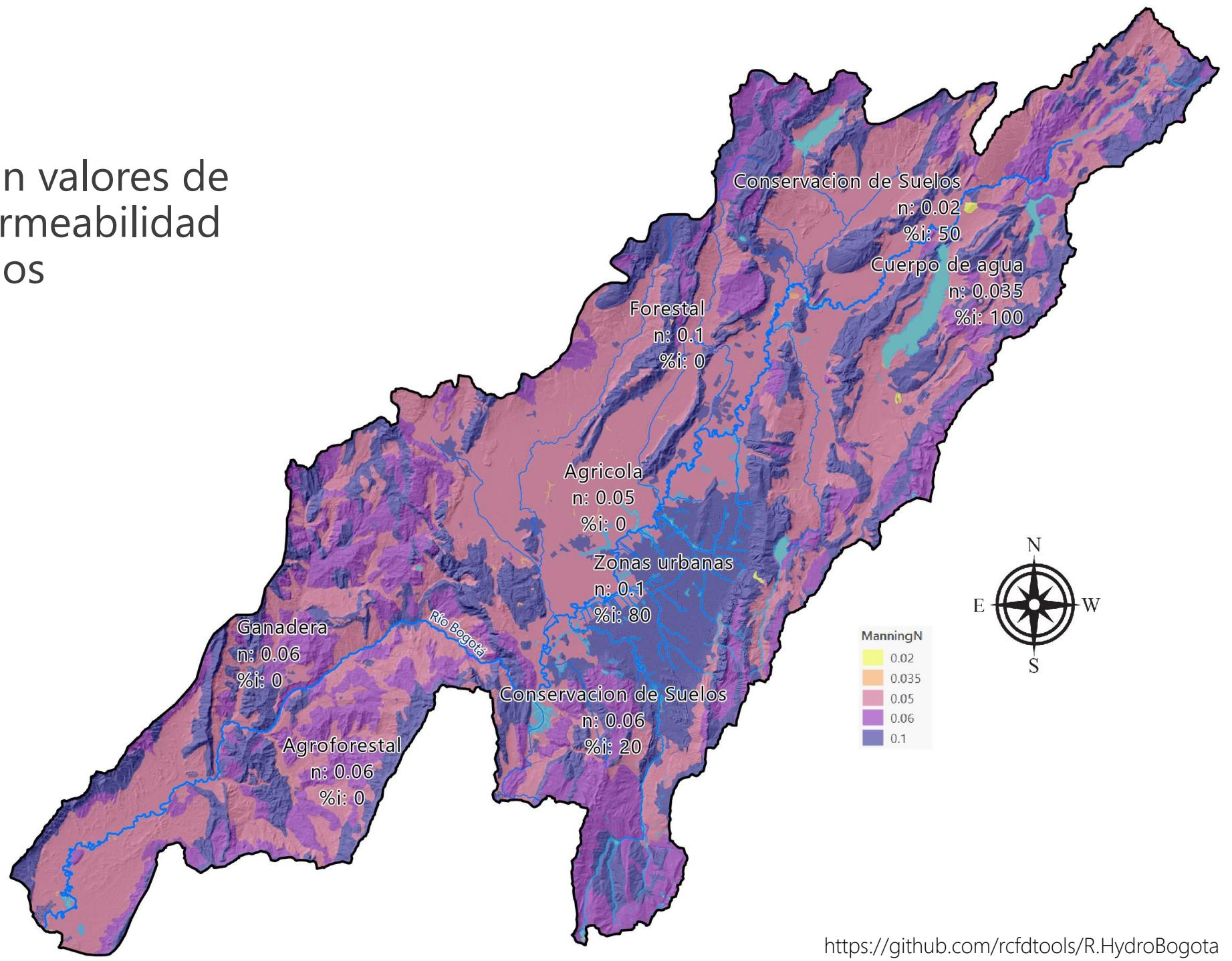
Mapa de usos del suelo y rugosidades

Para la construcción del mapa para asociación de **coeficientes de rugosidad de Manning** y porcentajes de impermeabilidad por tipo de cobertura de suelo, se ha **utilizado como referencia el Mapa Digital de Vocaciones de Uso del IGAC**.

Rugosidad e impermeabilidad por uso del suelo

Uso del suelo	Rugosidad de Manning, n	% de impermeabilidad
Sin uso definido	0.066	100
Cuerpo de agua	0.035	100
Urbanizado con espacio libre	0.03	25
Urbanizado con intensidad baja	0.06	50
Urbanizado con intensidad media	0.1	80
Urbanizado con intensidad alta	0.15	90
Suelo árido rocoso / arena / arcilla	0.02	100
Bosque caducifolio (estacionario), Bosque verde (permanente)	0.1	0
Bosque combinado (estacionario y permanente)	0.1	0
Arbusto / Matorral	0.06	20
Pastizal / Herbáceo	0.04	0
Pasto / Heno	0.06	0
Cultivo	0.05	0
Humedal con troncos	0.12	80
Humedal herbáceo emergente	0.1	80

Usos del suelo con valores de rugosidad e impermeabilidad adoptados



6

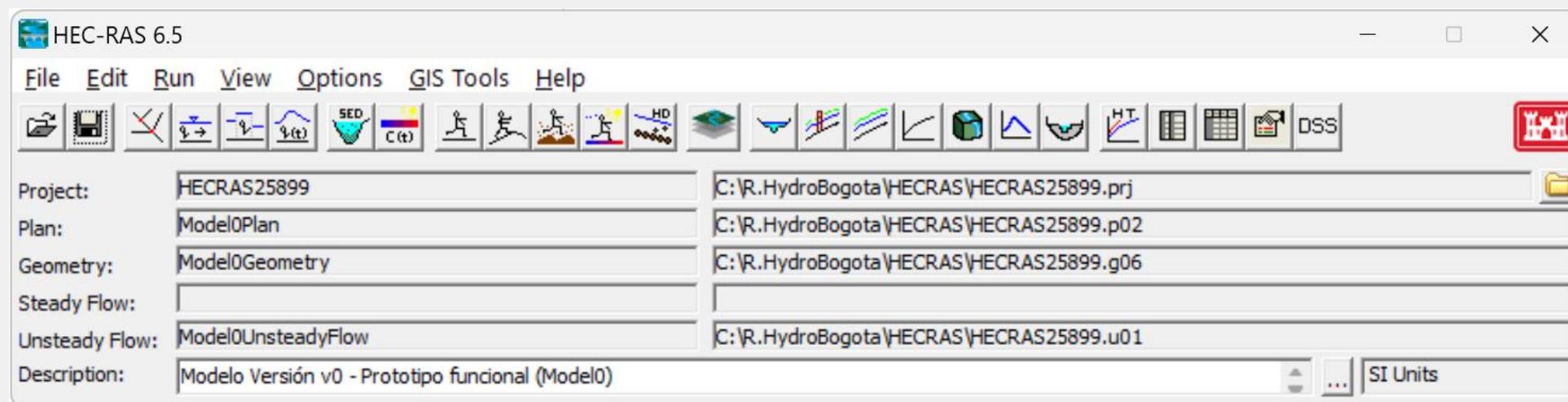
Simulación hidráulica bidimensional de descargas súbitas de embalses

Para la **simulación de descarga súbita de embalses** y **suponiendo** que, ante un evento sísmico de gran magnitud se presente su **colapso simultáneo**, se ha ensamblado un **prototipo** de modelación **bidimensional** en **HEC-RAS** con cobertura completa sobre la cuenca del Río Bogotá.

Incluye el Modelo digital de elevación híbrido – **DEM**, **Refinamiento del mallado** a partir de los alineamientos de cauces principales (en una longitud de 906 kilómetros), Incorporación de **mapas de suelos y coberturas**, **Modelación** de los sistemas de drenaje **de la cuenca y los canales** a superficie libre dentro del área urbana de Bogotá.

Archivos componentes del prototipo

Elemento	Archivo	Nombre
Proyecto	HECRAS25899.prj	HECRAS25899
Plan	HECRAS25899.p02	Model0Plan
Geometría	HECRAS25899.g06	Model0Geometry
Unsteady flow	HECRAS25899.u01	Model0UnsteadyFlow
Modelo digital híbrido de terreno	Terrain/Terrain.hdf	Terrain
Mapa de usos o coberturas del suelo	Land Classification/LandCover.hdf	LandCover
Mapa de suelos	Land Classification/Soils.hdf	Soils
Mapa de infiltración	Land Classification/Infiltration.hdf	Infiltration



Características del mallado en RAS Mapper

Característica	Characteristic	Valor
Coeficiente de rugosidad global de Manning por defecto	Manning's n	0.030
Tolerancia en longitud de caras	Cell tolerance	5 %
Tamaño general de celda horizontal y vertical	Main cell size	240 m
Número de celdas	Number of Cells	123708
Largo promedio por cara	Average Face Length	219 m
Tamaño promedio de celda	Average Cell Size	47902 m ²
Tamaño máximo de celda	Maximum Cell Size	136618 m ²
Tamaño mínimo de celda	Minimum Cell Size	79 m ²

El valor global definido del Coeficiente de Rugosidad de Manning únicamente es aplicable a celdas en la que no exista cobertura en el mapa de usos del suelo. Para este estudio se ha definido un mapa global con cobertura sobre todo el Departamento de Cundinamarca y la cuenca del Río Bogotá.

Selected Layer: 2D Flow Areas

Features

- Profile Lines
- Geometries
- Model0GeometryBeta
- Model0Geometry
 - 2D Flow Areas
 - Perimeters
 - Computation Points
 - Breaklines
 - Refinement Regions
 - Boundary Condition Lines
 - Manning's n
 - Infiltration
 - Percent Impervious
 - (13 Empty Layers)
- Model1Geometry
- Test0Geometry
- ChannelFitGeometry

Plans

Event Conditions

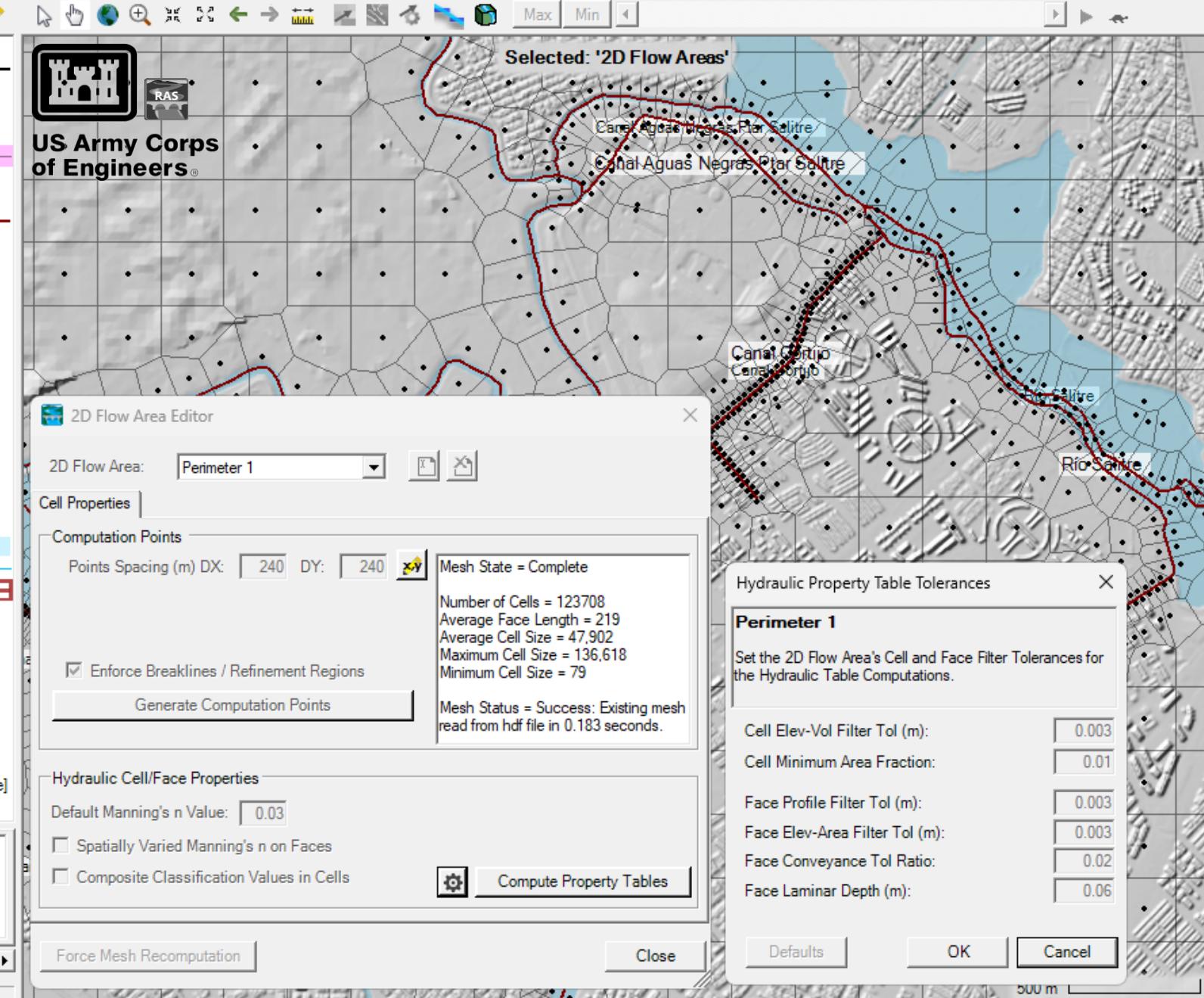
Results

Map Layers

- Drenaje_PasoVia_9377
- CuerpoAqua_9377
- Drenaje_9377
- SZH2120_9377
- LandCover
 - Classification Polygons
- Soils
- Infiltration
- Google Satellite
- Google Map
- ArcGIS World Topo Map

Terrains

- Terrain



Salto computacional de cómputo

Definido adaptativo, tomando como referencia la **Condición de Courant** y la metodología que utiliza la relación de la velocidad en las caras, entre el largo promedio de las celdas del mallado.

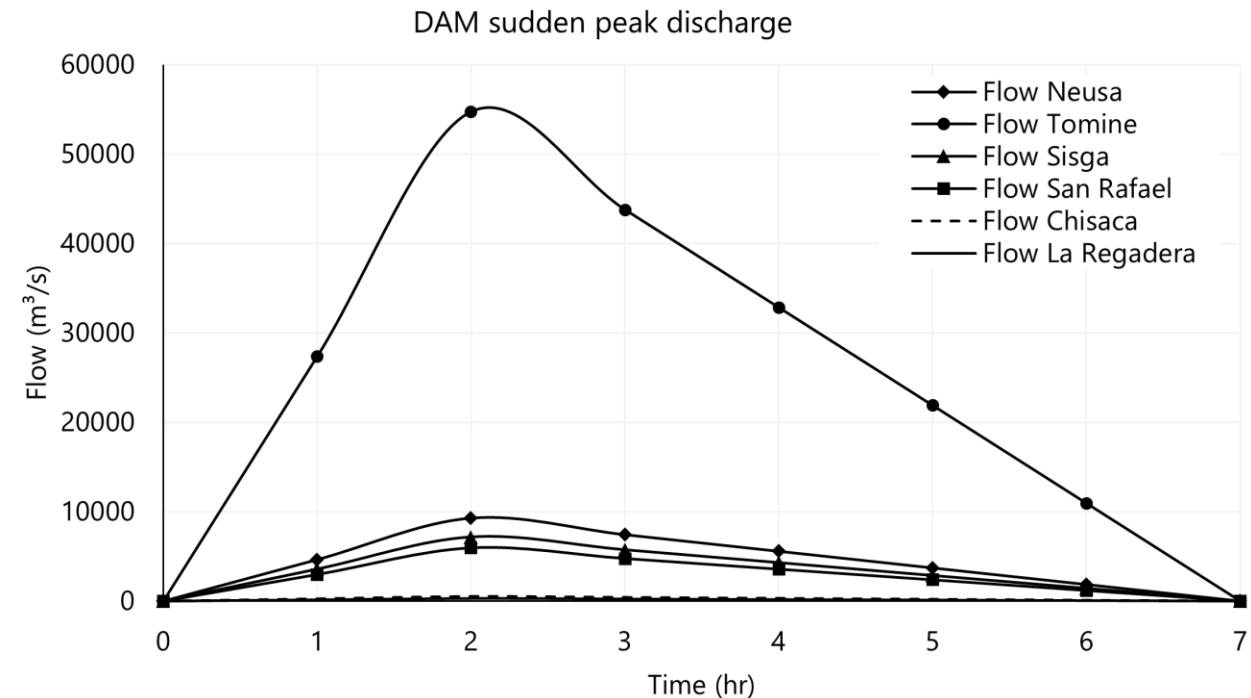
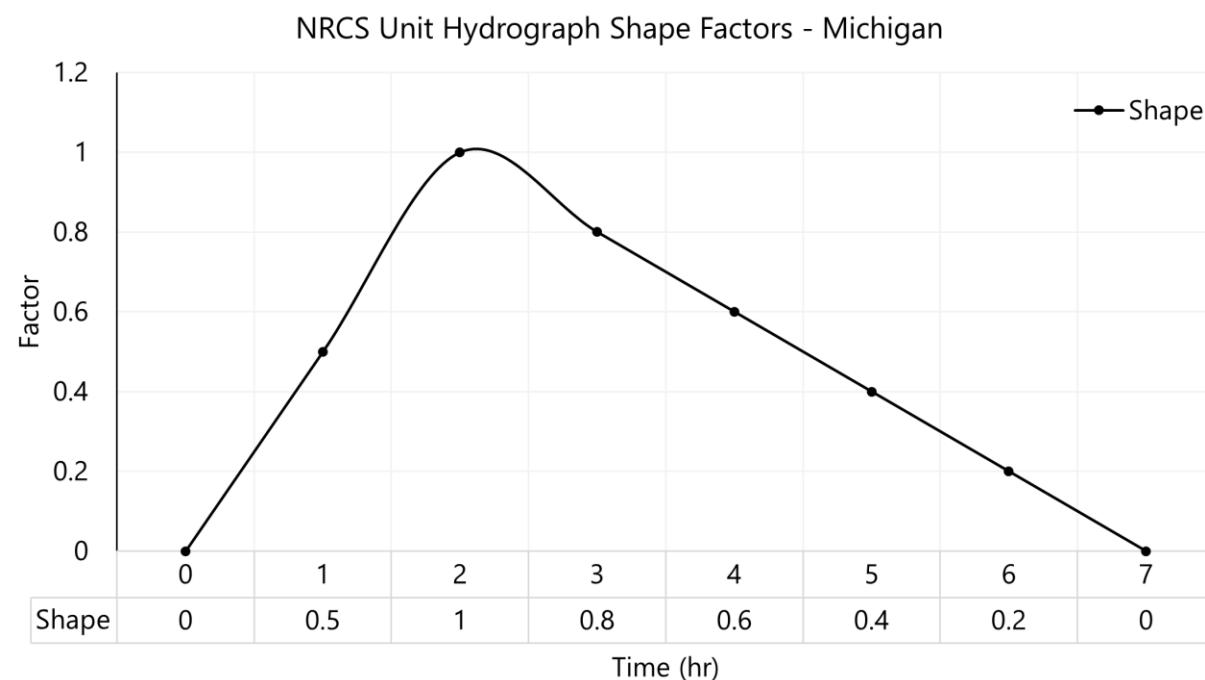
$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X}$$

Parámetro	Valor
Velocidad máxima del flujo o celeridad de onda	60.83 m/s
Velocidad mínima del flujo o celeridad de onda	0.001 m/s
ΔT , intervalo computacional de cómputo	1800 seg. (30 minutos)
ΔX , distancia promedio entre celdas	219 m
Máximo valor del número de Courant ($C = V * \Delta T / \Delta X$)	500
Mínimo valor del número de Courant ($C = V * \Delta T / \Delta X$)	0.00821918

Se han tomado como referencia las velocidades desarrolladas del flujo en los extremos de la llanura de inundación y en el frente de onda, cuando éste pasa de la transición de montaña a valle.

Hidrogramas

Para la localización de las condiciones de frontera y la distribución del volumen almacenado y descargado súbitamente desde cada embalse, se han utilizado los **factores del hidrograma unitario** de la Natural Resources Conservation Service NRCS del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, correspondiente al hidrograma ajustado utilizado en el estado de Michigan, distribuido en pulsos horarios para una duración total de 8 horas.



Para la generación de los **hidrogramas de descarga súbita** en cada embalse, se ha tomado el valor de la capacidad de almacenamiento en Hm^3 y se ha **dividido en 8 pulsos de 1 hora**. Para obtener el total del volumen descargado en cada embalse, se ha estimado un factor de distribución de 0.285714285714286.

Cuerpo de agua	Condición de frontera	Capacidad (Hm^3)	Pico máximo de flujo (m^3/s)
Embalse Neusa	BC Upstream Neusa	117	9285.71
Embalse Tominé	BC Upstream Tomine	689.5	54722.22
Embalse Sisga	BC Upstream Sisga	90.1	7150.79
Embalse San Rafael	BC Upstream San Rafael	75	5952.38
Embalse Chisacá	BC Upstream Chisaca	6.7	531.75
Embalse La Regadera	BC Upstream La Regadera	3.3	261.90

Al inicio y fin de cada hidrograma, se han incluido pulsos complementarios correspondientes a los caudales medios descargados desde en cada embalse.

Ejecución

Para la ejecución del modelo hidráulico 2D, se han utilizado las ecuaciones de la **onda difusiva (DSW)**, estableciendo como condición inicial de precalentamiento, una fracción de 0.1 con respecto al primer pulso. Para la matriz de solución, se ha utilizado el algoritmo de cálculo de volumen finito **PARDISO (Direct)**, el cual ha permitido obtener una solución numérica más estable. De acuerdo con lo establecido en el Manual de Referencia Hidráulica de HEC-RAS, la ecuación de la onda difusiva, describe la **conservación de la masa y el momentum**.

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$$

Términos de la ecuación de conservación de *momentum*¹

Aproximación	$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}$	$+ \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)$	$+g \frac{\partial y}{\partial x}$	$-gS_0$	$+gS_f$	= 0
	Término de aceleración local	Término de aceleración convectiva	Término de fuerza de presión	Término de fuerza gravitacional	Término de fuerza de fricción	
<i>Términos inerciales</i>						
Onda dinámica	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí
Onda difusiva	✗ No	✗ No	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí
Onda cinemática	✗ No	✗ No	✗ No	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí

Onda Dinámica + Turbulencia + Coriolis = HEC-RAS Full Momentum

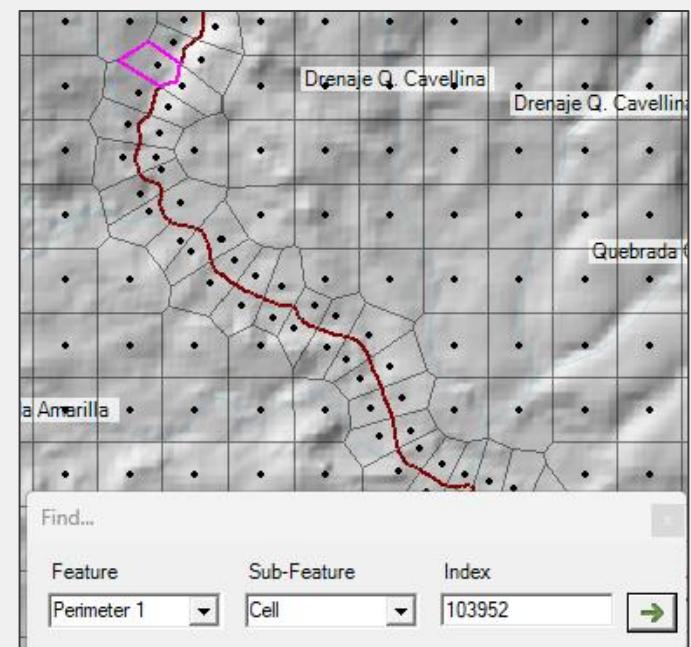
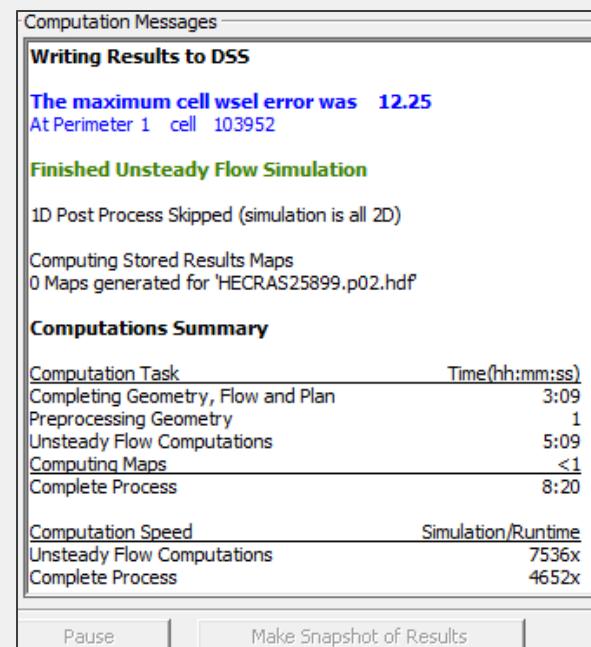
Aceleración Local: cambio en la velocidad de una partícula fluida respecto al tiempo.

Aceleración Convectiva: cambio en la velocidad de una partícula fluida en el espacio del dominio.

Parámetros de ejecución del modelo

Parámetro	Valor
Fecha de inicio	04 May 2024
Fecha de finalización	30 May 2024
Hora de inicio	00:00
Hora de finalización	00:23
Intervalo computacional (variable)	Condición de Courant
Intervalo de mapificación de resultados	30 minutos
Intervalo de hidrogramas de salida	30 minutos
Intervalo de salida para resultados detallados	30 minutos

Se pudo establecer que el máximo error encontrado de elevación de la superficie del agua (WSEL) correspondiente a 12.25%, se presentó en la celda 103952, que se encuentra ubicada abajo de la descarga del Embalse del Neusa y sobre el río. Lo anterior debido a la alta pendiente del terreno en esta zona y el volumen descargado.



7

Análisis de resultados

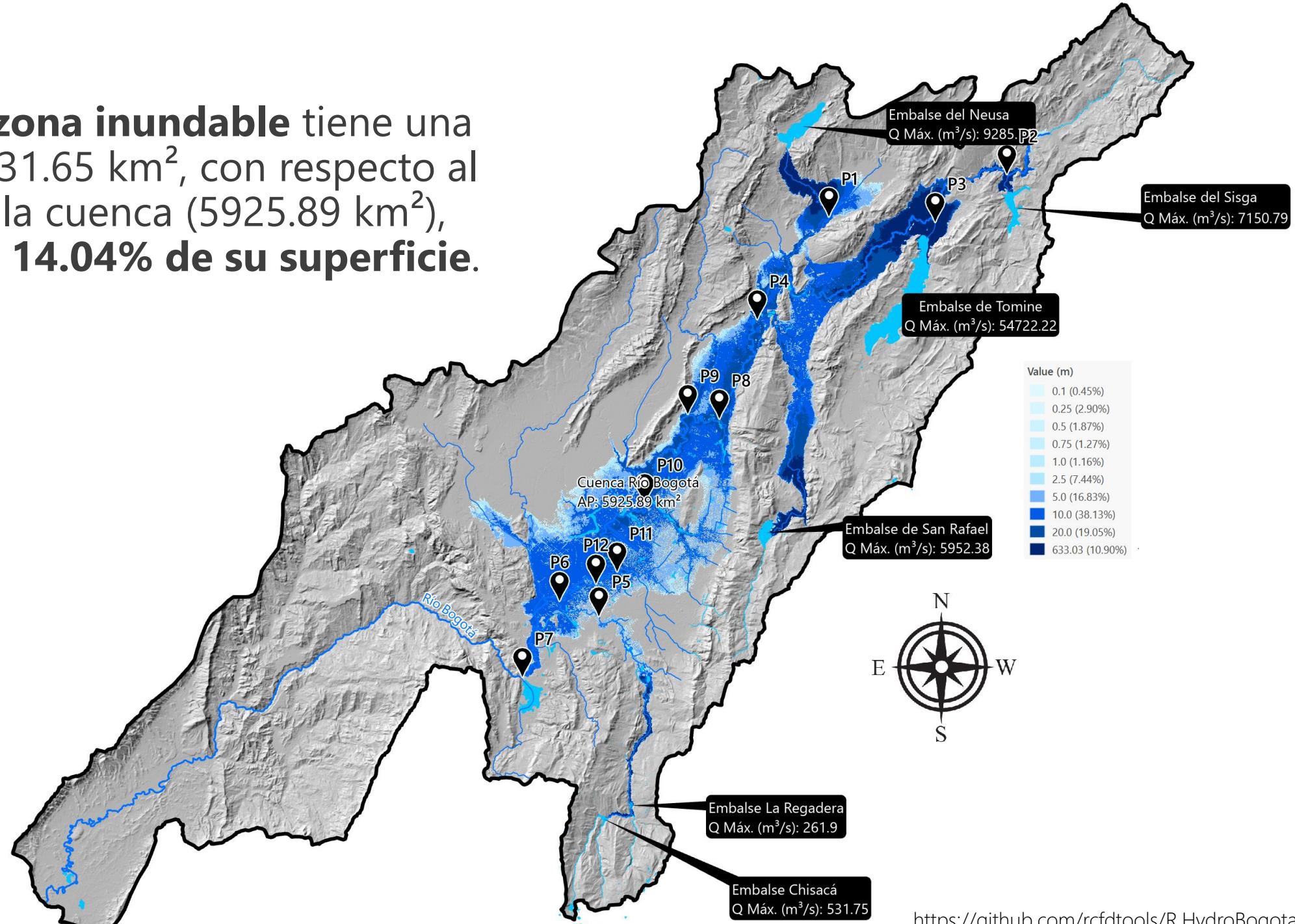
Localización de **puntos de estudio** para análisis de resultados

Se han identificado diferentes localizaciones estratégicas sobre la cuenca. Por una parte, es importante analizar cómo se desarrolla el flujo una vez las descargas de cada embalse llegan a la zona de transición de llanura, también como éste se desacelera a medida que se extiende por la planicie de inundación, e identificar zonas en las que las descargas provenientes de diferentes vertientes colisionan.

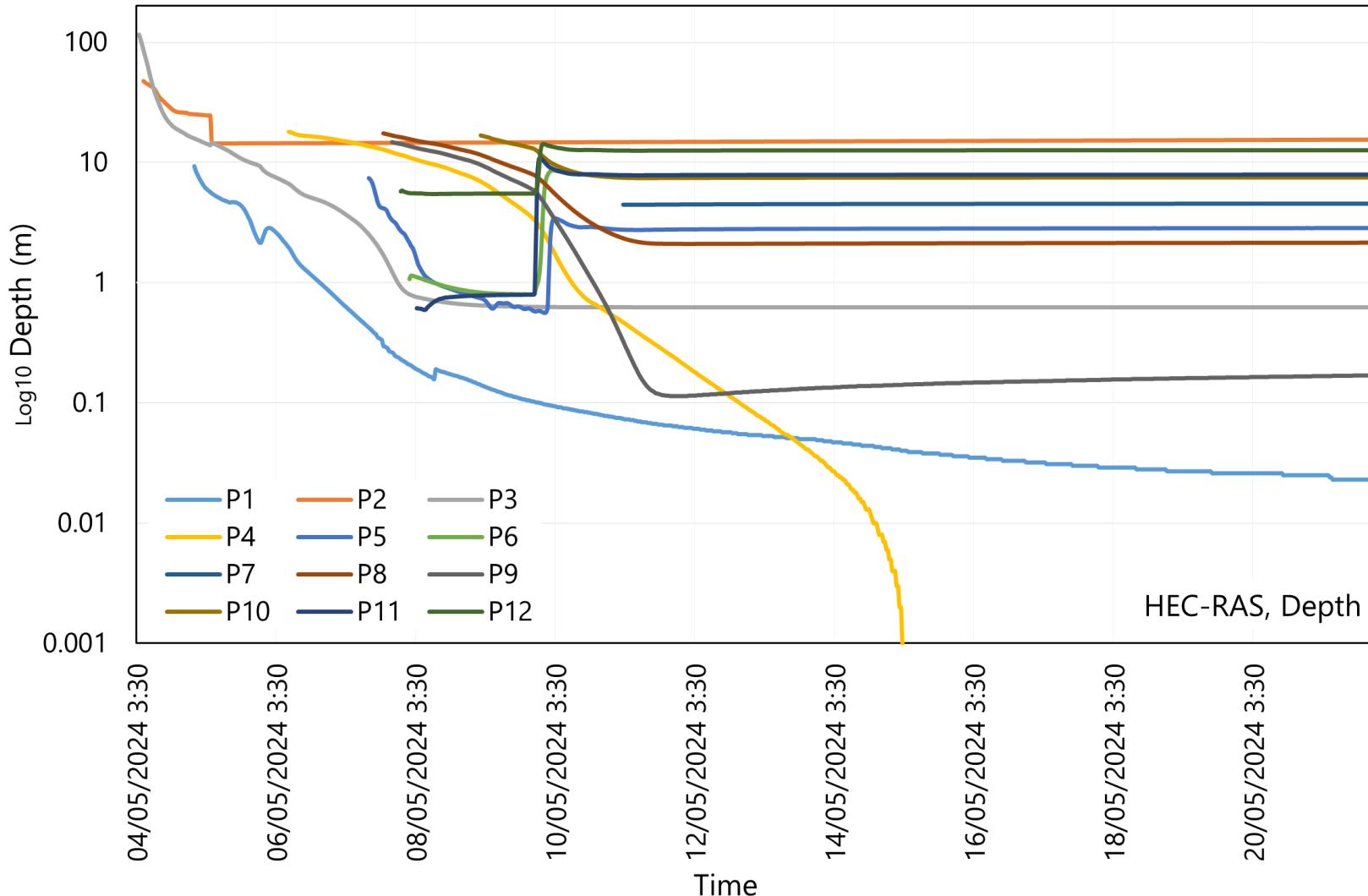
Punto	Localización	Latitud (°)	Longitud (°)
P1	Embalse Neusa en descarga Río Checua	5.059744	-73.921762
P2	Embalse Sisga en descarga Río Bogotá	5.107621	-73.722651
P3	Embalse Tominé en descarga Río Bogotá	5.053898	-73.80283
P4	Embalse San Rafael – Río Teusacá en descarga Río Bogotá	4.94445	-74.001724
P5	Embalse Chisacá y Embalse La Regadera - Río Tunjuelo en Avda. Cra. 80 Embalse Chisacá y Embalse La Regadera - Río Tunjuelo en descarga Río	4.611141	-74.178393
P6	Bogotá	4.628419	-74.222313
P7	Río Bogotá en confluencia con descarga Embalse del Muña	4.543543	-74.263676
P8	Canal Guaymaral en descarga Río Bogotá	4.83298	-74.043922
P9	Río Frío en descarga Río Bogotá	4.838206	-74.079252
P10	Humedal Juan Amarillo en descarga Río Bogotá	4.738227	-74.127364
P11	Río Fucha en descarga Río Bogotá	4.661431	-74.157992
P12	Canal Cundinamarca Norte con Canal Tinal II	4.647736	-74.1816

Extensión y profundidad de la inundación

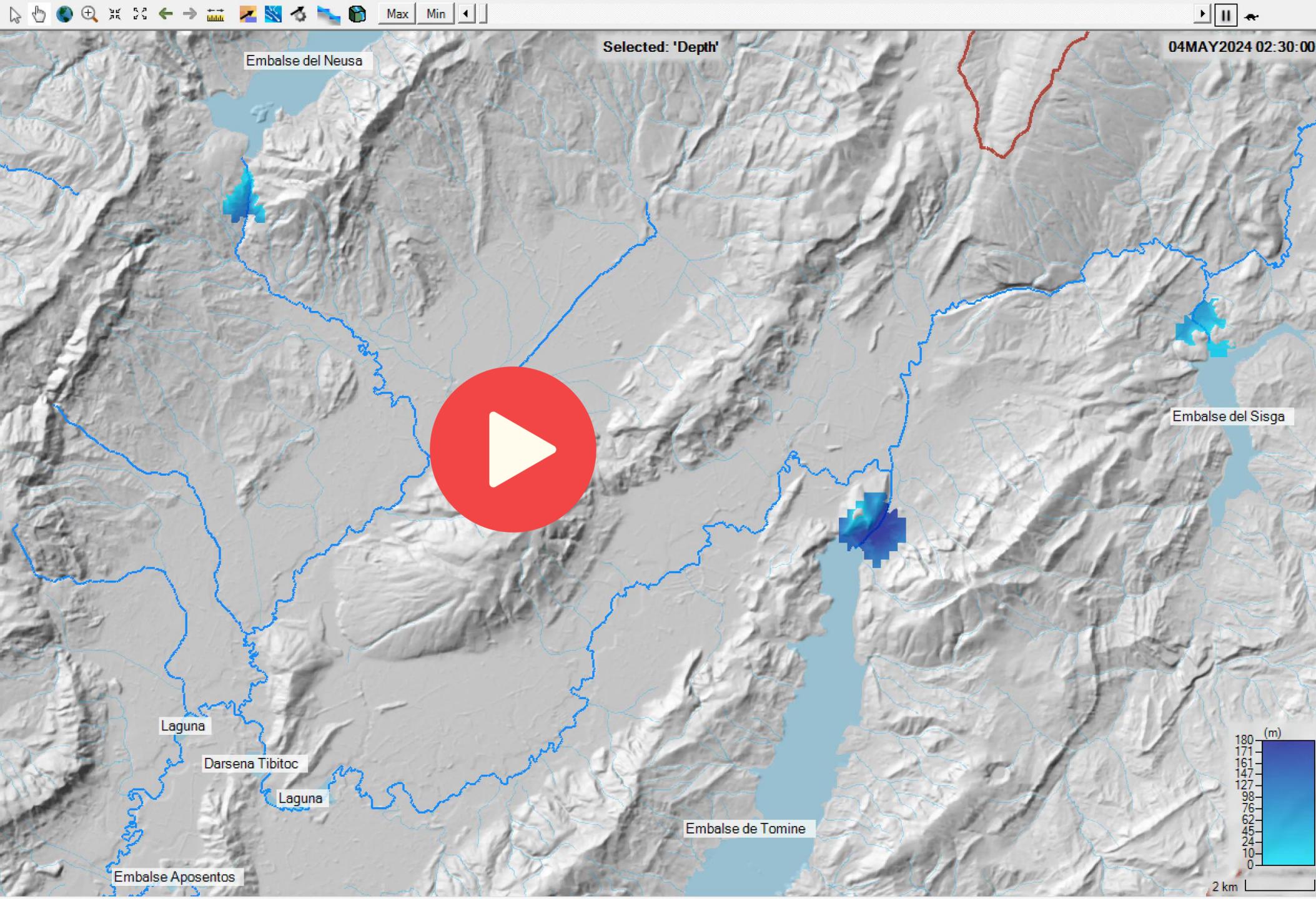
El mapa de la **zona inundable** tiene una extensión de 831.65 km², con respecto al área total de la cuenca (5925.89 km²), corresponde al **14.04% de su superficie.**



Se pudo observar que una vez se desarrolla completamente el flujo de descarga súbita de cada embalse y este llega y fluye lateralmente por la planicie de la llanura de inundación, puede alcanzar **frentes de onda u olas de hasta 10 o más metros** de altura en algunas zonas.



Selected Layer: Depth

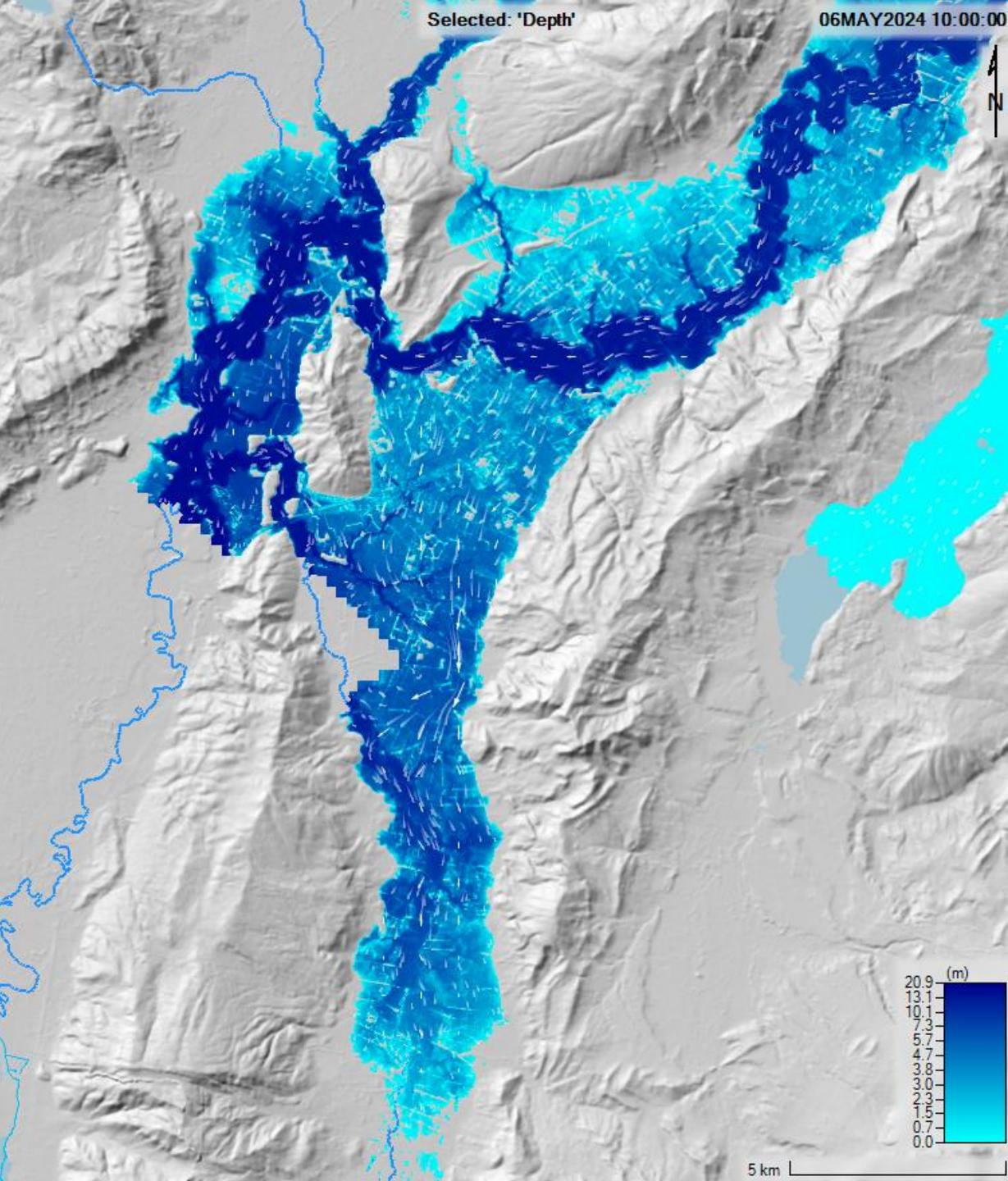


- Features
 - Profile Lines
- Geometries
 - Model0GeometryBeta
 - Model0Geometry
 - 2D Flow Areas
 - Boundary Condition Lines
 - Manning's n
 - Infiltration
 - Percent Impervious
 - (13 Empty Layers)
- Model1Geometry
- Test0Geometry
- ChannelFitGeometry
- Plans
- Event Conditions
- Results
 - Model0Plan
 - Event Conditions
 - Geometry
 - Plan
 - Depth (04MAY2024 02:30:00)
 - Velocity (08MAY2024 12:30:00)
 - WSE (Max)
 - PlanTest0
- Map Layers
 - Drenaje_PasoVia_9377
 - CuerpoAgua_9377
 - Drenaje_9377
 - SZH2120_9377
- LandCover
 - Classification Polygons
- Soils
- Infiltration
- Google Satellite
- Google Map
- ArcGIS World Topo Map
- Terrains
 - Terrain

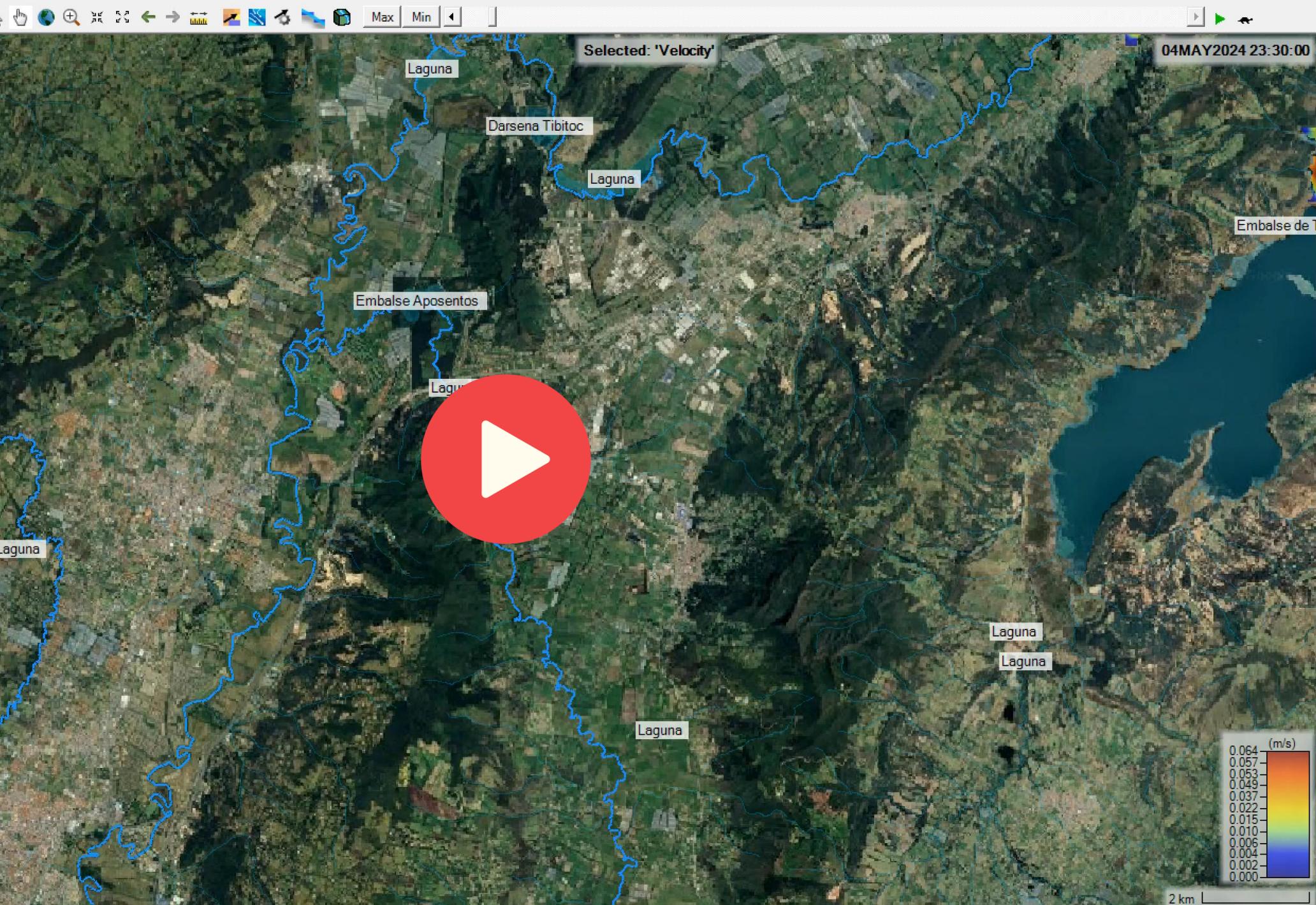
Messages Views Profile Lines Active Fe: ▶

4918883.33, 2129187.02 1 pixel = 29.84 m

Las descargas súbitas y **flujos** drenados del **Embalse San Rafael** se encuentran **con** las que vienen del **Embalse de Tominé**, justo en la zona de llanura baja y cerca de la cabecera municipal del Municipio de Sopó. El **flujo** y su desplazamiento **es gobernado** durante algunas horas **por las descargas del Tominé.**

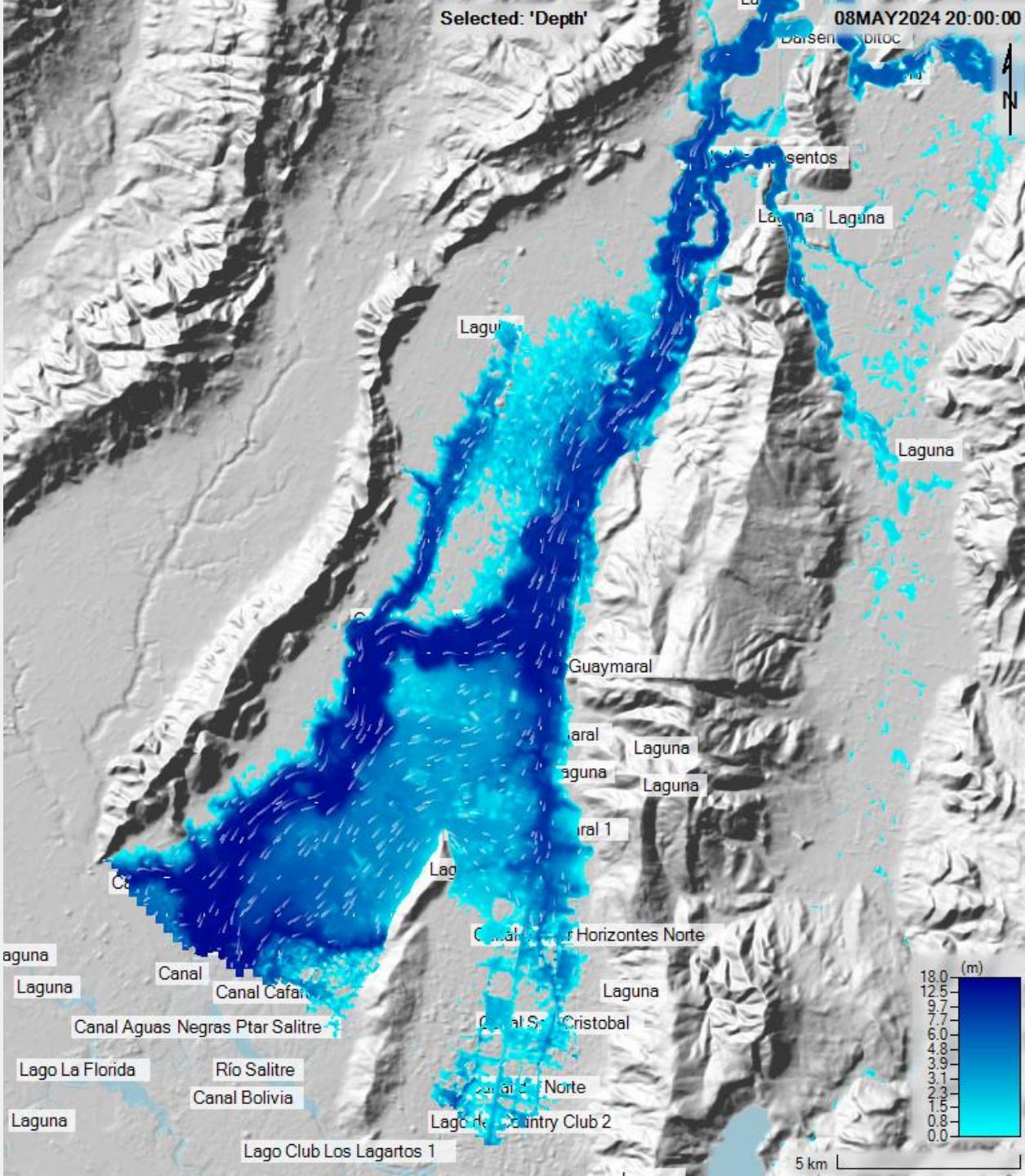


Selected Layer: Velocity



Todo el **flujo** proveniente **desde los embalses del norte y este** (Tominé, Neusa, Sisga y San Rafael), ingresa a Bogotá por la garganta que genera el sistema montañoso del Río Bogotá y Río Frío. Al llegar al área urbana, este se bifurca por la formación de los Cerros de Suba, y parte se descarga en **contraflujo por el canal**

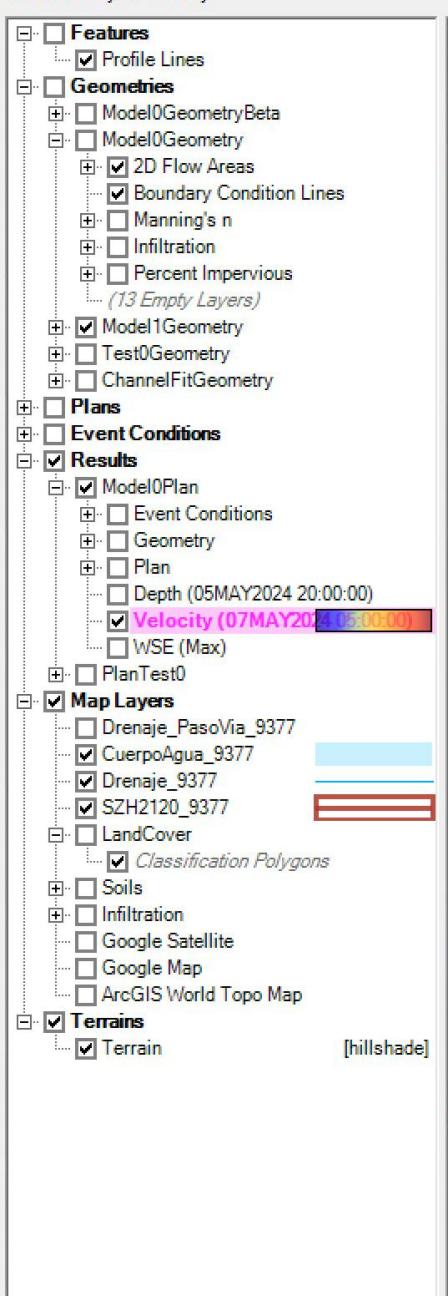
Guaymaral hasta que el frente de onda pasa, luego, el sentido del flujo se invierte hacia el Río Bogotá hasta drenar la inundación producida.



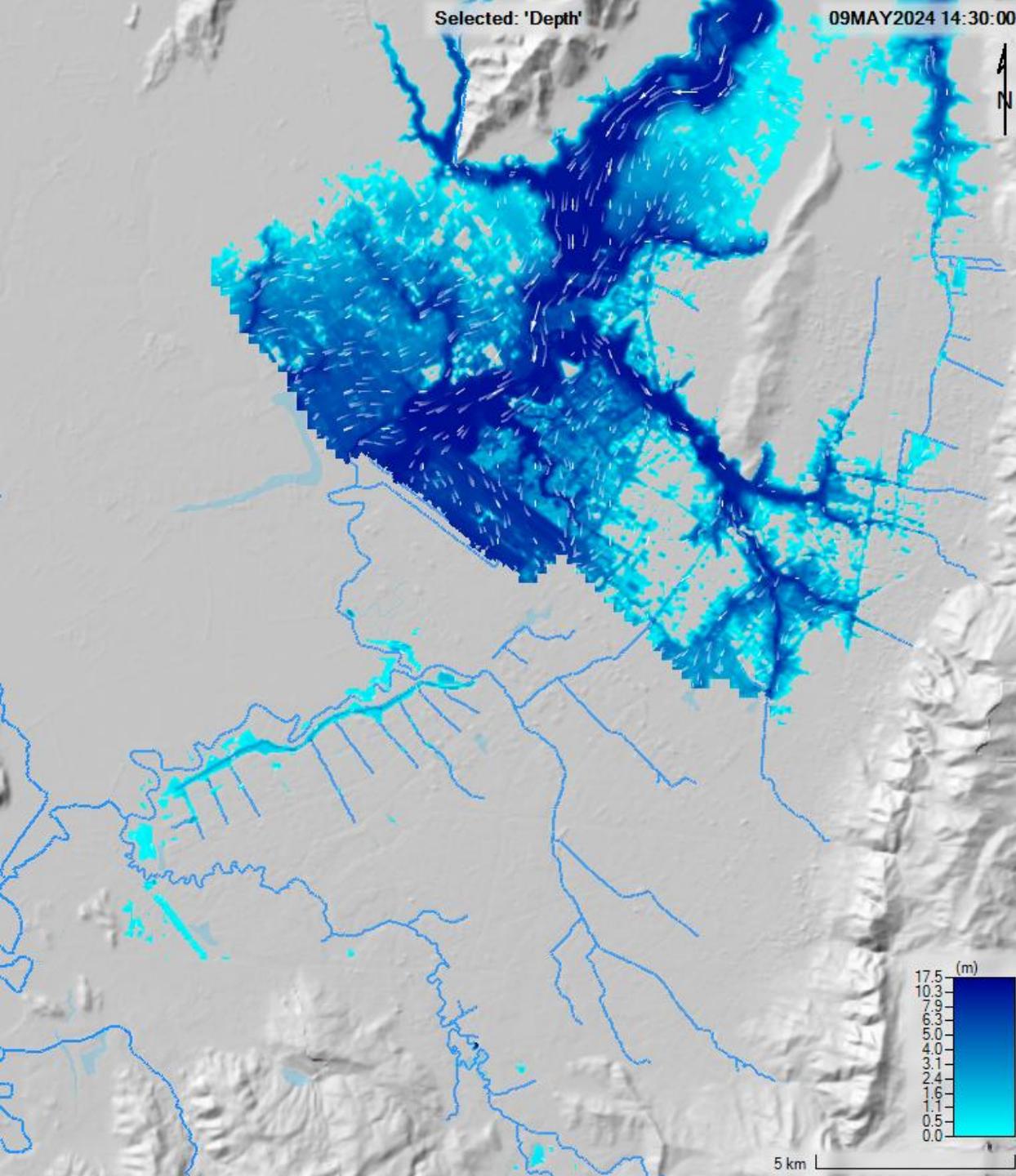
Selected Layer: Velocity



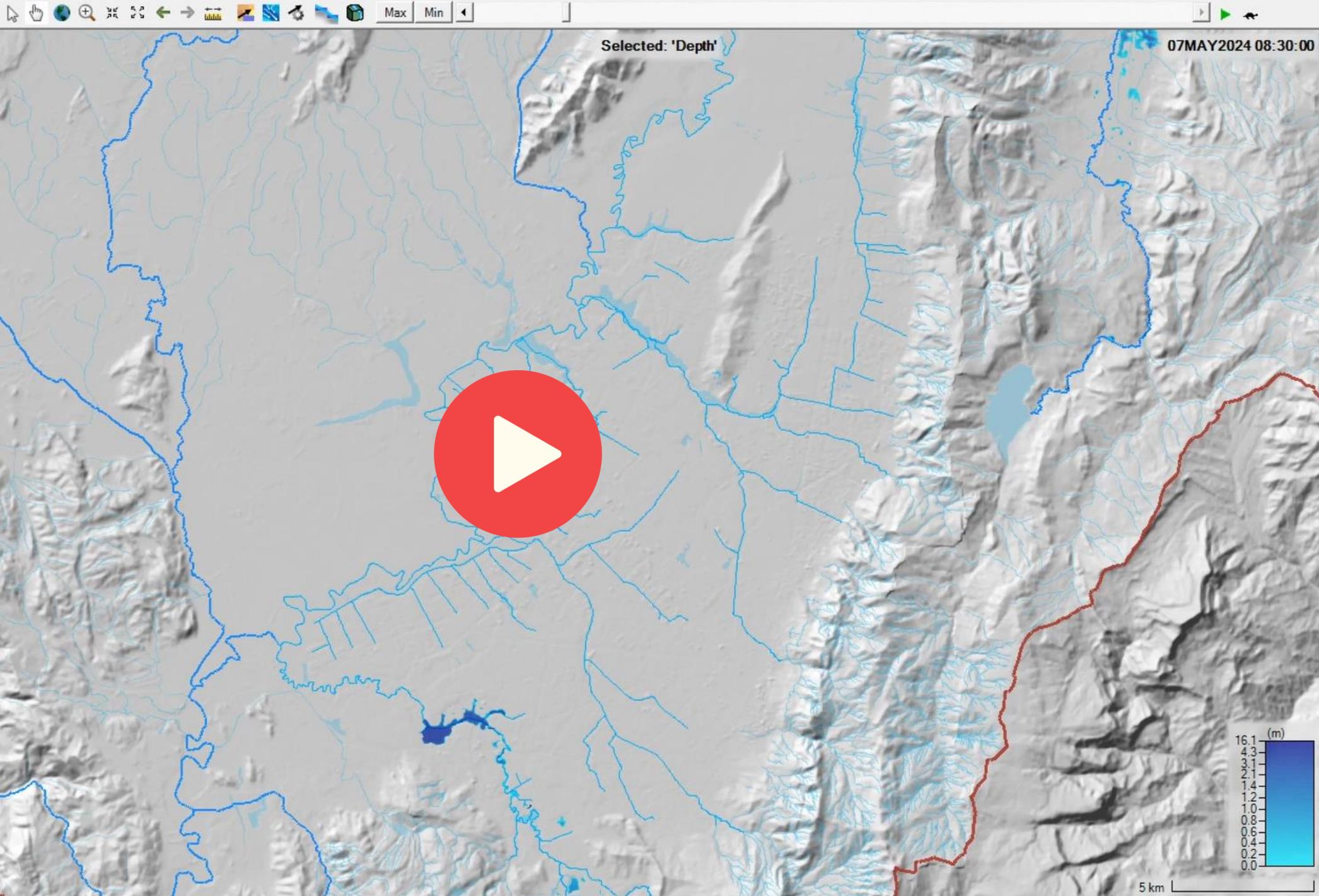
Max Min <

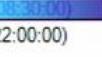


El **flujo** de descarga proveniente **desde** los embalses **Chisacá y La Regadera**, es drenado o amortiguado en la llanura, antes de que los flujos provenientes del sistema norte y este ingresan o se desplacen por el área urbana de Bogotá.



Selected Layer: Depth



- Features
 - Profile Lines
- Geometries
 - Model0GeometryBeta
 - Model0Geometry
 - 2D Flow Areas
 - Boundary Condition Lines
 - Manning's n
 - Infiltration
 - Percent Impervious
 - (13 Empty Layers)
 - Model1Geometry
 - Test0Geometry
 - ChannelFitGeometry
- Plans
- Event Conditions
- Results
 - Model0Plan
 - Event Conditions
 - Geometry
 - Plan
 - Depth (07MAY2024)
 - Velocity (08MAY2024 22:00:00)
 - WSE (Max)
- PlanTest0
- Map Layers
 - Drenaje_PasoVia_9377
 - CuerpoAgua_9377
 - Drenaje_9377
 - SZH2120_9377
- LandCover
 - Classification Polygons
- Soils
- Infiltration
- Google Satellite
- Google Map
- ArcGIS World Topo Map

Terrains

- Terrain

[hillshade]

Messages Views Profile Lines Active Fe

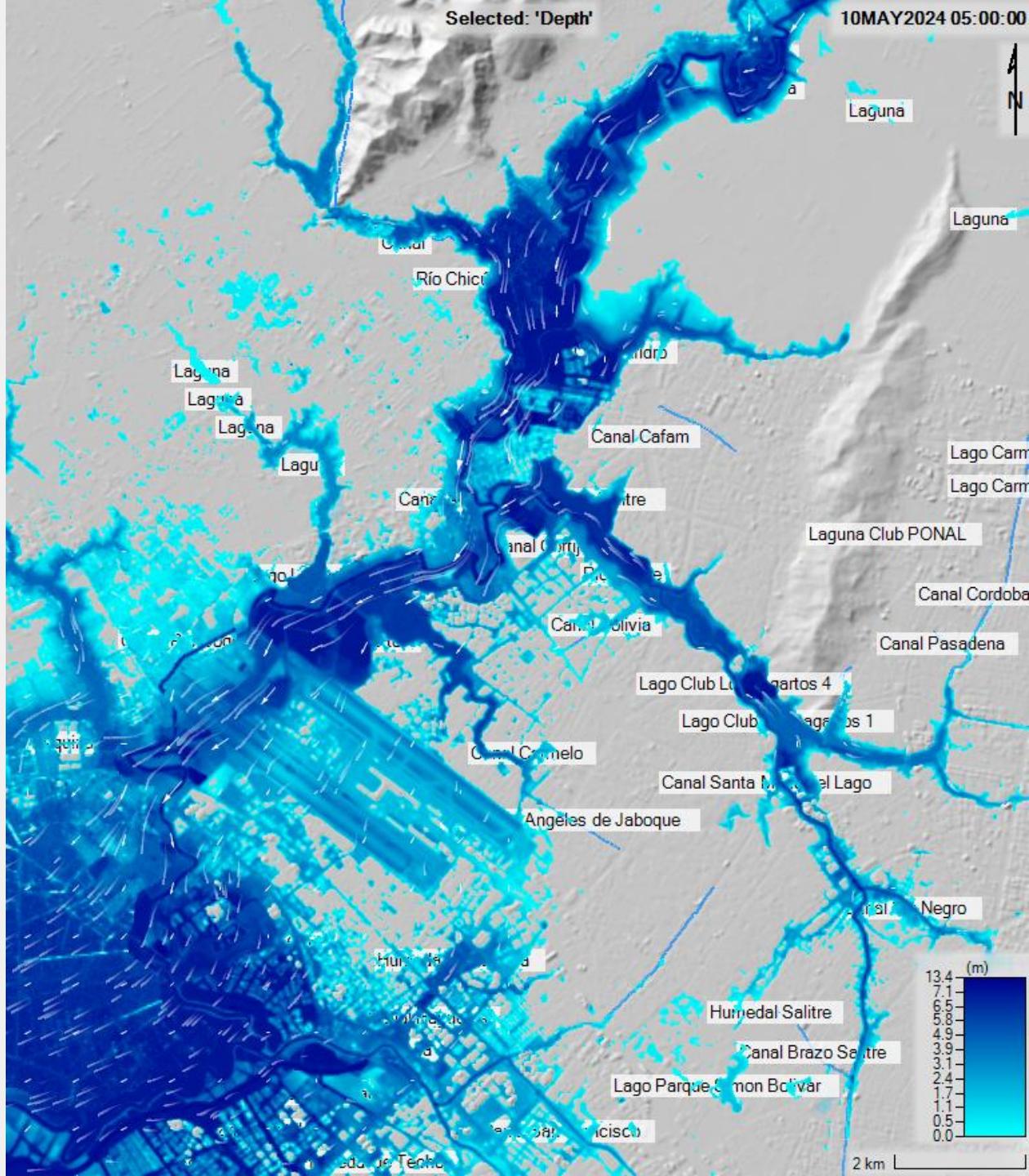
(4897369.90, 2088402.98 1 pixel = 36.85 m)

16.1
4.3
3.1
2.1
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
(m)

5 km

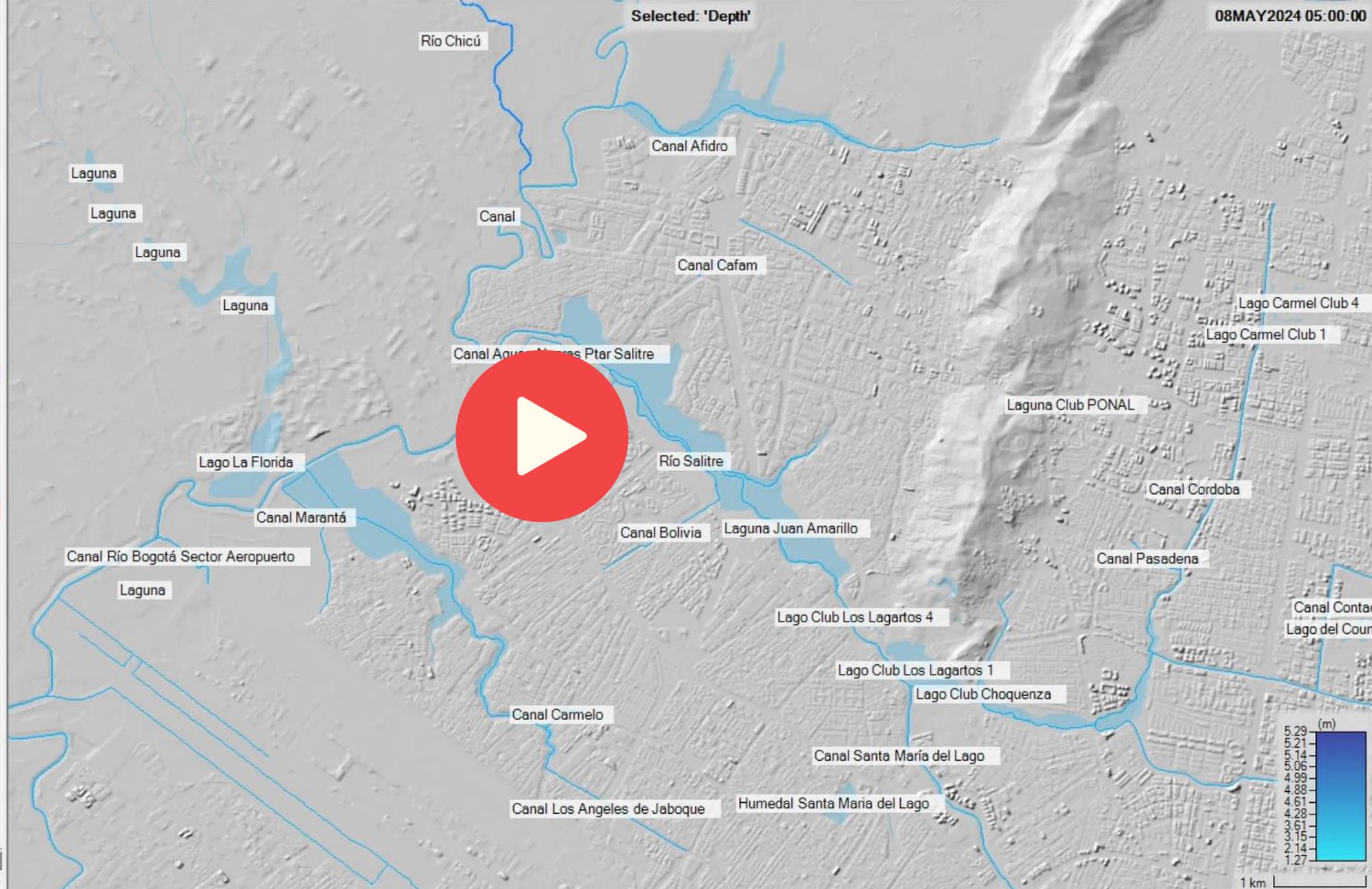
Luego de la inundación, gran parte de los **flujos de excesos** que se descargan **sobre los humedales y canales** de la ciudad de Bogotá, son drenados hasta volver casi a su estado regular.

Sin embargo, la zona de descarga del embalse del Muña hasta el Santo del Tequendama no dispone actualmente de información Lidar de alta precisión, para poder simular completamente la descarga y vaciado de la llanura inundable remanente



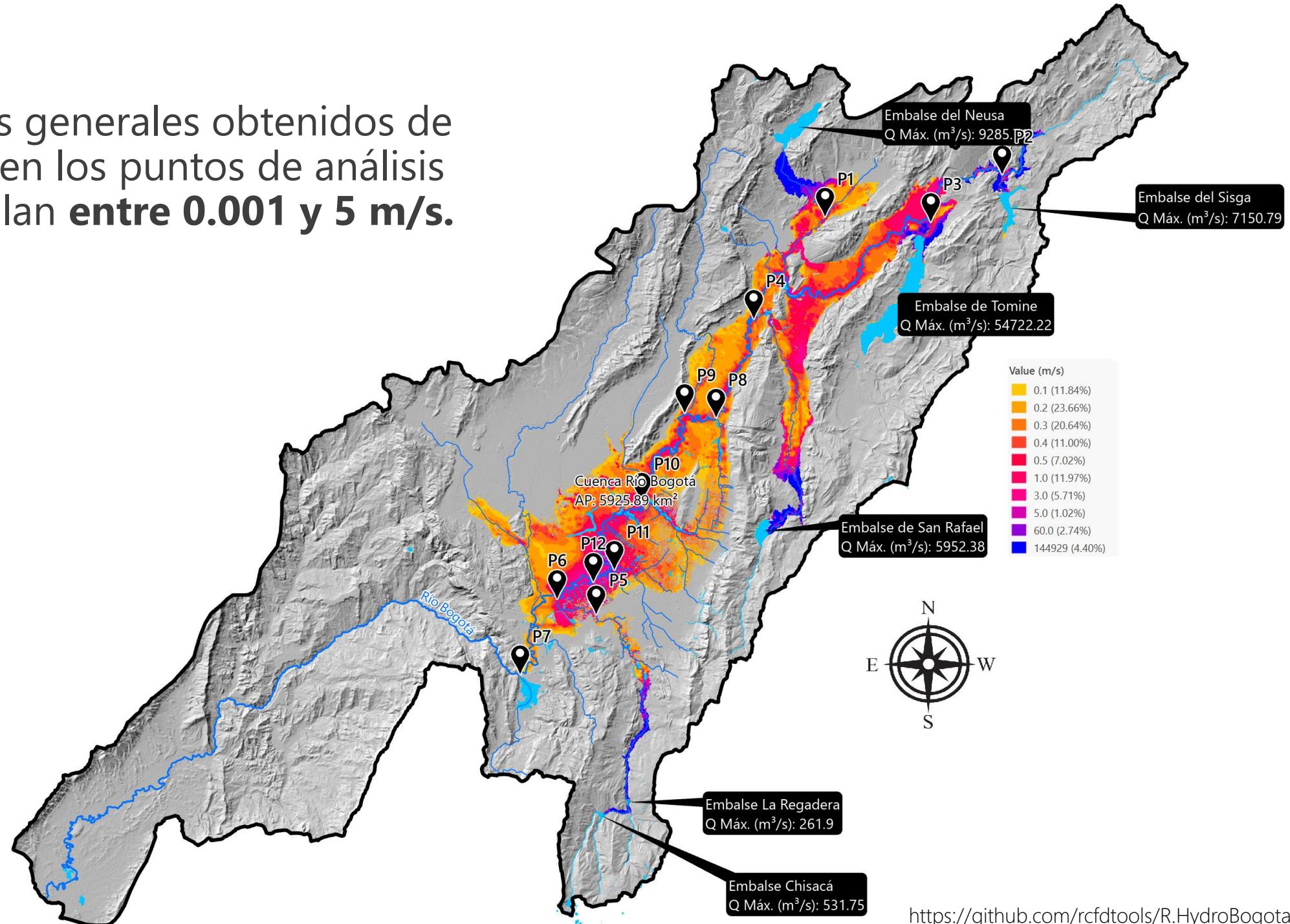
08MAY2024 05:00:00

- Features
 Profile Lines
- Geometries
 - Model0GeometryBeta
 - Model0Geometry
 - 2D Flow Areas
 - Boundary Condition Lines
 - Manning's n
 - Infiltration
 - Percent Impervious
 - (13 Empty Layers)
- Model1Geometry
- Test0Geometry
- ChannelFitGeometry
- Plans
- Event Conditions
- Results
 - Model0Plan
 - Event Conditions
 - Geometry
 - Plan
 - Depth (08MAY2024) 0.00000
 - Velocity (08MAY2024 22:00:00)
 - WSE (Max)
 - PlanTest0
- Map Layers
 - Drenaje_PasoVia_9377
 - CuerpoAgua_9377
 - Drenaje_9377
 - SZH2120_9377
 - LandCover
 - Classification Polygons
 - Soils
 - Infiltration
 - Google Satellite
 - Google Map
 - ArcGIS World Topo Map
- Terrains
 - Terrain

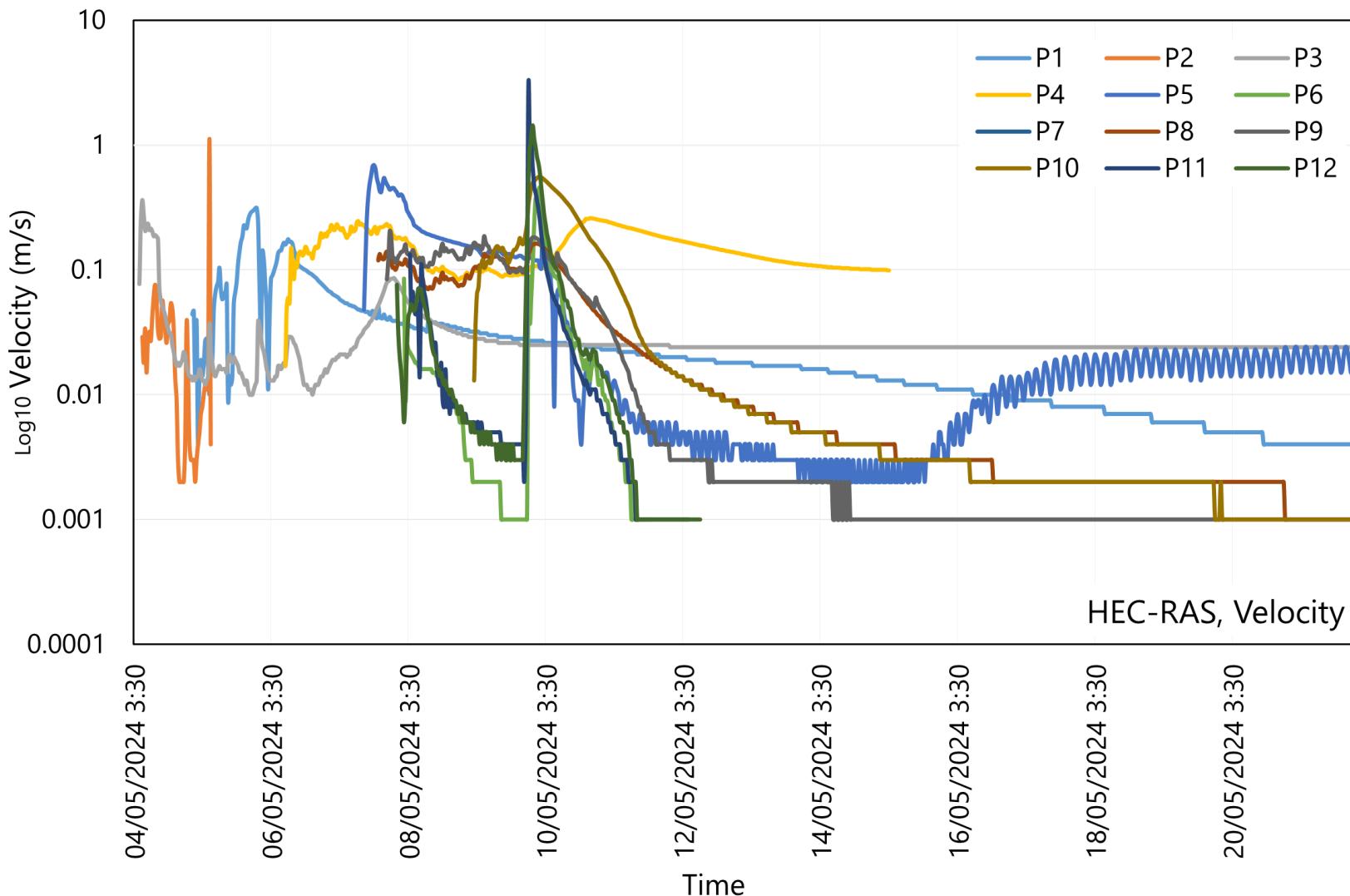


Velocidad máxima del flujo

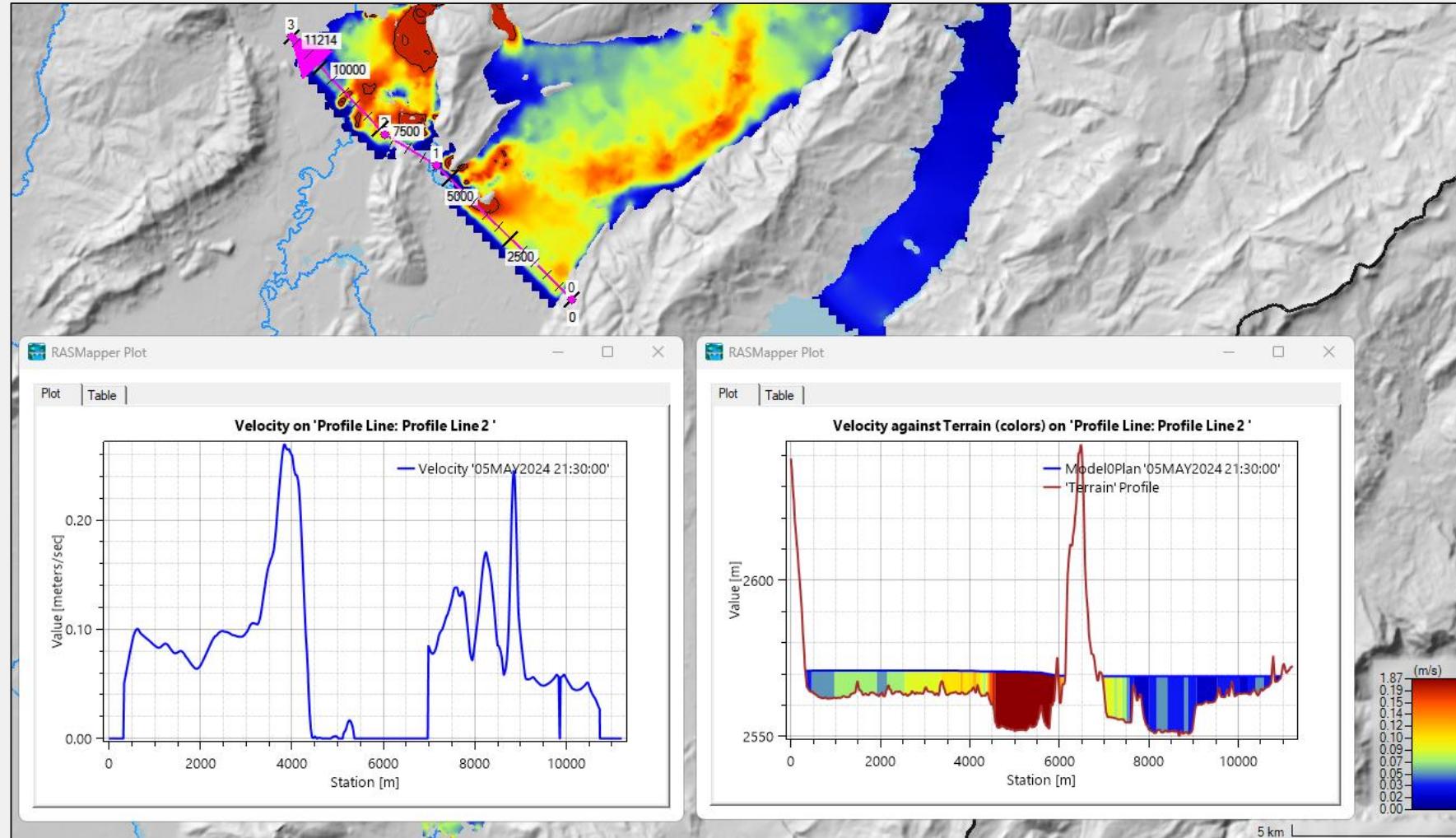
Los resultados generales obtenidos de **velocidades** en los puntos de análisis definidos oscilan **entre 0.001 y 5 m/s.**

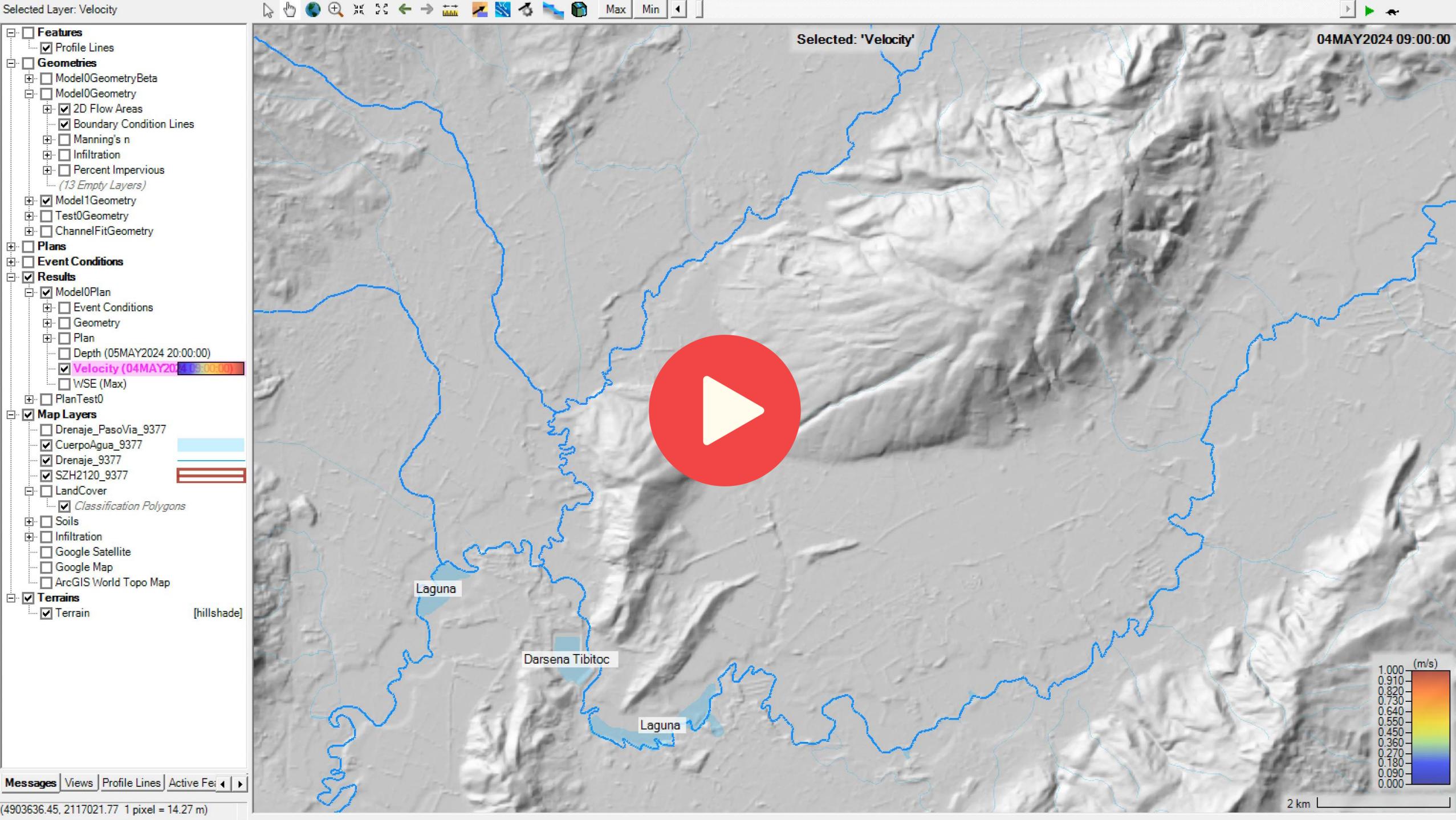


Se puede identificar que en varias de las localizaciones y **luego de que el frente de onda es descargado**, las velocidades oscilan **entre 0.04 y 0.12 m/s.**



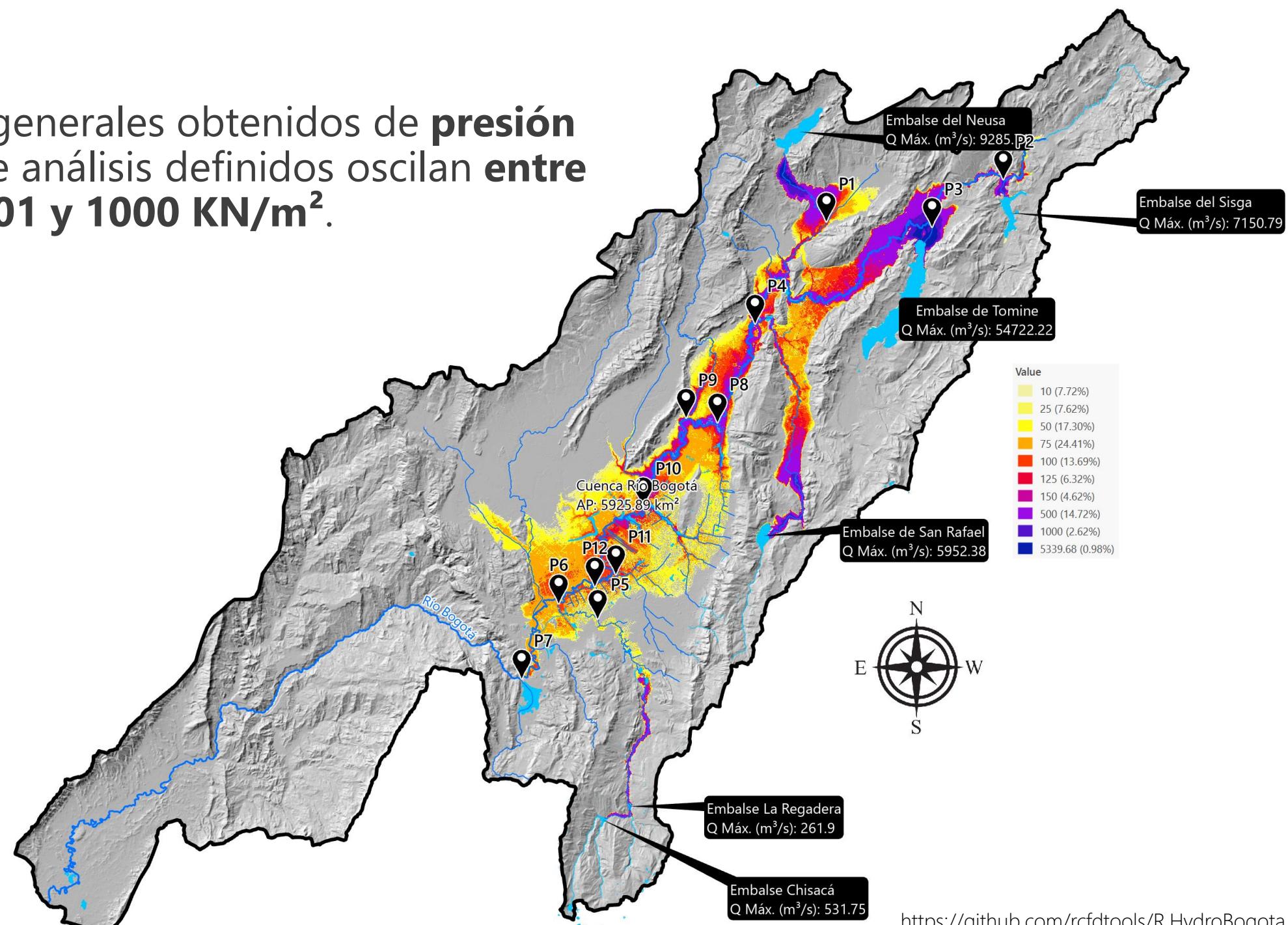
Se ha podido observar que los **frentes de onda** de las descargas provenientes del Embalse del Neusa y las combinadas provenientes de los Embalses Tominé y Sisga, se desplazan a **velocidades similares** hasta encontrarse cerca al Embalse de Aposentos en el Municipio de Sopó, esto a pesar de que la llanura inundable del Río Bogotá es más amplia en el corredor de descarga del Tominé y que los volúmenes descargados son mayores.



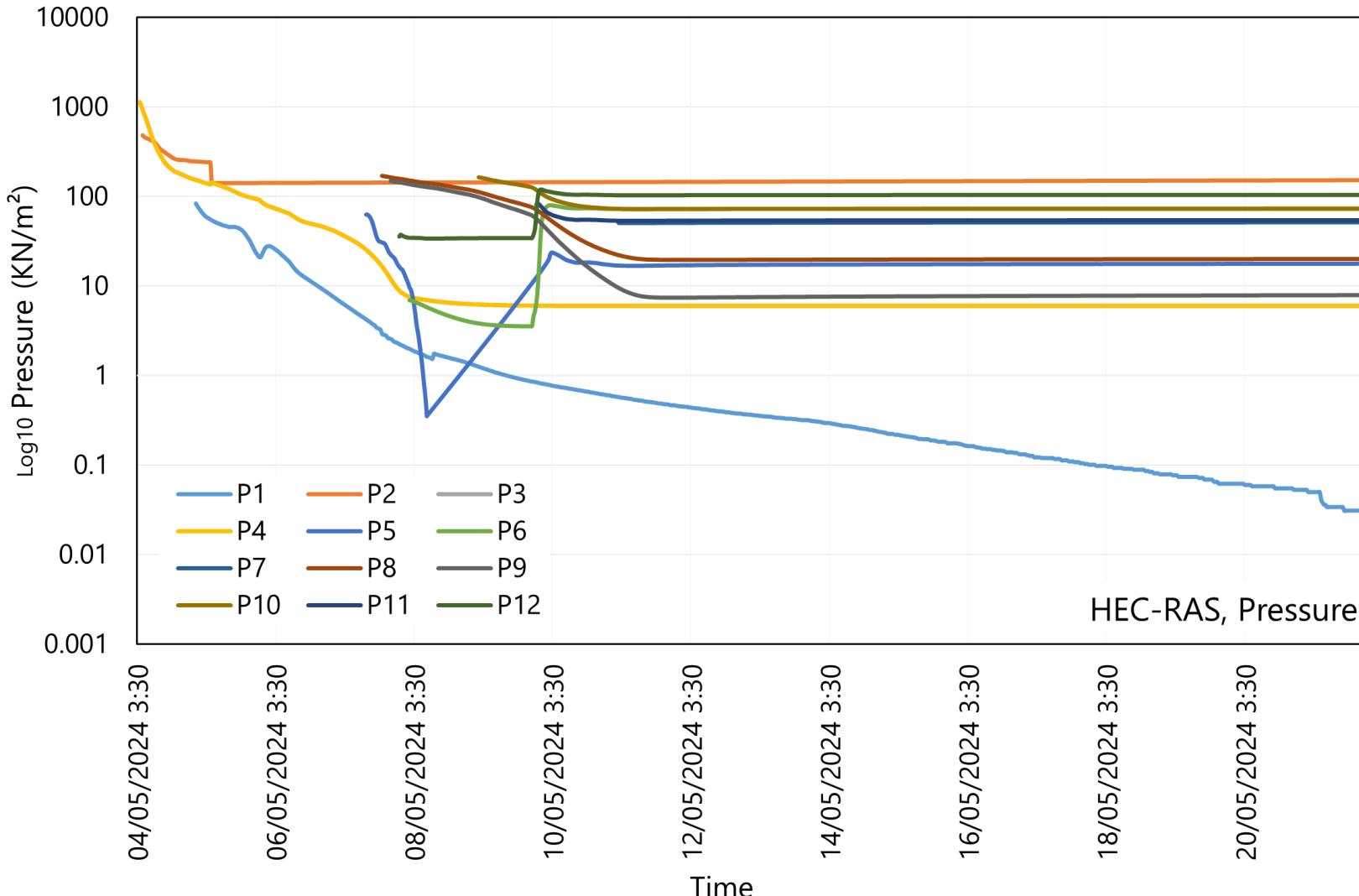


Presión hidrostática del flujo

Los resultados generales obtenidos de **presión** en los puntos de análisis definidos oscilan **entre 0.01 y 1000 KN/m²**.

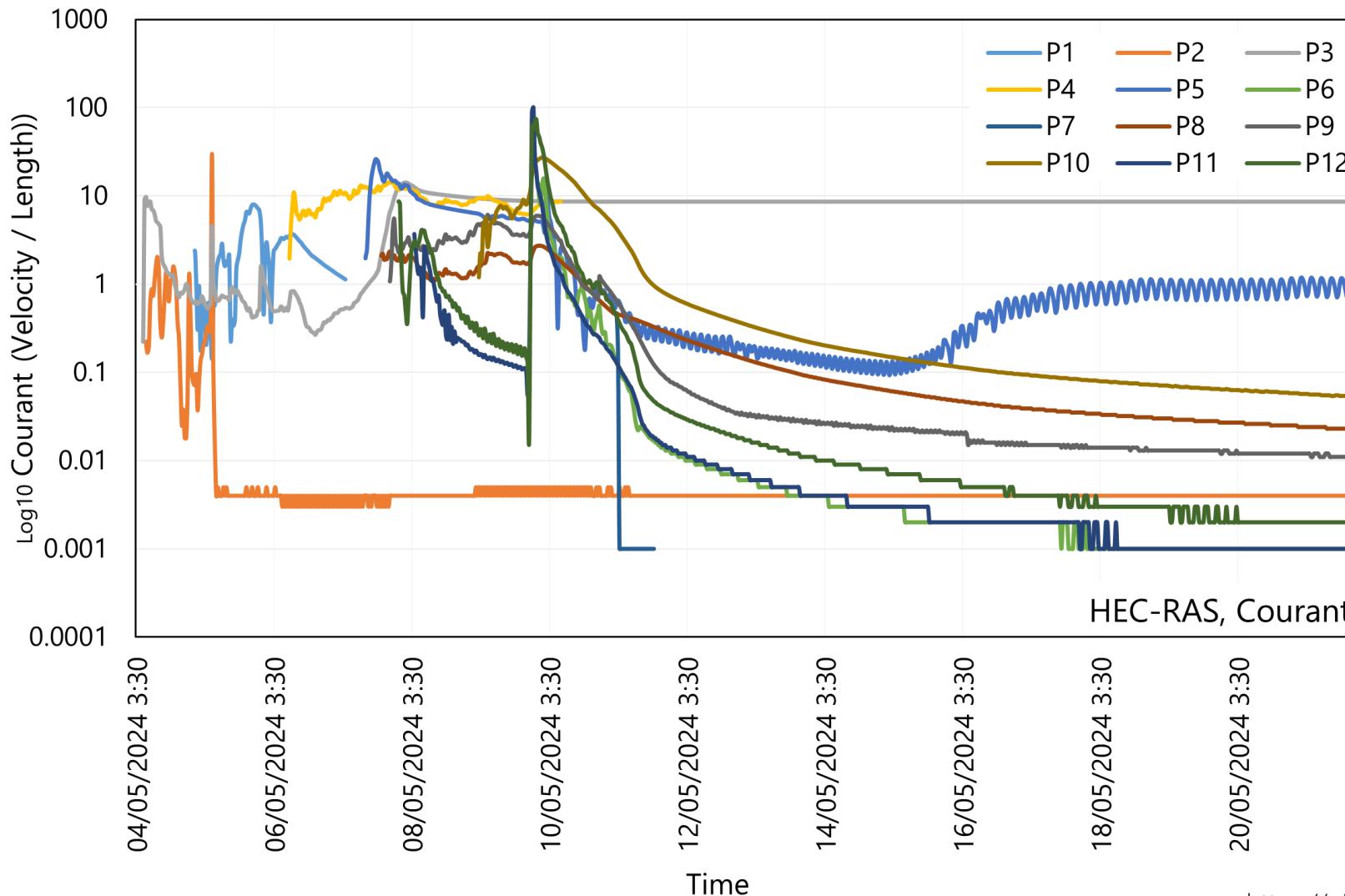


Se puede identificar que en varias de las localizaciones y **luego de que el frente de onda es descargado**, las presiones oscilan **entre 8 y 102 KN/m²**.



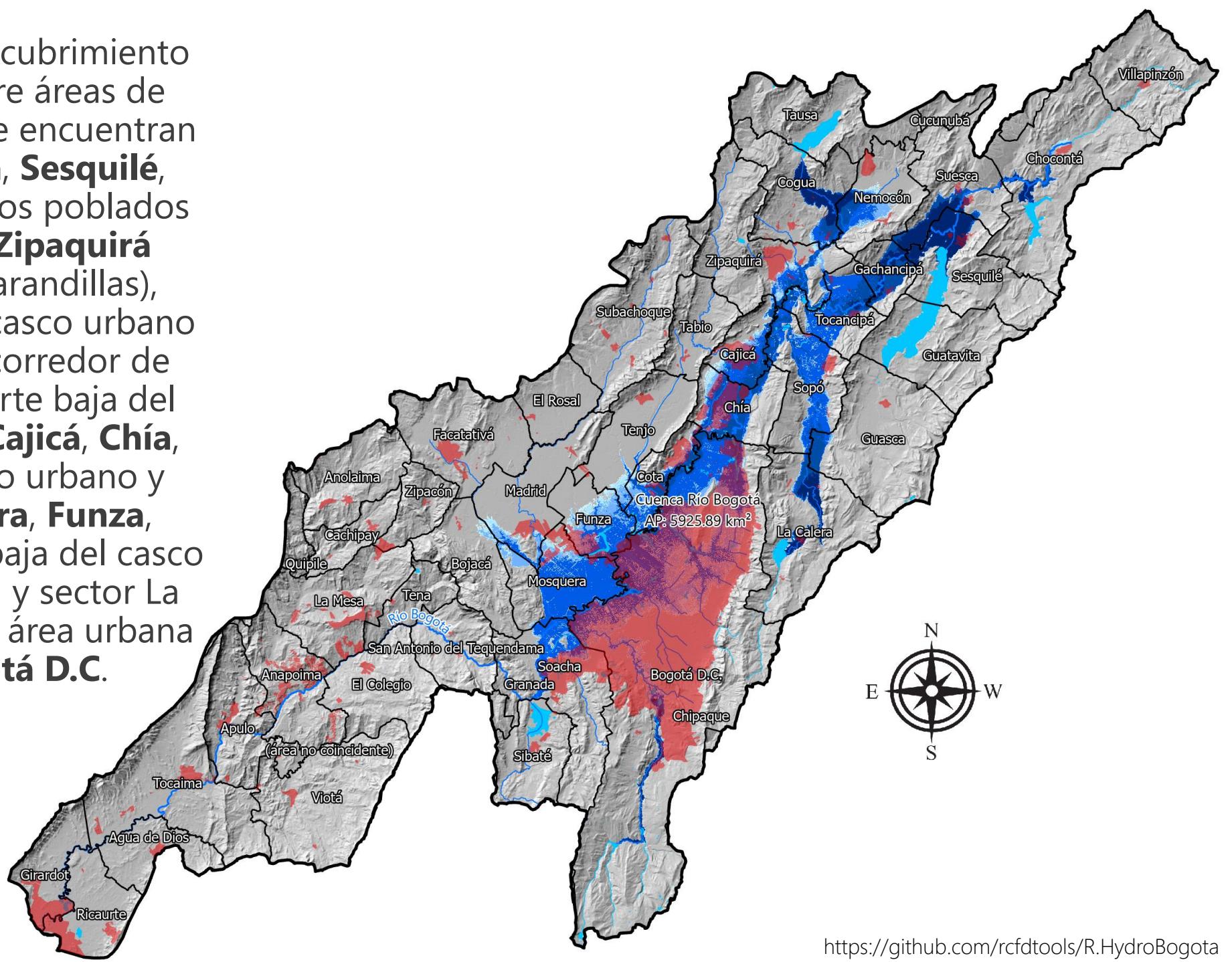
Número de Courant

Los resultados generales obtenidos del **número de Courant** (relación Velocidad / Longitud) en los puntos de análisis definidos cuyos valores oscilan **entre 0.001 y 100** (adimensional). Una vez el frente de onda pasa sobre estos puntos, los valores de la relación V/L tienden a 0.001.



Identificación de asentamientos humanos amenazados

Entre las zonas con mayor cubrimiento de zonas inundables sobre áreas de asentamientos humanos, se encuentran los municipios de **Suesca**, **Sesquilé**, **Gachancipá**, **Cogua** (centros poblados cercanos al Río Neusa), **Zipaquirá** (Pasoancho y parte de Barandillas), **Tocancipá** (parte baja del casco urbano y zona suburbana sobre corredor de servicios viales), **Sopó** (parte baja del casco urbano y Briceño), **Cajicá**, **Chía**, **Cota** (parte baja del casco urbano y sector Parcelas), **La Calera**, **Funza**, **Mosquera**, **Soacha** (parte baja del casco urbano sobre zona central y sector La Despensa) y gran parte del área urbana de la ciudad de **Bogotá D.C.**



8

Conclusiones

Para el ensamble y **ejecución de modelos hidráulicos bidimensionales** de gran escala, es necesario **disponer de información topográfica de alta precisión**, para la integración de modelos híbridos digitales de elevación, combinados con bloques de obstrucción generados a partir de construcciones e infraestructura y corredores de canales bajo pasos de vía.

Como se pudo evidenciar en los resultados obtenidos, **parte del flujo remanente** de descarga, **no pudo ser drenado** completamente abajo de la entrega del Embalse del Muña al Río Bogotá, **debido a que** en esta zona la información topográfica obtenida **no disponía de suficiente detalle**. Dentro de la zona urbana de Bogotá, se pudo observar que el flujo combinado de descarga drenaba adecuadamente por la red de canales y sistemas de humedales, hacia zonas bajas y hacia el Río Bogotá.

Si bien, el **prototipo** de modelación hidráulica **2D** ha sido construido a partir de un mallado que **utilizó celdas** principales **de 240 metros** con refinamiento sobre ejes de drenaje, se pudo observar que el desplazamiento de la onda difusiva de descarga súbita proveniente desde los embalses evaluados **permite la transferencia del flujo entre celdas**, el **desarrollo de los frentes de onda** y su viaje a través de la cuenca.

Para los saltos computacionales de cómputo definidos adaptativos a partir de la **condición de Courant** (utilizando la relación Velocidad / Longitud), se utilizaron **velocidades de referencia entre 0.001 y 60.83 m/s**, con lo cual los valores de Courant oscilan entre 0.0082 y 500 (adimensional) para los tamaños de celdas establecidos.

Durante la ejecución del modelo y la lectura de resultados en 12 puntos estratégicos y en zonas donde ya se encuentra completamente desarrollado el flujo, **se pudo validar que los valores obtenidos oscilan entre 0.001 y 100.**

La **simulación suponiendo la descarga súbita simultánea** desde los embalses localizados en zonas altas, **ha permitido identificar zonas de choque de flujo**, como las presentadas cerca de la cabecera urbana del Municipio de Sopó, no obstante, se pueden presentar condiciones diferentes si las descargas no se producen simultáneamente. Igual sucede con los flujos de descarga provenientes desde el Embalse Chisacá y La Regadera, estos son drenados antes de que el frente de onda proveniente del norte llegue a la ciudad, **sin embargo, se puede presentar una condición en la que la descarga súbita del sur sea producida posterior a la proveniente del norte, combinando estos dos flujos** en el sur de la ciudad de Bogotá D.C.

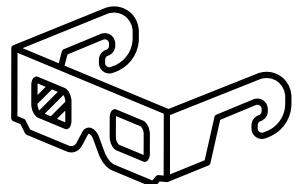
Los **hidrogramas utilizados como referencia** de descarga desde cada uno de los embalses han sido **generados a partir de un único patrón y duración**, lo cual **no necesariamente permite reproducir la condición más crítica** de flujo simultáneo en la llanura.

Se recomienda que los **resultados** presentados en esta etapa sean **utilizados únicamente** como referencia **para validación del funcionamiento** del modelo hidráulico ensamblado.

Análisis específicos de amenazas por inundación en municipios y determinación de rondas hídricas detalladas, **requieren de información topográfica complementaria**, estudios hidrológicos de lluvia-escorrentía, incorporación de los fondos topo-batimétricos de drenajes y simulación utilizando las ecuaciones de la onda dinámica, que tiene en cuenta los términos de la aceleración local y convectiva.



<https://github.com/rcfdtools/R.HydroBogota>



Gracias por su atención