

SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y DE EMERGENCIAS ce6rcr.cl

ESPECIFICACIÓN TÉCNICA: INTEGRACIÓN DE VARIABLES Y UMBRALES DE ALERTA

Predictor de Aluviones, Desbordes e Inundaciones - ce6rcr.cl

Autor: Dirección de Ingeniería y Desarrollo ce6rcr.cl

Colaboración: CENEPRED, SENAPRED y Estudios Científicos Locales (López-Filun, 2015)

Área Geográfica de Calibración: Región de Los Ríos, Chile

Fecha de Emisión: 28 de Agosto, 2026

Clasificación: Documento Técnico de Especificación y Calibración para Operadores de Emergencias

Código de Control: DS-HIDROMET-V1-2026

INTRODUCCIÓN Y MARCO DE REFERENCIA

La Región de Los Ríos posee características geomorfológicas y climáticas particulares que la exponen a riesgos latentes de **aluviones (remoción en masa) e inundaciones por desbordes de ríos**. El régimen de precipitaciones pluviales de la zona, combinado con pendientes escarpadas en la Cordillera de la Costa y de los Andes, y el impacto antropogénico o de incendios forestales, requiere un monitoreo técnico predictivo robusto. La presente **Especificación Técnica** tiene como propósito traducir la evidencia científica empírica local y los manuales metodológicos institucionales en un modelo numérico y algorítmico integrado directamente en el **Mapa Táctico Satelital** desarrollado por **ce6rcr.cl**, en su sección específica de controles tácticos de la capa **2. HIDROMET**.

Para garantizar la precisión operativa del visualizador de emergencias en tiempo real, se define una estructura dividida en **Factores Condicionantes Estáticos** (la susceptibilidad inherente del territorio) y **Factores Desencadenantes Dinámicos** (los detonantes meteorológicos e hidrométricos). Este enfoque permite a la herramienta calcular de forma automatizada un índice de peligrosidad y clasificar visualmente el nivel de riesgo en la cuenca, facilitando la toma de decisiones por radiooperadores, organismos técnicos de protección civil y la comunidad.

Objetivos del Predictor en ce6rcr.cl:

- **Aislamiento Táctico:** Integrar el filtro predictivo aluvial en la sección **2. HIDROMET** de manera modular, sin alterar el código ni el funcionamiento de los demás filtros tácticos del mapa.
- **Soporte de Decisiones:** Generar un sistema automatizado de alertas de evacuación basado en umbrales científicos locales calibrados.
- **Estandarización SIG:** Servir las capas de riesgo en formato GeoJSON interactivo procesado por el script de backend, optimizando el rendimiento mediante consultas asíncronas.

Lección Aprendida - Villa Santa Lucía (2017): El predictor toma como base de calibración histórica extrema el aluvión ocurrido en Villa Santa Lucía, donde lluvias intensas (122 mm en 24 horas) actuaron sobre laderas con isoterma cero grados alta, generando una fusión nival acelerada y desprendimiento masivo de lodo y detritos (7,2 millones de m³) que se desplazaron a 72 km/h. Este desastre evidencia que el modelamiento debe contemplar factores reológicos y térmicos conjuntos.

1. ARQUITECTURA DE CAPAS ESTÁTICAS (SUSCEPTIBILIDAD)

Los factores condicionantes representan las características físicas estables y geomorfológicas del territorio que definen su nivel de susceptibilidad intrínseca a la desestabilización y generación de aluviones o desbordes.

A. Modelado de Pendientes (MDT/DEM):

Las pendientes elevadas actúan directamente sobre la estabilidad de los depósitos inconsolidados de laderas. Basándose en los estándares de modelamiento de flujos de detritos (como FLO-2D), la susceptibilidad activa a remoción en masa en el centro-sur de Chile se manifiesta en pendientes de entre 6° y 48°. La criticidad máxima se concentra en pendientes superiores a 20° o 22°. El script clasifica y pondera esta variable espacial utilizando un Modelo Digital de Elevación (DEM) de alta resolución, asignando pesos según la matriz de CENEPRED.

Descriptor	Rango de Pendiente (Grados)	Peso Ponderado CENEPRED
PN1_30_a_40_grados	30° a 40° (Altamente Crítico)	0.503
PN2_25_a_45_grados	25° a 45° (Riesgo Alto)	0.260
PN3_20_a_30_grados	20° a 30° (Riesgo Moderado-Alto)	0.134
PN4_10_a_20_grados	10° a 20° (Riesgo Moderado)	0.068
PN5_menor_a_5_grados	Menor a 5° (Riesgo Bajo / Llanura)	0.035

B. Capa de Textura del Suelo:

La estructura geológica superficial determina la permeabilidad y capacidad de retención de agua. Los suelos finos y con texturas limo-arcillosas y arcillosas son propensos a saturarse con rapidez. Al infiltrarse agua a través de grietas y poros, se reduce la succión del suelo y aumenta bruscamente la presión de poros, desestabilizando la vertiente y actuando como lubricante para flujos de lodo viscosos.

Descriptor	Textura del Suelo (USDA)	Peso Ponderado CENEPRED
TX1_Finas_arcillosos	Arcillosa, Limo-arcillosa, Arcillo-arenosa	0.503
TX2_Moderadamente_Finas	Franco-arcillosa, Franco-limo-arcillosa	0.260
TX3_Mediana_francos	Franco, Franco-limoso, Limoso	0.134
TX4_Moderadamente_Gruesa	Franco-arenoso, Arenoso-franco	0.068
TX5_Gruesa_arenosos	Arenosa fina, Arenosa gruesa	0.035

C. Capa de Hidrofobicidad (Suelos Quemados):

En la Región de Los Ríos, la interfaz urbano-forestal presenta amplias plantaciones de monocultivo de pino y eucalipto sobre suelos Alfisoles ricos en aluminio y hierro. Tras la ocurrencia de incendios forestales severos (con temperaturas de suelo > 300°C), la materia orgánica derretida se condensa en los poros de los horizontes subsuperficiales, formando una capa hidrofóbica de cera (capa waxy) impermeable. Esto impide por completo la infiltración. Al ocurrir precipitaciones intensas, las laderas se transforman en "autopistas" o toboganes de lodo, multiplicando el coeficiente de escorrentía superficial hasta un factor C = 1.6 y acelerando drásticamente el transporte de sedimentos.

2. MONITOREO DINÁMICO Y UMBRALES DE ALERTA (TRIGGERS)

Las variables dinámicas representan los disparadores hidrometeorológicos instantáneos que activan físicamente la peligrosidad del territorio.

A. Telemetría Pluviométrica y Umbrales Científicos (López-Filun, 2015):

Para calibrar el motor de cálculo del script en Los Ríos, se configuran dos triggers basados en datos pluviométricos de estaciones meteorológicas:

- **Umbral de Corta Duración (Gatillo Inmediato):** Precipitaciones intensas concentradas en menos de **4 horas** que acumulen **~26.5 mm** de agua líquida. Este es el límite empírico en el que las laderas de la costa centro-sur sufren deslizamientos superficiales directos e inmediatos. Gatilla Alerta Amarilla o Naranja.
- **Umbral de Larga Duración (Saturación Antecedente):** Precipitaciones que acumulen más de **80 mm en 24 horas** (saturando los poros al 100%) o tormentas severas con proyecciones estimadas de **85.1 mm en 24 horas** (que según registros regionales tiene un periodo de retorno de 4 años y un 75% de probabilidad de ocurrencia). Gatilla Alerta Roja (Evacuación).

B. Telemetría de Isoterma Cero Grados y Fusión Nival:

Durante sistemas frontales en la precordillera o cordillera, es vital monitorear la cota de la isoterma cero grados. Si se registra una **isoterma cero más alta de lo normal** combinada con lluvia líquida sostenida sobre áreas con acumulación nival previa, se produce una fusión acelerada del manto de nieve. El script activa una regla lógica que ****multiplica por 1.5 el caudal hidráulico estimado (Q)**** para simular el ingreso de este caudal masivo a los ríos y quebradas de la cuenca.

C. Clasificación Reológica y Densidad del Flujo (FLO-2D):

Un aluvión difiere de una inundación limpia por su viscosidad dinámica, provocada por el arrastre de sólidos (bloques, rocas, madera y sedimentos). El script asocia la tipología esperada según el volumen de sedimentos (Cv) para calibrar el desborde:

Tipo de Flujo	Sedimento en Vol (Cv %)	Comportamiento Dinámico y Viscosidad
Flujo Acuoso (Streamflow)	Menor al 20.0%	Newtoniano. Viscosidad limpia, escurrimiento hidráulico lineal.
Flujo Hiperconcentrado	20.0% a 60.0%	No Newtoniano, no cohesivo, turbulento. Viscosidad elevada (1.5 a 4 órdenes).
Flujo de Detritos (Aluvión)	Mayor al 60.0%	No Newtoniano, viscoso, flujo laminar denso con alto arrastre de rocas y troncos.

3. MODELADO DE DESBORDES, ZONIFICACIÓN Y PROTOCOLO

El modelamiento de desborde e inundación espacial de terrenos ribereños requiere integrar parámetros hidráulicos de flujo (HEC-RAS / FLO-2D) así como la categorización unificada de peligro normada por el CENEPRED.

A. Calibración de la Rugosidad de Manning (n):

Para simular desbordes realistas con arrastre de lodo, rocas y escombros forestales, no se debe utilizar el coeficiente de rugosidad de Manning convencional de un escurrimiento fluvial limpio ($n = 0.035$). En zonas críticas con desborde aluvial activo, se debe aplicar un coeficiente calibrado de $n = 0.060$ a $n = 0.085$ en los lechos y llanuras. Esto incrementa la fricción en el modelo numérico, reproduciendo el ensanchamiento abrupto de la inundación, la pérdida de velocidad de arrastre y tirantes máximos de agua (Depth) severos que superan las obras de defensa fluvial.

B. Zonificación del Peligro y Alertas del Mapa Táctico:

El script calcula un índice de peligrosidad ponderado 'R' cruzando las capas fijas y dinámicas. La API expone este resultado espacializado mediante polígonos coloreados en formato GeoJSON para alimentar directamente el visualizador táctico satelital:

Nivel de Peligro	Valor R (CENEPRED)	Color en Mapa	Protocolo de Emergencia ce6rcr.cl
Peligro Muy Alto	$R \geq 0.260$	#FF0000 (Rojo)	ALERTA ROJA: Evacuación inmediata de la zona de exclusión.
Peligro Alto	$0.134 \leq R < 0.260$	#FF9900 (Naranja)	ALERTA NARANJA: Preparación y despliegue preventivo de equipos.
Peligro Medio	$0.068 \leq R < 0.134$	#FFFF00 (Amarillo)	ALERTA AMARILLA: Monitoreo telemétrico y de radio constante.
Peligro Bajo	$0.035 \leq R < 0.068$	#00FF00 (Verde)	ALERTA VERDE: Estado de normalidad y vigilancia pasiva.

INTEGRACIÓN MODULAR SIN ALTERACIÓN DE FILTROS:

El interruptor dinámico para activar esta capa de peligro se añade bajo el panel de control **2. HIDROMET** de emergencias.php. Su activación gatilla una petición asíncrona hacia el JSON expuesto en el servidor, consumiendo directamente la capa GeoJSON vectorizada, asegurando un aislamiento total de las funciones de red y sin interferir ni modificar el comportamiento estático de los demás filtros del visor táctico.