



GEOPETRIS

CARTOGRAFÍA Y ANÁLISIS GEOESPACIAL

INFORME TÉCNICO

Evaluación de susceptibilidad a inundación fluvial

Río Mataquito, tramo Hualañé – Licantén · Provincia de Curicó

Región del Maule, Chile

P R O F E S I O N A L R E S P O N S A B L E

Cristopher Tibor Rimler Melo · Geólogo, Universidad Andrés Bello

D O C U M E N T O

Informe GP-2026-04 · Rev. A

F E C H A

Agosto de 2026

C O N T A C T O

Geopetris SpA · RUT 78.481.166-2 · contacto@geopetris.cl

Ficha técnica

Título	Evaluación de susceptibilidad a inundación fluvial, río Mataquito, tramo Hualañé – Licantén
Área de estudio	Curso inferior del río Mataquito entre Hualañé y Licantén, Región del Maule. Superficie evaluada: 757,6 km ²
Profesional responsable	Cristopher Tibor Rimler Melo, Geólogo (Universidad Andrés Bello)
Método	Superposición ponderada de factores condicionantes morfométricos. Ponderación por proceso analítico jerárquico (AHP)
Factores	Altura sobre el drenaje más próximo — HAND (0,46), pendiente (0,21), distancia al cauce (0,20), índice topográfico de humedad (0,13)
Base topográfica	DEM Copernicus GLO-30, tamaño de celda 30 m
Insumos temáticos	Red de drenaje derivada del DEM (umbral 5.000 celdas). El modelo no incorpora insumos temáticos externos; el catastro de contraste y la cartografía de referencia se detallan en la Tabla 1
Sistema de referencia	EPSG:32719 — WGS 84 / UTM huso 19 Sur
Clasificación	Tres clases (Baja, Media, Alta) por cuantiles del índice; cortes en 1,26 y 1,61
Validación	Catastro de afectación CIGIDEN, evento 21–26 de junio de 2023, sector Licantén, n = 14 puntos. Clase Alta: 100 % de los puntos en 33,4 % del área; razón de frecuencia 3,00. Contraste independiente, sobre muestra reducida, espacialmente agrupada y de bajo poder discriminante (sección 7.5)
Escala de uso recomendada	1:50.000. No apto para análisis a escala predial (sección 8.1)
Naturaleza del producto	Evaluación de susceptibilidad del terreno. No constituye modelación hidráulica, estudio de amenaza ni estudio de riesgo (art. 2.1.17 OGUC)
Fecha	Agosto de 2026 · Revisión A

1. Resumen ejecutivo

Este informe documenta la elaboración y validación de un modelo de susceptibilidad a inundación fluvial para el curso inferior del río Mataquito, entre las localidades de Hualañé y Licantén, Región del Maule, sobre una superficie de 757,6 km². La evaluación se desarrolló mediante superposición ponderada de factores condicionantes en plataforma SIG, sobre cuatro variables morfométricas derivadas íntegramente del modelo digital de elevación Copernicus GLO-30 —altura sobre el drenaje más próximo (HAND), pendiente, distancia al cauce e índice topográfico de humedad—, con clasificación por cuantiles en tres niveles de susceptibilidad relativa.

La ponderación se estableció por proceso analítico jerárquico sobre comparaciones pareadas entre los cuatro factores. El modelo asigna 33,4 % de la superficie a la clase Alta, 28,3 % a la clase Media y 38,3 % a la clase Baja. La clase Alta conforma una franja continua que sigue el fondo del valle del Mataquito y se prolonga por los fondos de valle de sus tributarios, en contraste neto con las laderas del relieve de la Cordillera de la Costa.

El modelo fue contrastado con el catastro de afectación levantado por CIGIDEN tras las inundaciones del 21 al 26 de junio de 2023, empleando 14 puntos de infraestructura dañada del sector de Licantén. La totalidad de los puntos se localiza en la clase Alta, lo que arroja una razón de frecuencia de 3,00 para esa clase, frente a 0,00 en las clases Media y Baja. El catastro no participó en la selección de factores, en la asignación de pesos ni en la definición de los cortes de clasificación, por lo que el contraste conserva carácter independiente, a diferencia del informe GP-2026-03 de esta misma serie, donde la métrica correspondía a un ajuste interno declarado.

Corresponde precisar, no obstante, el alcance de ese resultado, que es considerablemente más acotado de lo que la magnitud de la cifra sugiere. Los sectores catastrados se emplazan en su totalidad sobre el fondo de valle, que es el dominio que el factor dominante del modelo identifica, de modo que el diseño del contraste no admitía un resultado sustancialmente distinto: la prueba acredita que el modelo delimita la planicie de manera consistente con la afectación observada, y no que discrimine

susceptibilidad dentro de ella. La muestra es además reducida ($n = 14$) y está espacialmente agrupada en un solo sector, por lo que no constituye un muestreo independiente del área evaluada. El catastro consigna, además, infraestructura dañada y no extensión inundada, de modo que la razón de frecuencia nula de las clases Media y Baja acredita ausencia de daño catastrado y no ausencia de agua. Por último, y como se desarrolla en la sección 8.5, **la extensión de la clase Alta excede en un orden de magnitud a la planicie de inundación que la propia fuente documenta**, circunstancia inherente al método de clasificación empleado y que impide leer esta clase como una estimación de superficie inundable. El producto se declara, en consecuencia, como una zonificación relativa validada en su capacidad de discriminación, y no como una delimitación de área de inundación.

2. Introducción y objetivos

Las inundaciones fluviales constituyen el peligro natural de mayor recurrencia en la zona central y centro-sur de Chile, y su expresión más severa se concentra en los cursos inferiores de las cuencas costeras, donde la energía del relieve disminuye y el río desarrolla planicies de inundación amplias sobre las que se ha establecido históricamente la ocupación humana. El evento del 21 al 26 de junio de 2023 en las cuencas de los ríos Mataquito y Maule constituye un caso documentado de esa condición, con afectación severa de localidades ribereñas y un registro post-desastre sistemático (CIGIDEN, 2023).

La evaluación de la susceptibilidad a inundación mediante variables morfométricas derivadas de modelos de elevación constituye una aproximación consolidada en la literatura, particularmente a partir de la incorporación del descriptor de altura sobre el drenaje más próximo, que ordena el terreno según su posición vertical respecto a la red de drenaje a la que descarga (Rennó et al., 2008; Nobre et al., 2011). Su ventaja frente a la modelación hidráulica es la posibilidad de cubrir dominios extensos con información de acceso público; su limitación, que no resuelve la dinámica del flujo. Ambas condiciones determinan el alcance de este estudio.

El objetivo general fue elaborar un modelo distribuido de susceptibilidad a inundación fluvial para el tramo señalado, basado íntegramente en información de acceso público y ejecutado en QGIS, y someterlo a contraste cuantitativo contra un registro de afectación observada, documentando con rigor el alcance y las limitaciones del resultado. Los objetivos específicos fueron:

- Derivar y ponderar factores condicionantes morfométricos a partir de un modelo de elevación global de acceso libre, garantizando la reproducibilidad del procedimiento.
- Clasificar el territorio en niveles relativos de susceptibilidad y contrastar el resultado contra el catastro de afectación del evento de junio de 2023 mediante la razón de frecuencia.
- Verificar la coherencia dimensional del resultado frente a los antecedentes hidrológicos y geomorfológicos publicados para el mismo tramo.
- Documentar el procedimiento, incluidas las discrepancias detectadas, con el detalle necesario para su auditoría y replicación.

3. Marco conceptual

3.1. Susceptibilidad, peligro y riesgo aplicados a inundación fluvial

La cadena conceptual habitual en la evaluación de peligros naturales distingue tres niveles. La susceptibilidad corresponde a la propensión intrínseca de un área a que un proceso se genere o se desarrolle, determinada por la correlación de los factores del terreno que lo condicionan (Glade et al., 2005). El peligro o amenaza incorpora además la probabilidad de ocurrencia de un evento de determinada magnitud en un lugar y ventana temporal. El riesgo resulta de combinar la amenaza con la exposición y la vulnerabilidad de las personas, bienes e infraestructura presentes.

Aplicada a la inundación fluvial, la susceptibilidad describe qué sectores del territorio reúnen las condiciones topográficas que favorecen la ocupación por el agua desbordada: posición baja respecto al cauce, escasa pendiente y capacidad de acumulación. El presente estudio se sitúa en ese primer nivel: no evalúa amenaza, no estima probabilidades temporales, no asocia sus clases a períodos de retorno, no modela alturas ni velocidades de flujo, y no incorpora exposición ni vulnerabilidad.

3.2. Susceptibilidad morfométrica y modelación hidráulica

La distinción entre ambas aproximaciones es central para interpretar los resultados de este informe. Un modelo morfométrico ordena el terreno según su forma, y responde a la pregunta de dónde concurren las condiciones topográficas asociadas a la inundación. Un modelo hidráulico resuelve la propagación del flujo para un caudal determinado, y responde a la pregunta de qué superficie se cubre de agua, con qué altura y en qué tiempo.

La primera aproximación produce una zonificación relativa y continua sobre todo el dominio; la segunda, una mancha de inundación asociada a un escenario. No son sustituibles, y sus productos no son comparables como superficies. Un sector clasificado como de susceptibilidad alta reúne las condiciones topográficas de la inundación, sin que ello implique que se inunde en un evento dado; e inversamente, la superficie efectivamente cubierta por una crecida determinada es un subconjunto —habitualmente muy reducido— del dominio morfométricamente predispuesto. La sección 8.5 cuantifica esa diferencia para el presente caso.

3.3. Justificación del enfoque adoptado

Se adoptó un enfoque heurístico con ponderación AHP, por las mismas razones expuestas en los informes homólogos de esta serie: los métodos hidrodinámicos requieren batimetría de cauce, hidrogramas y coeficientes de rugosidad distribuidos, no disponibles para el área a partir de información pública; y el enfoque heurístico mantiene la trazabilidad del razonamiento, dado que cada peso responde a un juicio explícito y auditable.

La contrapartida —el carácter subjetivo de los juicios— se aborda formalizando las comparaciones mediante AHP con verificación de consistencia (sección 5.3) y sometiendo el resultado a contraste contra un registro de afectación observada, independiente del modelo (sección 7).

4. Área de estudio

4.1. Contexto geomorfológico

El polígono evaluado abarca 757,6 km² en el curso inferior del río Mataquito, entre las localidades de Hualañé y Licantén, en el sector occidental de la Región del Maule. El río discurre aquí en un valle labrado en la Cordillera de la Costa, en un tramo donde la energía del relieve ha disminuido y el curso desarrolla una planicie de inundación continua con desarrollo de terrazas y meandros.

El relieve circundante corresponde a cordones y laderas de gradiente moderado a fuerte, disectados por quebradas tributarias que drenan hacia el eje principal. El contraste morfológico entre el fondo de valle plano y bajo, y las laderas que lo flanquean, es nítido y constituye la condición que el modelo debe discriminar. Esa nitidez fue uno de los criterios de selección del tramo, por permitir evaluar el comportamiento del modelo frente a un patrón geomorfológico inequívoco.

Según los antecedentes publicados para el evento de 2023, la planicie de inundación del Mataquito alcanza aproximadamente un kilómetro de ancho en el sector de Licantén, y hasta 1,4 kilómetros en su parte más ancha, en la confluencia con el estero Curepto (CIGIDEN, 2023). Estas dimensiones se emplean en la sección 8.5 como referencia de contraste dimensional del resultado.

4.2. Antecedentes del evento de junio de 2023

Entre el 21 y el 26 de junio de 2023 se desarrolló sobre las cuencas del Mataquito y del Maule un evento de precipitación de magnitud excepcional, con isoterma cero elevada, que produjo crecidas severas en ambos sistemas. Los antecedentes consignados por CIGIDEN para el Mataquito permiten dimensionar la magnitud del evento:

- El caudal máximo registrado en la estación Licantén, antes de la falla del sensor, fue del orden de 5.300 m³/s.
- Los periodos de retorno de los caudales máximos superan holgadamente los 50 años y probablemente los 100 años.
- Las mediciones GPS en Licantén indican que el agua alcanzó una cota aproximada de 10,3 m s. n. m., inundando por completo la plaza de armas de la ciudad.
- El análisis satelital determinó que un 23 % de la planicie de inundación del Mataquito fue ocupada en el sector de Licantén, cifra que la propia fuente califica como subestimación de la extensión real, por haberse tomado la imagen una semana después del evento.

El evento afectó de manera severa a Licantén, tanto en su sector urbano —centro y plaza de armas, avenida Lautaro, hospital y villas residenciales— como en su sector rural, y comprometió asimismo infraestructura vial en Hualañé y sectores ribereños de Curepto, esta última ya en la Provincia de Talca y fuera del polígono evaluado.

4.3. Ocupación del territorio

La ocupación se concentra en el fondo de valle, sobre la planicie de inundación y las terrazas bajas: es allí donde se emplazan las localidades, la infraestructura vial estructurante y la actividad agrícola del tramo. Las laderas presentan ocupación dispersa. Esta distribución es relevante para la interpretación del catastro de contraste, dado que condiciona dónde puede registrarse afectación, según se desarrolla en la sección 8.2.

5. Datos y metodología

5.1. Fuentes de información y procesamiento

La totalidad de los insumos proviene de fuentes de acceso público. Los umbrales de reclasificación aplicados a cada factor no se reproducen en esta revisión, de modo que la replicación exacta del índice requiere los parámetros consignados en el registro de proyecto; su publicación se contempla en la revisión siguiente (sección 9). Corresponde destacar que los cuatro factores del modelo derivan de un único insumo —el modelo de elevación—, sin incorporación de información temática externa. La Tabla 1 individualiza el origen y las condiciones de uso de cada elemento.

Insumo	Descripción	Fuente	Licencia
Modelo de elevación	DEM Copernicus GLO-30, celda 30 m, reproyectado a UTM 19S	ESA / Copernicus	Uso libre
Red de drenaje	Derivada del DEM por acumulación de flujo (r.watershed), umbral 5.000 celdas	Elaboración propia	—
Catastro de afectación	Puntos de infraestructura dañada, evento 21-26 junio 2023, sector Licantén; 14 registros empleados	CIGIDEN (2023)	Uso con atribución
Cartografía de referencia	Mapa base del recuadro localizador de la lámina	OpenStreetMap	ODbL

Tabla 1. Insumos utilizados. Sistema de referencia: EPSG:32719 (WGS 84 / UTM 19S). Superficie evaluada: 757,6 km².

El procesamiento se realizó íntegramente en QGIS con módulos GRASS y GDAL. La secuencia fue: reproyección del DEM al sistema métrico de trabajo; corrección de depresiones y derivación de la red de drenaje por acumulación de flujo; cálculo de la altura sobre el drenaje más próximo respecto de esa red; derivación de pendiente y del índice topográfico de humedad; cálculo de la distancia euclidiana al cauce; reclasificación de cada factor a escala común; superposición ponderada; y clasificación final por cuantiles. Todas las capas se procesaron en el mismo sistema de referencia y sobre la misma malla de celdas, evitando remuestreos intermedios que degradarían la información.

5.2. Selección y justificación de los factores

Altura sobre el drenaje más próximo (HAND). Expresa la diferencia de cota entre cada celda y el punto de la red de drenaje al que descarga siguiendo la dirección de flujo. Es el descriptor morfométrico más próximo al mecanismo físico del desborde, por cuanto ordena el terreno según su posición vertical relativa al nivel de base local, y discrimina directamente el fondo de valle inundable de las superficies elevadas sobre él (Rennó et al., 2008; Nobre et al., 2011). Se le asignó la mayor susceptibilidad a los valores bajos.

Pendiente del terreno. Controla la permanencia y la acumulación del agua sobre la superficie. Las superficies de baja pendiente favorecen el estancamiento y la expansión lateral de la lámina; las pendientes fuertes evacúan el flujo y no permiten su permanencia. Se asignó mayor susceptibilidad a las pendientes bajas.

Distancia al cauce. Aproxima la exposición al desborde lateral desde el cauce principal y sus tributarios. Su fundamento es la disminución de la probabilidad de ocupación con el alejamiento del eje de escurrimiento. Se asignó mayor susceptibilidad a la proximidad.

Índice topográfico de humedad. Combina el área de captación aguas arriba con la pendiente local para expresar la tendencia del terreno a acumular agua. Aporta discriminación en sectores de topografía suave donde los tres factores anteriores presentan poco contraste. Se asignó mayor susceptibilidad a los valores altos.

No se incorporaron el uso y la cobertura del suelo, la permeabilidad del sustrato, la presencia de obras de defensa ni variables hidrológicas distribuidas. Sus implicancias se desarrollan en la sección 8.4.

5.3. Ponderación de los factores

Los pesos se establecieron mediante proceso analítico jerárquico (Saaty, 1980), formalizando comparaciones pareadas entre los cuatro factores sobre la escala fundamental. Los juicios adoptados expresan la jerarquía que el marco conceptual de la sección 3 sustenta: la posición vertical respecto al drenaje domina moderadamente sobre la pendiente y de manera más marcada sobre la distancia al cauce y sobre el índice de humedad; la pendiente y la distancia al cauce se consideran de importancia equivalente entre sí y superiores al índice de humedad, que cumple un rol complementario.

El vector de prioridades resultante, aplicado en la construcción del índice, es: HAND 0,46; pendiente 0,21; distancia al cauce 0,20; índice topográfico de humedad 0,13. La matriz de comparación pareada y su verificación de consistencia se conservan en el registro de proyecto y no se reproducen en esta revisión; su incorporación se contempla en la revisión siguiente, conforme se indica en la sección 9.

Corresponde precisar el alcance que una verificación de consistencia tendría, en los mismos términos declarados en el informe GP-2026-03 de esta serie: el ratio de consistencia acredita que las comparaciones pareadas no se contradicen entre sí; no acredita que los pesos reproduzcan el comportamiento real del sistema. La validez sustantiva se verifica únicamente contra evidencia observada, y a ello se destina la sección 7.

5.4. Red de drenaje y sensibilidad del parámetro de umbral

La red de drenaje se extrajo del modelo de elevación mediante acumulación de flujo, con un umbral de 5.000 celdas de acumulación para la definición de cauces, equivalente a un área aportante mínima del orden de 4,5 km². Este parámetro merece declaración expresa por su influencia sobre el resultado completo: la red generada determina tanto el cálculo de HAND como el de la distancia al cauce, factores que en conjunto concentran dos tercios del peso del modelo.

El umbral se fijó de modo que la red reprodujera el cauce del Mataquito y sus tributarios principales reconocibles en cartografía de referencia. Una red excesivamente densa deprimiría artificialmente los valores de HAND en posiciones de ladera, expandiendo la clase Alta hacia los interfluvios; una red demasiado rala sobreestimaría la altura sobre el drenaje en los fondos de quebrada, contrayéndola. No se ejecutó un análisis de sensibilidad sistemático de este parámetro; su ausencia se declara y su ejecución se recomienda en la sección 9.

5.5. Integración y clasificación

El índice de susceptibilidad se calculó como suma ponderada de los factores reclasificados. El resultado se clasificó en tres clases —Baja, Media y Alta— mediante cuantiles, con cortes del índice en los valores 1,26 y 1,61, de modo que cada clase representa aproximadamente un tercio del área de estudio ordenada por susceptibilidad creciente. Esta decisión favorece la legibilidad para usuarios no especialistas, produce una partición estable y evita la arbitrariedad de umbrales fijos no calibrados localmente. Su contrapartida, discutida en las secciones 8.5 y 8.6, es que las clases resultan relativas al área evaluada y que sus superficies son un producto del método de clasificación antes que una medida del fenómeno.

5.6. Catastro de contraste: construcción y criterios

El conjunto de contraste se construyó a partir del catastro de afectación levantado en terreno por CIGIDEN con posterioridad al evento de junio de 2023, que comprende 54 puntos de infraestructura dañada distribuidos entre Constitución, Licantén y Hualañé. De ese conjunto se emplearon los 14 puntos correspondientes a sectores situados dentro del polígono evaluado; los restantes quedan fuera del área de estudio y no fueron considerados.

Los puntos corresponden a sectores nominados en el catastro de origen —centro y plaza de armas, avenida Lautaro, hospital, villas residenciales y sectores rurales próximos—. Corresponde declarar el procedimiento seguido para su incorporación al análisis: el catastro de origen identifica los sectores afectados por su denominación, y su posición fue establecida por localización de esas denominaciones sobre cartografía de referencia, no a partir de coordenadas publicadas. La incertidumbre posicional de cada punto es, en consecuencia, del orden de la extensión del sector nominado, que en varios casos excede el

tamaño de celda del modelo. Los puntos no constituyen un inventario trazado por el autor, sino la localización de sectores de afectación documentados por un tercero, con la imprecisión que ese procedimiento conlleva.

Este registro es independiente del modelo en sentido estricto: no participó en la selección de factores, en la asignación de pesos, en la reclasificación ni en la definición de los cortes de clasificación. El contraste de la sección 7 mide, en consecuencia, capacidad de discriminación y no ajuste interno.

6. Resultados

6.1. Distribución de clases

La clasificación del índice sobre el dominio evaluado entrega la distribución de superficie que se presenta en la Tabla 3.

Clase	Superficie (m ²)	Superficie (km ²)	Proporción del área
Alta	252.729.889	252,7	33,4 %
Media	214.454.389	214,5	28,3 %
Baja	290.371.224	290,4	38,3 %
Total	757.555.502	757,6	100,0 %

Tabla 3. Distribución de superficie por clase de susceptibilidad. Las proporciones responden al método de clasificación por cuantiles; véase la sección 8.5.

6.2. Distribución espacial de la susceptibilidad

La clase Alta conforma una franja continua, de eje aproximadamente este-oeste, que sigue el fondo del valle del Mataquito y se ensancha aguas abajo de Hualañé, en el sector donde el valle se abre. Desde ese eje la clase se prolonga hacia el interior por los fondos de valle de las quebradas tributarias, generando un patrón dendrítico que reproduce la estructura de la red de drenaje.

Las clases Baja y Media ocupan las laderas y los interfluvios del relieve de la Cordillera de la Costa. La clase Media se dispone predominantemente como banda de transición entre el fondo de valle y las laderas altas, y de manera subordinada como manchas dispersas en sectores de topografía suave en altura, donde el índice topográfico de humedad adquiere mayor influencia relativa.

El contraste entre el fondo de valle y las laderas queda resuelto de manera neta: la transición entre la clase Alta y las restantes coincide con el quiebre de pendiente que limita la planicie. El patrón es coherente con la estructura geomorfológica del tramo y con el comportamiento esperable del descriptor dominante del modelo.

Debe advertirse desde ya —y se desarrolla en la sección 8.5— que la extensión de la clase Alta no se restringe a la planicie de inundación del curso principal, sino que incorpora la totalidad de los fondos de valle tributarios del dominio. **La clase Alta no debe leerse, por tanto, como una representación de la superficie inundable del Mataquito.**

Mapa de susceptibilidad a inundación fluvial — Río Mataquito, tramo Hualañé–Licantén

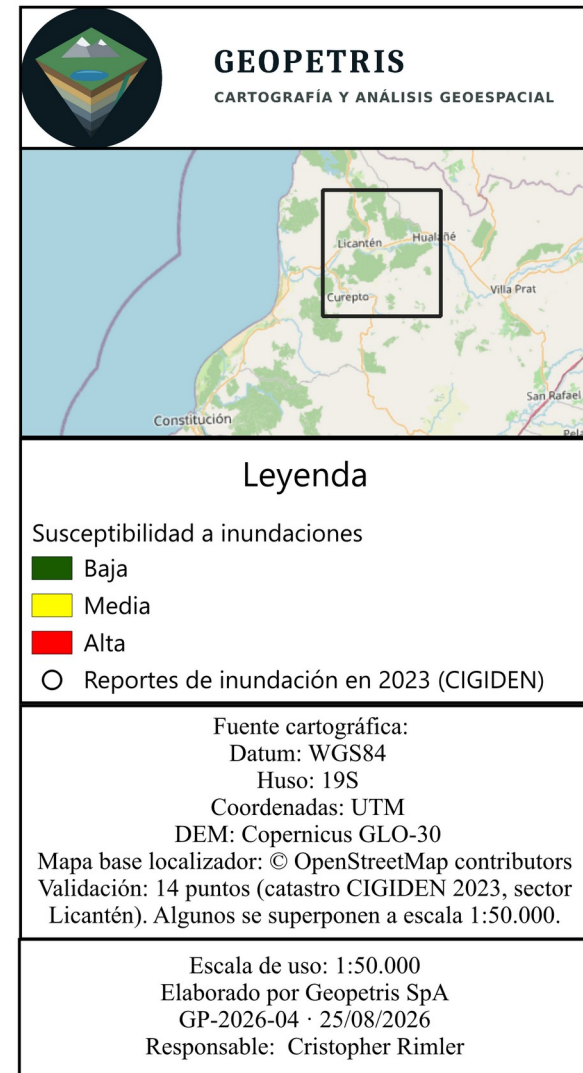
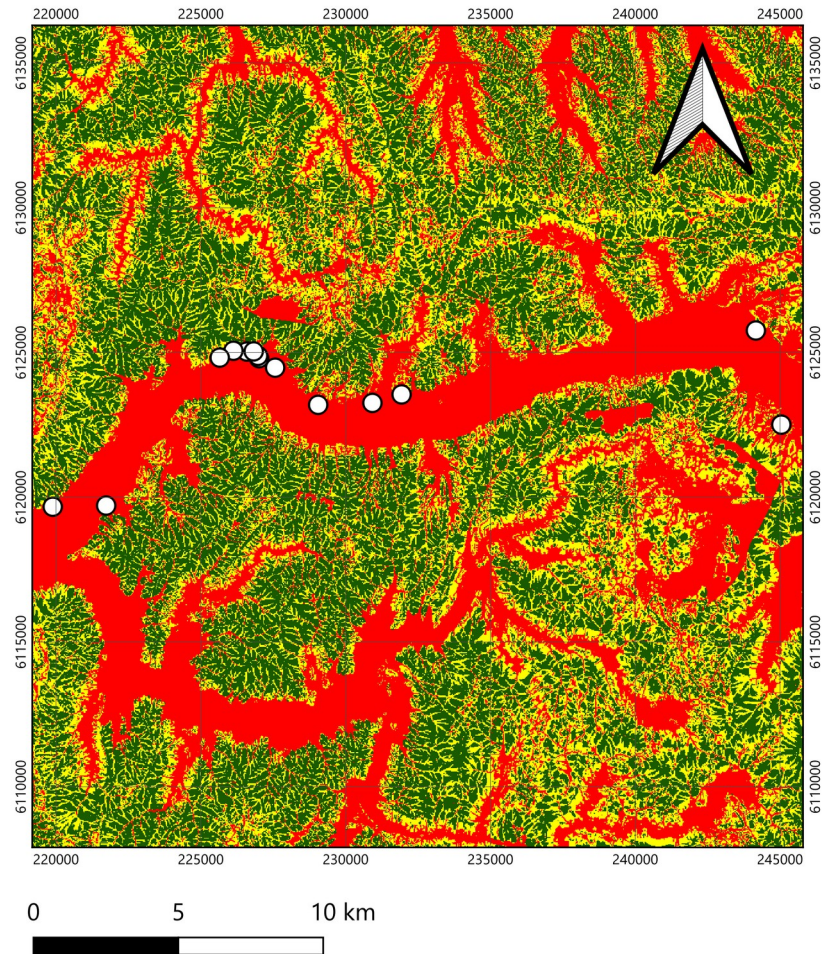


Figura 1. Zonificación de susceptibilidad a inundación fluvial, río Mataquito, tramo Hualañé – Licantén. Clasificación en tres clases por cuantiles del índice, sobre DEM Copernicus GLO-30. Círculos blancos: puntos de afectación del catastro CIGIDEN correspondientes al evento del 21 al 26 de junio de 2023, empleados en la validación (n = 14); a la escala de representación varios se solapan en el sector de Licantén. Sistema de referencia EPSG:32719. Escala de uso 1:50.000.

7. Validación

7.1. Diseño de la validación y métrica empleada

La validación se efectuó mediante la razón de frecuencia (RF), definida como el cociente entre la proporción de puntos de afectación observados en una clase y la proporción de superficie que esa clase ocupa (Lee y Pradhan, 2007). Un valor de 1,00 corresponde a una distribución aleatoria: la clase captura exactamente los puntos que le corresponderían por su tamaño. Valores superiores a 1 indican concentración por sobre lo esperable por azar, y valores inferiores, dispersión. Un modelo útil debe presentar razones de frecuencia crecientes desde la clase Baja hacia la clase Alta, con la clase Alta claramente por encima de la unidad.

La métrica se reporta por clase y no como tasa de captura agregada, dado que esta última puede elevarse trivialmente ampliando la superficie de la clase de mayor susceptibilidad. Solo la relación entre puntos capturados y área ocupada permite juzgar el desempeño real de una zonificación.

7.2. Desempeño frente al catastro de afectación

El modelo fue contrastado con los 14 puntos de afectación descritos en la sección 5.6. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Clase	Proporción del área	Puntos	Proporción de puntos	Razón de frecuencia
Alta	33,4 %	14	100,0 %	3,00
Media	28,3 %	0	0,0 %	0,00
Baja	38,3 %	0	0,0 %	0,00

Tabla 4. Desempeño del modelo frente al catastro de afectación CIGIDEN, evento de junio de 2023 (n = 14).

La totalidad de los puntos de afectación se localiza en la clase Alta, que ocupa el 33,4 % de la superficie evaluada, de lo que resulta una razón de frecuencia de 3,00. Ningún punto se sitúa en las clases Media o Baja, que en conjunto cubren dos tercios del dominio. La zonificación presenta, en consecuencia, razones de frecuencia decrecientes desde la clase Alta hacia la Baja, con valores nulos en las clases Media y Baja. Debe precisarse que esos valores nulos no expresan un gradiente medido, sino la ausencia de observaciones en dichas clases: con la totalidad de los puntos concentrada en una sola clase, la métrica no informa sobre el comportamiento relativo de las restantes.

Como referencia comparativa dentro de esta serie, el modelo de remociones en masa elaborado para los cerros de Valparaíso bajo un procedimiento equivalente alcanzó una razón de frecuencia de 2,46 en su clase Alta sobre una base de 78 eventos, y el modelo de incendios forestales de Til Til – Curacaví alcanzó 1,60 en condición de ajuste interno declarado. El valor de 3,00 aquí obtenido es el más alto de la serie, pero la comparación entre las tres cifras no es directa: además de sustentarse en la base empírica más reducida, este contraste se efectúa sobre un diseño de menor exigencia que el de los informes previos, conforme se declara en la sección 7.5. La magnitud del valor no debe interpretarse como evidencia de un desempeño superior.

7.3. Concordancia con la estimación satelital de inundación

De manera complementaria al contraste puntual, el resultado se comparó con la estimación de duración de la inundación elaborada por el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) sobre imágenes Sentinel para el sector urbano de Licantén, publicada en el informe post-desastre de la fuente del catastro (CIGIDEN, 2023, Figura 11). Ese producto asigna a cada píxel el número de días durante los cuales se detectó presencia de agua en el período del 1 de junio al 5 de julio de 2023, y constituye por tanto un registro de inundación observada por sensor remoto, independiente del modelo y de distinta naturaleza que el catastro de daño empleado en la sección 7.2.

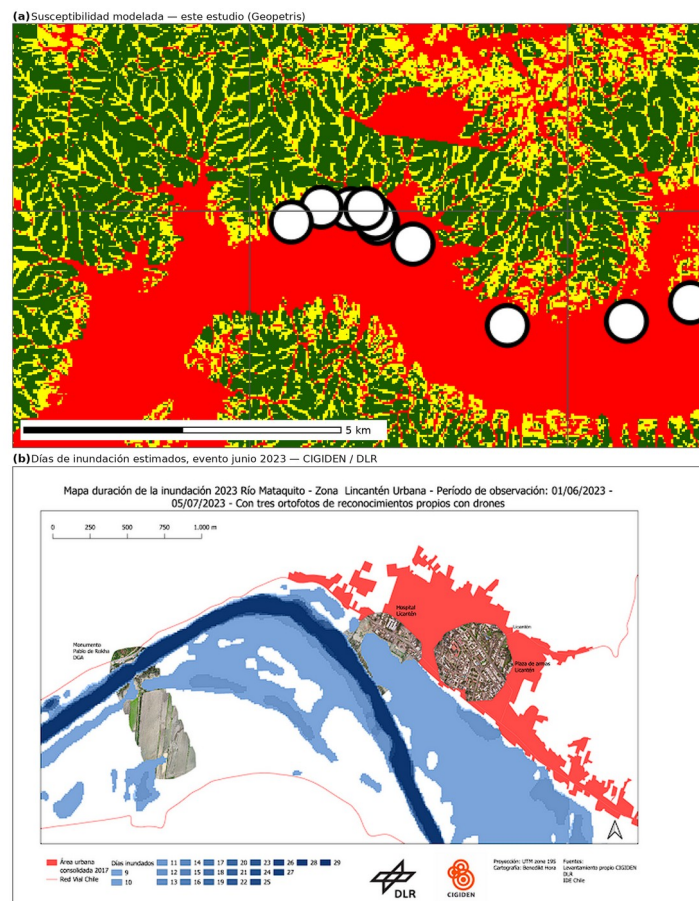


Figura 2. Contraste entre (a) la zonificación de susceptibilidad elaborada en este estudio, en el entorno de Licantén, y (b) la estimación de días de inundación del evento de junio de 2023 para el mismo sector. El panel (b) corresponde al casco urbano de Licantén y su tramo fluvial inmediato, situado en la porción central de (a), reconocible por la agrupación de puntos del catastro de afectación (círculos blancos). Las escalas y extensiones de ambos paneles son distintas y su encuadre no ha sido georreferenciado, por lo que la comparación es de posición y no de superficie. Fuente de (b): CIGIDEN (2023), Figura 11; estimación del Centro Aeroespacial Alemán (DLR) sobre imágenes Sentinel, con ortofotografía propia de CIGIDEN. Reproducida con fines de contraste; no constituye elaboración propia.

La comparación es cualitativa y de posición, no de superficie, dado que ambos productos difieren en extensión, escala y naturaleza de la variable representada, y que el encuadre relativo no ha sido georreferenciado. Dentro de esas condiciones, la concordancia es consistente: la mancha de inundación detectada por el sensor se desarrolla íntegramente sobre el fondo de valle que el modelo clasifica como de susceptibilidad alta, sigue el mismo eje de escurrimiento y presenta el mismo ensanchamiento en el meandro de Licantén. Los sectores de mayor duración de anegamiento se sitúan en las posiciones topográficamente más deprimidas respecto del cauce, que son también las de menor valor del descriptor dominante del modelo.

La comparación permite, además, ilustrar de manera directa la distinción desarrollada en la sección 3.2: la superficie efectivamente cubierta por el agua durante el evento constituye un subconjunto acotado del dominio que el modelo identifica como predispuesto, y no su equivalente. Esa diferencia se cuantifica a continuación. Se deja constancia de que una superposición georreferenciada de ambos productos permitiría calcular la proporción de la superficie inundada detectada que recae en cada clase de susceptibilidad, convirtiendo esta concordancia visual en una métrica cuantitativa; su ejecución se recomienda en la sección 9.

7.4. Contraste dimensional con los antecedentes publicados

Con el objeto de verificar la coherencia del resultado más allá de la métrica de razón de frecuencia, se contrastaron las dimensiones del producto con las consignadas por la fuente del catastro para el mismo tramo.

La cota de inundación medida en Licantén durante el evento, de 10,3 m s. n. m., y el ancho de planicie de inundación reportado, de aproximadamente un kilómetro en ese sector y hasta 1,4 kilómetros en la confluencia con el estero Curepto, describen un fondo de valle de dimensiones acotadas. La franja de clase Alta del modelo reproduce la posición y la continuidad de ese fondo de valle, y su ensanchamiento aguas abajo es consistente con la apertura del valle descrita.

La correspondencia es, sin embargo, de posición y no de superficie. **La clase Alta totaliza 252,7 km²; una planicie de un kilómetro de ancho desarrollada a lo largo de la totalidad del tramo evaluado no superaría el orden de las decenas de kilómetros cuadrados.** La diferencia, de aproximadamente un orden de magnitud, se explica íntegramente por dos circunstancias del método: la clase Alta incorpora los fondos de valle de todas las quebradas tributarias del dominio, y no solo la planicie del curso principal; y el corte por cuantiles asigna por construcción un tercio del territorio a esta clase, con independencia de la distribución del índice. Esta discrepancia se analiza en la sección 8.5 y constituye la limitación de mayor peso del presente producto.

7.5. Declaración sobre el alcance de la validación

Los valores de la Tabla 4 corresponden a un contraste independiente, en el sentido de que el catastro empleado no intervino en la construcción del modelo. Esta condición diferencia al presente informe del GP-2026-03 de esta serie, cuya métrica fue declarada como ajuste interno. No obstante, el alcance del resultado está acotado por cuatro circunstancias que se declaran de manera expresa:

- **Poder discriminante del diseño.** Esta es la limitación de mayor peso del contraste, y determina la lectura de todas las cifras de la Tabla 4. Los sectores registrados en el catastro se emplazan, sin excepción, sobre el fondo de valle del Mataquito, que es precisamente el dominio que el descriptor dominante del modelo identifica. La prueba evalúa, por tanto, si los puntos del fondo de valle caen en la clase que representa el fondo de valle, y en esas condiciones no admitía un resultado sustancialmente distinto: cualquier zonificación que delimitara correctamente la planicie habría capturado los catorce puntos y obtenido una razón de frecuencia comparable. El valor de 3,00 acredita que el modelo delimita el fondo de valle de manera consistente con la ubicación de la afectación observada, y no que discrimine niveles de susceptibilidad dentro de él. Esta condición diferencia el presente contraste del efectuado en el informe GP-2026-01, donde los eventos del catastro se distribuían sobre laderas de comportamiento heterogéneo y la prueba admitía resultados negativos.
- **Tamaño de la muestra.** La razón de frecuencia se calcula sobre 14 puntos. Con esa base, el resultado es consistente pero estadísticamente frágil: no admite intervalos de confianza estrechos y es sensible a la incorporación o exclusión de registros individuales. Las razones de frecuencia nulas de las clases Media y Baja no pueden estimarse de manera robusta con este número de observaciones.
- **Agrupamiento espacial.** Los puntos se concentran en el entorno de Licantén y no constituyen un muestreo espacialmente independiente del área evaluada. El desempeño verificado corresponde a ese sector y no puede extrapolarse sin más al conjunto del tramo.
- **Naturaleza del registro.** El catastro consigna infraestructura dañada y no extensión inundada. Los puntos se sitúan, por definición, donde existen bienes expuestos, de modo que el registro informa sobre dónde hubo daño y no sobre dónde hubo agua. La razón de frecuencia nula de las clases Media y Baja acredita ausencia de infraestructura dañada catastrada en ellas, y no ausencia de inundación.

En consecuencia, el producto se declara como una zonificación relativa cuyo contraste independiente resultó favorable, sobre una base empírica reducida y bajo un diseño de prueba de poder discriminante limitado. La verificación efectuada acredita que el modelo delimita el fondo de valle de manera consistente con la afectación documentada; no acredita capacidad predictiva, no discrimina niveles de susceptibilidad dentro de la planicie, y no constituye una delimitación de superficie inundable.

8. Discusión y limitaciones

8.1. Resolución del dato y escala de uso válida

El modelo se construyó sobre una malla de 30 m derivada del DEM Copernicus GLO-30. Aplicando el criterio convencional según el cual el tamaño de celda no debiera representar menos de 0,5 mm en el documento impreso, la escala de uso máxima recomendada es del orden de 1:50.000. La lámina de la Figura 1 se presenta a una escala aproximada de 1:200.000, considerablemente más conservadora que ese límite y por tanto compatible con él; la Figura 2 (a) corresponde a un acercamiento del mismo producto, incorporado con fines de contraste visual y no como cartografía de uso. El producto no es apropiado para análisis a escala predial ni para decisiones sobre lotes individuales o inmuebles determinados.

En consecuencia, elementos determinantes a escala de sitio —defensas fluviales, terraplenes, canales, alcantarillas, puentes, obras de arte y accesos prediales— no están representados en el modelo. Sectores efectivamente protegidos por obras pueden aparecer clasificados como de susceptibilidad alta, y sectores desprotegidos pueden no serlo.

8.2. Naturaleza del catastro de contraste

Además de las limitaciones de tamaño y agrupamiento declaradas en la sección 7.5, el catastro empleado presenta un sesgo estructural que debe explicitarse. La afectación se registra donde existe infraestructura, y la infraestructura se emplaza, en este tramo, precisamente sobre el fondo de valle. Existe por tanto una correlación entre la ubicación de los elementos expuestos y el dominio que el modelo clasifica como de susceptibilidad alta, correlación que no invalida el contraste pero sí acota su interpretación: el resultado acredita que el modelo captura el dominio donde se produjo el daño, no que discrimine correctamente dentro de la planicie.

Una validación de mayor alcance requeriría contrastar contra una delimitación de la superficie efectivamente inundada, y no contra puntos de daño. La sección 9 identifica esta vía como la mejora estructural prioritaria.

8.3. Sensibilidad al umbral de definición de la red de drenaje

Conforme se declaró en la sección 5.4, el umbral de 5.000 celdas condiciona el cálculo de los dos factores que concentran dos tercios del peso del modelo. Un umbral distinto produciría una red de drenaje distinta y, con ella, una zonificación distinta. No se ejecutó un análisis de sensibilidad de este parámetro, ni el análisis de sensibilidad de la ponderación en el rango de $\pm 0,05$ que constituye práctica habitual en esta serie. Ambas ausencias se declaran expresamente y su ejecución se recomienda en la sección 9.

8.4. Factores y procesos no incorporados

El modelo se construye con cuatro variables condicionantes de carácter morfométrico y estático. No incorpora:

- **Hidrodinámica del flujo.** No se resuelven alturas de agua, velocidades, tiempos de propagación ni caudales. El producto no asocia sus clases a período de retorno alguno.
- **Geometría del cauce.** El modelo de elevación representa la superficie del terreno y de la lámina de agua en el momento de la captura, no el fondo del cauce. La capacidad de porteo del canal está, por tanto, incompletamente representada.
- **Obras de defensa e infraestructura hidráulica.** Defensas, terraplenes y obras de encauzamiento no están representados, conforme se indicó en la sección 8.1.
- **Propiedades del sustrato y cobertura.** Permeabilidad, capacidad de infiltración, uso del suelo y rugosidad superficial no participan del modelo.
- **Procesos concurrentes.** Aporte de sedimento, socavación, migración lateral del cauce, obstrucción de secciones por material flotante y anegamiento por drenaje deficiente no están representados, pese a haber concurrido en el evento de referencia.

8.5. Extensión de la clase Alta y superficie inundable

Esta sección desarrolla la limitación de mayor peso del presente producto, anticipada en las secciones 1, 6.2 y 7.4.

La clase Alta ocupa 252,7 km², equivalentes al 33,4 % del dominio evaluado. Los antecedentes publicados para el mismo tramo describen, en cambio, una planicie de inundación de aproximadamente un kilómetro de ancho en el sector de Licantén y hasta 1,4 kilómetros en su parte más ancha, de la cual el evento de junio de 2023 —con período de retorno superior a 50 años— ocupó un 23 % según estimación satelital, cifra que la fuente califica como subestimada. La superficie efectivamente inundada durante un evento excepcional resulta, por tanto, inferior en aproximadamente un orden de magnitud a la extensión de la clase Alta.

La discrepancia no constituye un error del modelo, sino una consecuencia directa de su naturaleza y de su método de clasificación, y concurren a ella dos causas independientes. La primera es que la clase Alta incorpora los fondos de valle de la totalidad de la red de drenaje del dominio, y no únicamente la planicie del curso principal: el patrón dendrítico descrito en la sección 6.2 corresponde a quebradas tributarias que reúnen condiciones morfométricas comparables, con independencia de que su régimen de caudales sea de orden muy inferior. La segunda es que el corte por cuantiles asigna por construcción aproximadamente un tercio del territorio a la clase de mayor susceptibilidad, con independencia de la forma de la distribución del índice.

De ello se siguen dos consecuencias que condicionan todo uso del producto. La proporción de superficie de cada clase es un atributo del método de clasificación y no una medida del fenómeno; y la clase Alta identifica el dominio morfométricamente

predispuesto, no la superficie susceptible de ser cubierta por el agua en un evento determinado. Cualquier lectura de la cartografía como estimación de área inundable es incorrecta y excede el alcance declarado de este estudio.

8.6. Naturaleza relativa de las clases y representación cartográfica

La clasificación por cuantiles produce clases relativas al área evaluada. La clase Alta de este mapa no es comparable en términos absolutos con la clase Alta de otro polígono modelado por separado, incluidos los productos de esta misma serie. La comparación entre áreas exige unificar el dominio de cálculo o adoptar umbrales absolutos calibrados.

En cuanto a la representación, la lámina de la Figura 1 presenta el resultado de la clasificación sin filtros de mayoría ni generalización posterior. El moteado observable entre las clases Baja y Media en sectores de ladera corresponde a variabilidad del índice en el entorno de los umbrales de corte, y no a estructuras geomorfológicas diferenciadas. Se optó por presentar el resultado sin suavizar por coherencia con el criterio de la serie. Asimismo, a la escala de representación adoptada varios de los 14 puntos de contraste se solapan gráficamente en el sector de Licantén, de modo que el número de símbolos distinguibles en la lámina es inferior al número de puntos empleados en la Tabla 4.

9. Aplicaciones y desarrollo futuro

En su estado actual el producto es apropiado como capa de diagnóstico preliminar para la identificación relativa de sectores predispuestos dentro del polígono evaluado, como antecedente de medio físico en la caracterización de áreas de influencia, y como insumo de tamizaje para acotar el alcance de estudios de mayor detalle. Específicamente, se integra en:

- **Cartografía de peligro para estudios de riesgo de instrumentos de planificación territorial**, como insumo a escala comunal que el profesional competente integra y suscribe en el estudio fundado del artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Geopetris produce la zonificación; no suscribe el estudio de riesgo.
- **Componente de medio físico en línea de base ambiental**, como antecedente de geomorfología y áreas de riesgo para la descripción del área de influencia en el marco del artículo 12 letra f del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, entregado a la consultora responsable del expediente.
- **Definición de áreas de estudio de detalle**, acotando los sectores donde conviene concentrar levantamientos topográficos, batimetría y modelación hidráulica.

No es apropiado, en cambio, para fundar por sí solo decisiones sobre emplazamientos determinados, para estimar superficies inundables, ni para sustituir los instrumentos y competencias que la normativa radica en la Dirección General de Aguas y en los organismos con competencia en gestión de recursos hídricos y respuesta ante emergencias.

Las líneas de desarrollo identificadas, en orden de prioridad, son las siguientes.

- Contrastar el modelo contra una delimitación de la superficie efectivamente inundada durante el evento de 2023, derivada de imágenes de radar de apertura sintética, en lugar de contra puntos de daño. Es la mejora estructural prioritaria, pues permitiría calcular la razón de frecuencia sobre superficie observada y no sobre elementos expuestos, resolviendo el sesgo descrito en la sección 8.2.
- Georreferenciar la estimación de días de inundación de la Figura 2 (b) y calcular la proporción de la superficie inundada detectada que recae en cada clase de susceptibilidad. Este procedimiento entregaría una razón de frecuencia calculada sobre superficie observada y no sobre puntos de daño, resolviendo el sesgo descrito en la sección 8.2, y constituye la vía más directa para elevar el nivel de validación del producto.
- Ejecutar el análisis de sensibilidad del umbral de definición de la red de drenaje, evaluando el efecto de su variación sobre la zonificación resultante.
- Incorporar a la documentación la matriz de comparación pareada con su verificación de consistencia, y la tabla de umbrales de reclasificación de cada factor con la proporción de superficie asociada, completando la reproducibilidad del procedimiento conforme al estándar de la serie.
- Ejecutar el análisis de sensibilidad de la ponderación en el rango de $\pm 0,05$, conforme a la práctica de esta serie.
- Evaluar esquemas de clasificación alternativos al cuantil —rupturas naturales o umbrales absolutos anclados a cotas de inundación observadas— que permitan que la extensión de la clase Alta guarde relación con la superficie inundable y no con la partición del dominio.

- Incorporar un modelo de elevación de mayor resolución y batimetría de cauce, condición necesaria para transitar desde una zonificación de susceptibilidad hacia una evaluación de peligro en sentido estricto.

10. Alcance del estudio y limitación de responsabilidad

Este informe corresponde a una evaluación técnica preliminar de susceptibilidad a inundación fluvial, elaborada mediante análisis geoespacial de escritorio, sobre la base de la información pública individualizada en la Tabla 1, sin levantamiento de terreno, sin batimetría y sin modelación hidráulica. Identifica propensión relativa del terreno a la ocupación por inundación fluvial, a la escala de uso declarada en la sección 8.1.

El modelo fue contrastado contra el catastro de afectación descrito en la sección 5.6, con las limitaciones de tamaño, agrupamiento y naturaleza del registro declaradas en la sección 7.5. La extensión de la clase de susceptibilidad alta no constituye una estimación de superficie inundable, conforme se declara expresamente en la sección 8.5.

No constituye un estudio de riesgo en los términos del artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, ni un estudio de amenaza, ni un estudio hidrológico o hidráulico, ni una determinación de áreas de restricción o de protección, ni una declaración sobre la seguridad de predios, edificaciones o instalaciones específicas. No sustituye ni reemplaza los instrumentos, competencias y procedimientos que corresponden a la Dirección General de Aguas, a la Dirección de Obras Hidráulicas y al Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, materias que requieren estudios de detalle suscritos por los profesionales competentes que la normativa establece.

Las decisiones que se adopten a partir de este documento deben considerar estas limitaciones de alcance.

11. Referencias

- CIGIDEN. 2023. Informe post-desastre: inundaciones del 21 al 26 de junio de 2023, cuencas del río Mataquito y río Maule, Región del Maule. Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres. Disponible en: <https://www.cigiden.cl/informe-post-desastres-cigiden-inundaciones-21-26-junio-2023-cuencas-del-rio-mataquito-y-rio-maule-region-del-maule/> [consulta: agosto de 2026].
- European Space Agency. Copernicus Global Digital Elevation Model GLO-30.
- Glade, T.; Anderson, M.; Crozier, M.J. 2005. Landslide hazard and risk. John Wiley & Sons Ltd.: 793 p. Chichester.
- Lee, S.; Pradhan, B. 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides* 4 (1): 33-41.
- Nobre, A.D.; Cuartas, L.A.; Hodnett, M.; Rennó, C.D.; Rodrigues, G.; Silveira, A.; Waterloo, M.; Saleska, S. 2011. Height Above the Nearest Drainage — a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology* 404 (1-2): 13-29.
- OpenStreetMap contributors. Datos cartográficos de referencia. © OpenStreetMap contributors, disponibles bajo Open Database License (ODbL).
- Rennó, C.D.; Nobre, A.D.; Cuartas, L.A.; Soares, J.V.; Hodnett, M.G.; Tomasella, J.; Waterloo, M.J. 2008. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment* 112 (9): 3469-3481.
- Saaty, T.L. 1980. The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill: 287 p. New York.