

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y DE FRECUENCIA DE
ALUVIONES QUE AFECTAN A LA RED VIAL EN CHILE**

KARINA REYES S.¹
JOSE VARGAS B.²
TOMAS ECHAVEGUREN N.³

RESUMEN

Los aluviones son una amenaza que dependiendo de su interacción a una zona habitada tiene un alto potencial destructivo, lo cual es causante de pérdidas humanas, alteración en el sistema económico y de actividades. En Chile los aluviones detonados por la precipitación suelen iniciarse en zonas de alta pendiente, principalmente en la Precordillera y Cordillera, su distribución espacial muestra en el norte del país la mayor cantidad de eventos registrados. La morfología en esta zona restringe el trazado de la red vial, la cual se encuentra emplazada paralela al cauce en la mayor longitud de los caminos afectados. La distribución de frecuencias muestra en el sur del país a los aluviones que poseen la precipitación detonante de mayor periodo de retorno. Los eventos registrados en esta zona se caracterizan por ser de trayectoria de drenaje reducida, los cuales históricamente se depositaron en la primera localidad afectada. Respecto al fenómeno climático ENOS, se identifica una mayor incidencia de aluviones en episodios El Niño, los cuales registran precipitaciones de mayor periodo de retorno. En cambio, en episodios neutros y La Niña, se observa la ocurrencia de eventos en sectores que históricamente registraron aluviones, los cuales se caracterizan por una extensión de daño a la red vial de menor importancia regional y nacional; son de bajo periodo de retorno, lo cual indica una mayor influencia de los factores condicionante a observar en las potenciales zonas de recurrencia.

¹Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción– kreyes@udec.cl

²Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción– jvargas@udec.cl

³Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción– techaveg@udec.cl

1. ASPECTOS RELEVANTES DE LOS ALUVIONES

Clasificación de los Aluviones

Los movimientos en masa corresponden a todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991); se clasifican en caídas, volcamientos, deslizamiento, propagación lateral, complejos y flujos (Varnes, 1978).

Los flujos exhiben un comportamiento semejante al de los fluidos; se clasifican de acuerdo con el tipo y propiedades del material, la humedad, la velocidad, el confinamiento lateral y otras características que los hacen distinguibles en: flujo de detritos, crecida de detritos, flujo de lodo, flujo de tierra, flujo de turba, avalancha de detritos, avalancha de rocas, deslizamiento por flujo o deslizamiento por licuación (Hungry *et al.*, 2001).

En un mismo evento es posible presenciar tres tipos de flujos de remoción en masa; al inicio del movimiento se distinguen las avalanchas de detritos que al encontrar un canal preexistente son renombrados como flujos de detritos, estos a su vez se distinguen de crecida de detritos, o también conocidos como aluviones, por tener una concentración de sólidos mayor al 80 % (Costa, 1984).

Etapas de Movilización

A lo largo de la trayectoria del flujo se identifican tres etapas: inicio, transporte-erosión y depositación (VanDine, 1996). La primera etapa corresponde al inicio del movimiento del flujo de detritos, usualmente tiene pendientes del suelo cercana al ángulo de reposo. La segunda etapa, de transporte-erosión se observa en la Figura 1, la cual esquematiza al flujo como un pulso donde el frente posee los sedimentos de mayor tamaño y el cuerpo es más alargado hasta una cola que es más acuosa. La tercera etapa, corresponde a la depositación del flujo de detritos, generalmente ocurre en pendientes del suelo menores a 10° y ante la presencia de al menos uno de los siguientes factores: disminución de la pendiente del suelo, pérdida del confinamiento del flujo y/o presencia de impedimentos al flujo.

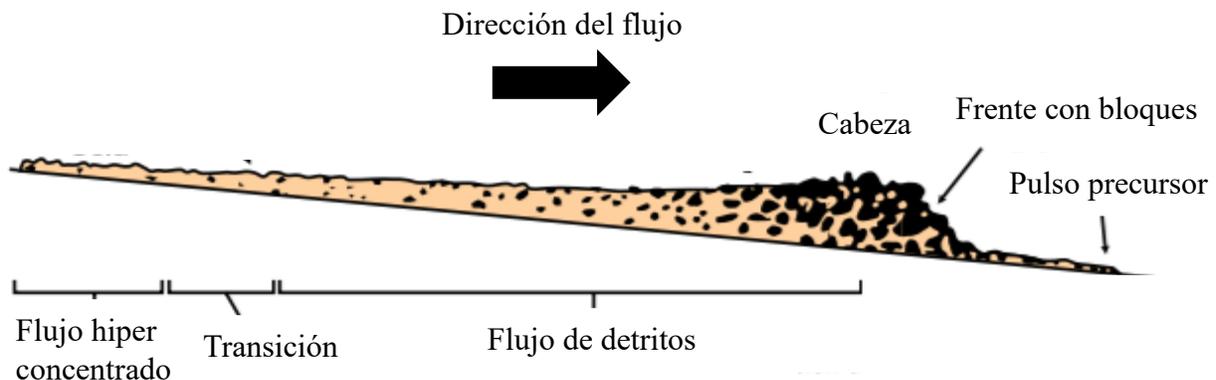


Figura 1. Esquema del flujo de detritos, según Pierson (1986).

La forma de la depositación de los detritos depende de las características de éstos, del abanico aluvional y de la presencia de impedimentos naturales (árboles y grandes rocas) o artificiales (puentes, caminos e infraestructuras).

Factores Influyentes en la Generación de los Aluviones

Lara (2007) clasificó los factores influyentes en la generación de flujos en condicionantes y detonante. Los factores condicionantes corresponden a aquéllos que generan una situación potencialmente inestable en la ladera. Los principales aspectos observados en el clima vegetación son la cobertura vegetal (estabilizador de laderas al interceptar la precipitación caída al disminuir la erosión del suelo y aumentar la resistencia del suelo); y en la actividad antrópica son la obstrucción del canal de drenaje y la desestabilización artificial de las laderas (como cortes artificiales en laderas, construcción de terraplenes, rellenos, excavaciones, extracción de áridos, acumulación de escombros, deforestación, entre otros).

Por otra parte, los factores detonantes son agentes externos que modifican la estabilidad preexistente del terreno, se caracterizan por generar un incremento de esfuerzos o la reducción de la resistencia del material de la ladera, produciendo una remoción en masa (Wieczorek, 1996) Estos factores destacan por la existencia de un corto lapso entre causa y efecto (Lara, 2007). Los factores detonantes más comunes son la precipitación, sismo e intervención antrópica, y los menos comunes son las erupciones volcánicas, ruptura de fuentes de almacenamiento de agua, fusión de nieve, erosión de canales, entre otros.

El principal factor detonante es la precipitación, la cual actúa incrementando el grado de saturación del suelo, produciendo un aumento temporal de la presión de los poros y una disminución de la resistencia efectiva, lo que conlleva una reducción de la estabilidad de la ladera, produciendo el aluvión. Las precipitaciones de alta intensidad en un corto periodo de tiempo ocasionan el aumento de la esorrentía superficial, aumentando la erosión del material en las laderas con suelo suelto.

2. MÉTODO DE ELABORACIÓN DEL MAPA DE PERIODO DE RETORNO

Se ilustra en la Figura 2 el procedimiento para elaborar el mapa de periodo de retorno de las precipitaciones que detonaron los aluviones que han afectado a la red vial en Chile desde el 1990 al 2018. Primero se confecciona la base de datos de aluviones, cuya información almacenada proporciona la georreferenciación del origen del aluvión, los factores condicionantes y detonantes, la red vial afectada y la estación pluviométrica representativa del evento. Posteriormente, se realiza el análisis de frecuencia para obtener los periodos de retorno de las precipitaciones que detonaron los aluviones. Finalmente, se elabora el mapa de periodo de retorno con el método de interpolación de la distancia inversa ponderada para esquematizar las zonas más similares de aquellos puntos que se encuentran más alejados, por sobre otros métodos ante el desconocimiento de la precipitación en el punto de interpolación.

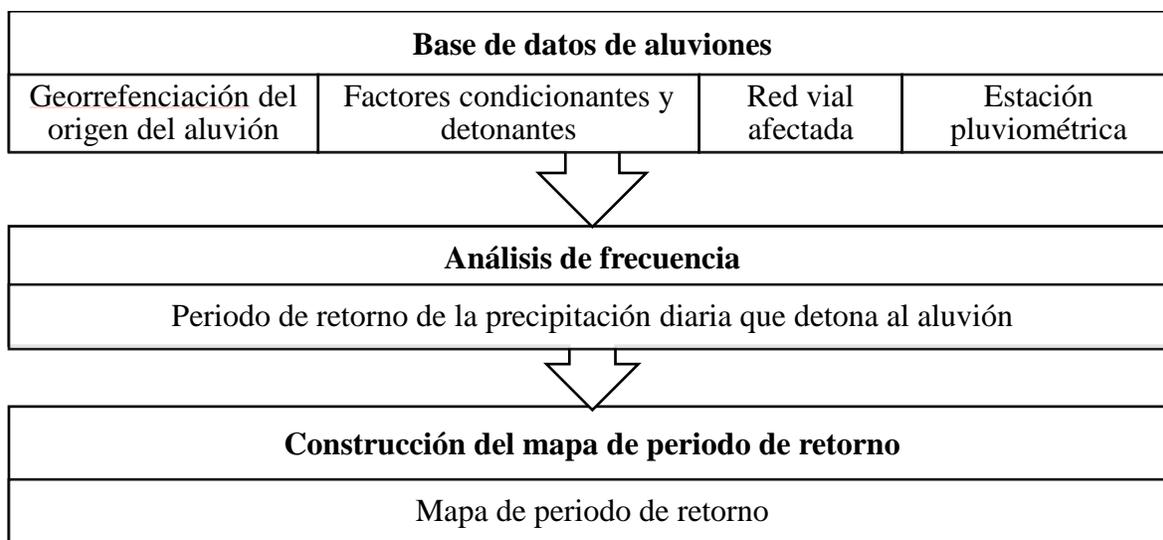


Figura 2. Diagrama del procedimiento de elaboración del mapa de periodo de retorno

Base de Datos de Aluviones

La base de datos de aluviones tiene información de diversas fuentes para visualizar la trayectoria más probable por la que descendió el evento e identificar los factores condicionantes y detonantes, el origen del flujo y la red vial afectada.

Las fuentes están conformadas por el Ministerio de Obras Públicas (MOP), Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI), artículos científicos, publicaciones realizadas en el ciberespacio por las agencias de noticias de alcance nacional, regional y comunal, municipalidades y un museo virtual.

Cada evento registrado contiene información sobre la fecha, factor detonante, factores condicionantes y zona del origen del evento; las vías y localidades afectadas y fuente informante. El factor detonante es: precipitación frontal, precipitación convectiva, invierno altiplánico, actividad sísmica o antrópica. El factor condicionante incluye observaciones como incendios y talas de árboles en la trayectoria del evento y sus alrededores, extracción de áridos y depósitos de basura en el canal de drenaje y/o isoterma 0 a mayor altura. La información de la georreferenciación del origen del evento almacena los códigos de la cuenca, subcuenca, sub-subcuenca, sistema fluvial y coordenada espacial. Respecto de la zona dañada, se almacena la región, comuna, sector, rol y kilometrajes afectados por el evento.

Clasificación de certeza en la georreferenciación del origen del aluvión

La variabilidad y calidad de la información entregada por las fuentes se clasifica en distintos niveles de certeza. La RAE (2001) define la certeza como “conocimiento seguro y claro de algo” (p.344). La Tabla 1 muestra la clasificación de la certeza de la georreferenciación del origen del aluvión, la cual depende de la cantidad de datos informados.

Tabla 1. Clasificación de la georreferenciación del origen del aluvión

Certeza	Descripción
Muy alta	Eventos en que se conoce el origen, la trayectoria y lugar de depositación.
Alta	Eventos en que se conoce el sistema fluvial donde se origina y la trayectoria más probable.
Mediana	Eventos en que es posible generar una estimación de la trayectoria con el conocimiento del kilometraje del rol afectado.
Baja	Eventos en que no es posible generar una estimación de la trayectoria pues no existe el conocimiento del kilometraje del rol afectado, solo está informado el sector afectado.

Selección de estaciones pluviométricas

Los eventos de los cuales se conoce el día/mes/año en que han ocurrido, y cuya causa es la precipitación o en su defecto no se encuentra informada; se le asigna una estación pluviométrica, la cual es utilizada posteriormente para el análisis del periodo de retorno de la precipitación detonante del aluvión.

Los criterios a considerar en la selección de la estación pluviométrica para cada evento corresponden a:

- El funcionamiento de la estación en la fecha del evento.
- Las características topográficas del origen del evento como altura, pendiente y orientación.
- La cercanía de la estación pluviométrica con el origen del evento.
- Registro de precipitaciones históricas con extensión suficiente para el análisis de frecuencia, pues en la zona norte existen estaciones que desde su funcionamiento registran menos de 20 tormentas.

3. MAPA DE PERIODO DE RETORNO

Mapa de Aluviones y Zonas Afectadas Relacionado con la Morfología del Terreno

La Figura 3 muestra la distribución espacial del origen de los aluviones, las estaciones pluviométricas utilizadas y la red vial afectada respecto a la cota del terreno (m.s.n.m.). La distribución espacial de los eventos muestra la mayor cantidad de aluviones situados en las zonas precordillerana y cordillerana. Estas zonas se caracterizan por presentar una baja densidad de estaciones pluviométricas, lo que implica una menor representatividad de la precipitación en la zona de interés, especialmente en el norte de Chile, el cual se caracteriza por precipitaciones de tipo convectivo que abarcan extensiones de terreno reducidas.

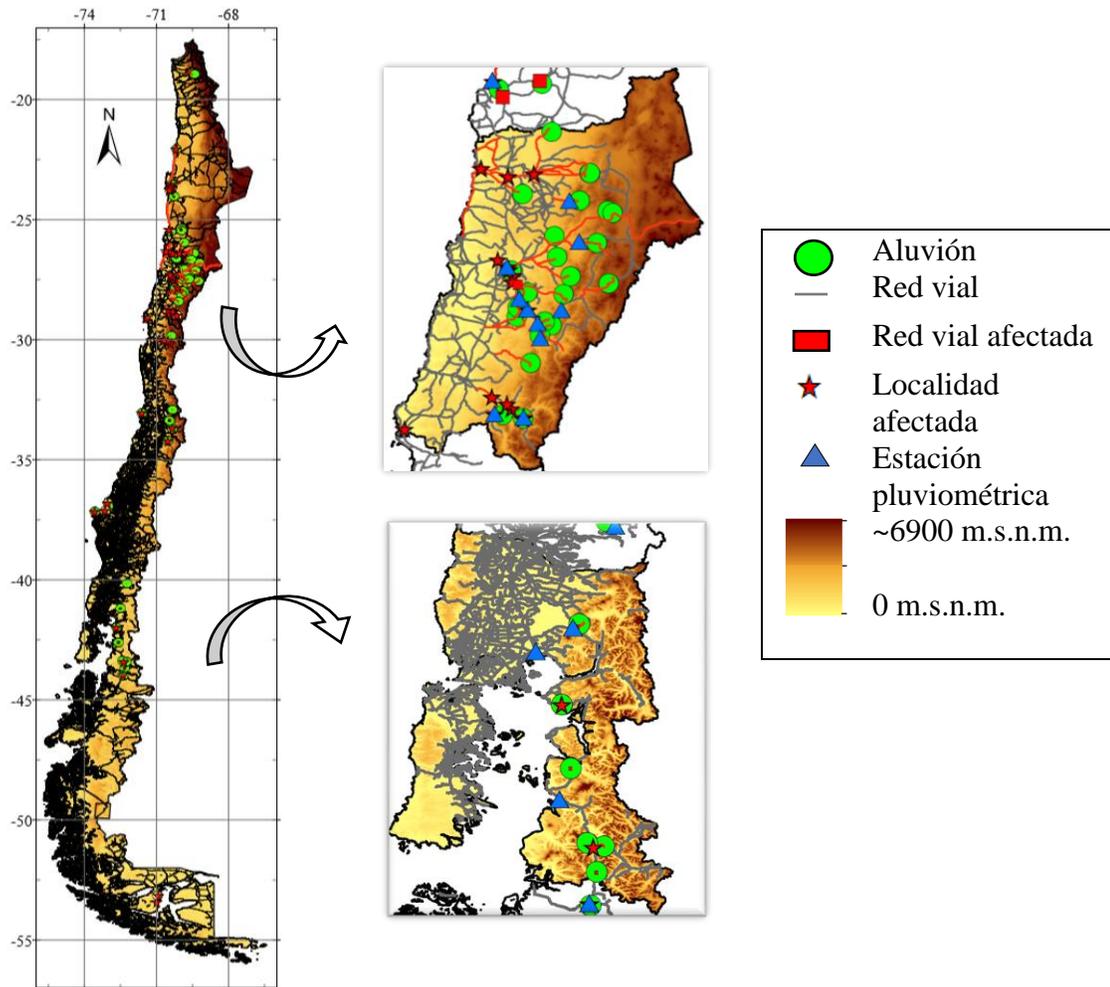


Figura 3. Mapa de aluviones en relaci3n a la cota del terreno (m.s.n.m.).

Mapa de Aluviones en Relaci3n a la Cobertura de Suelo.

La Figura 4 muestra la distribuci3n espacial del origen de los aluviones respecto a la cobertura de suelo. La mayor cantidad de eventos registrados se encuentran en la regi3n de Atacama (indicada en el recuadro), la cual se caracteriza por una depresi3n intermedia con presencia de cordones monta3osos transversales y una escasa cobertura vegetal, lo que favorece la existencia de m3ltiples eventos con largas trayectorias de flujo que atraviesen transversalmente a la zona. En esta regi3n, adem3s, la morfolog3a del territorio condiciona el trazado de la red vial, la cual se encuentra emplazada paralela al cauce en la mayor cantidad de los kilometrajes de los caminos afectados. En cambio, en la zona sur predomina una cobertura vegetal de bosques y nieves eternas y glaciares; cuya menor cantidad de eventos se caracterizan por tener trayectoria de drenaje localizada, lo que implica un da3o vial concentrado con una menor cantidad de localidades afectadas para un mismo aluvi3n.

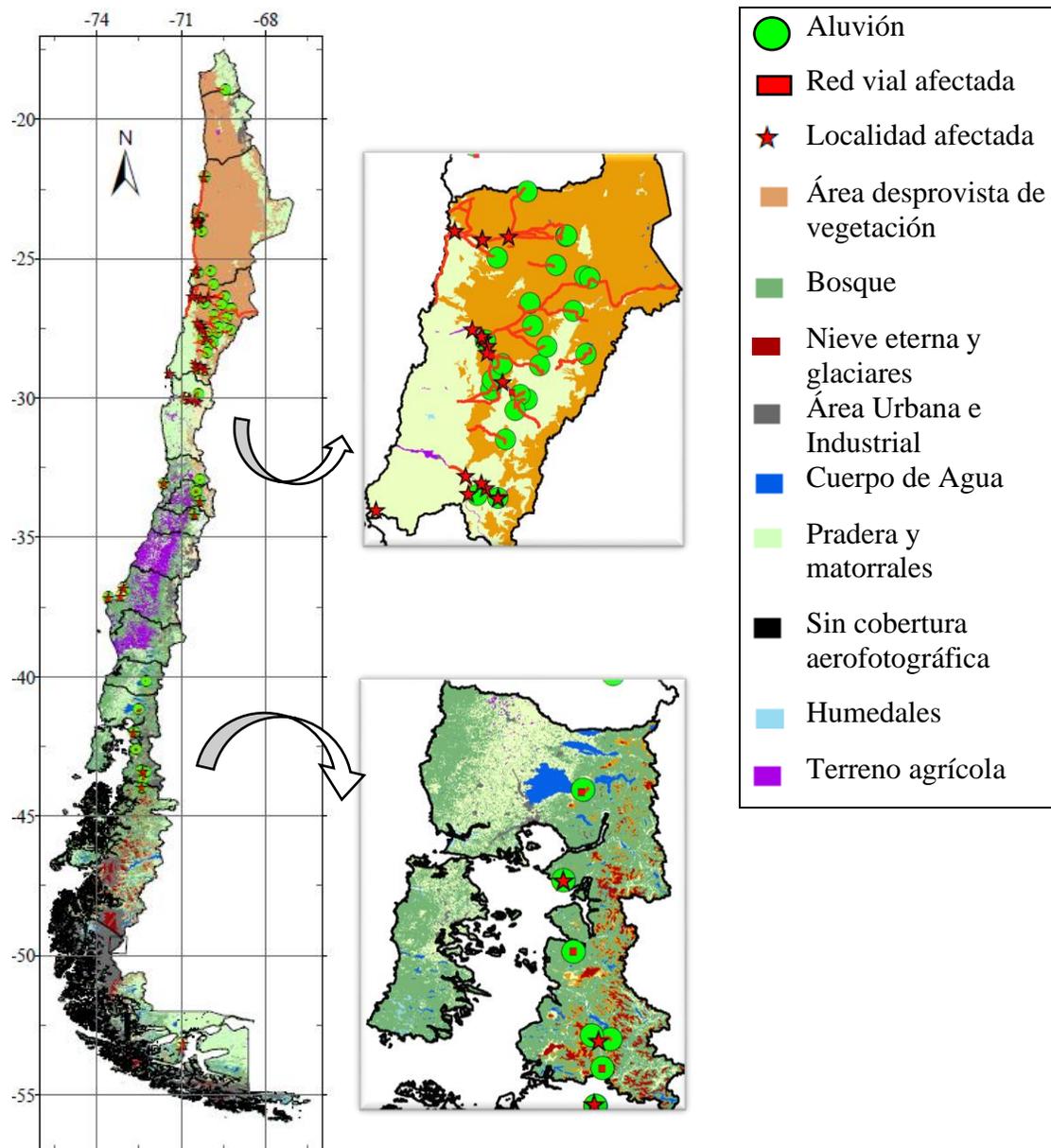


Figura 4. Mapa de aluviones en relación a la cobertura de suelo.

Mapa de periodo de retorno

La Figura 5 presenta el mapa de los periodos de retorno de las precipitaciones de los aluviones que afectaron a la red vial en el periodo de estudio. Los valores bajos indican una mayor influencia de los factores condicionante por sobre la precipitación, en especial en las zonas con abundante vegetación ubicadas en la depresión intermedia del país. Al contrario de lo que ocurren con los eventos georreferenciados en la Cordillera de los Andes, pues bajos periodos de retorno se asocian a la baja representatividad del régimen pluviométrico de la estación debido al efecto orográfico.

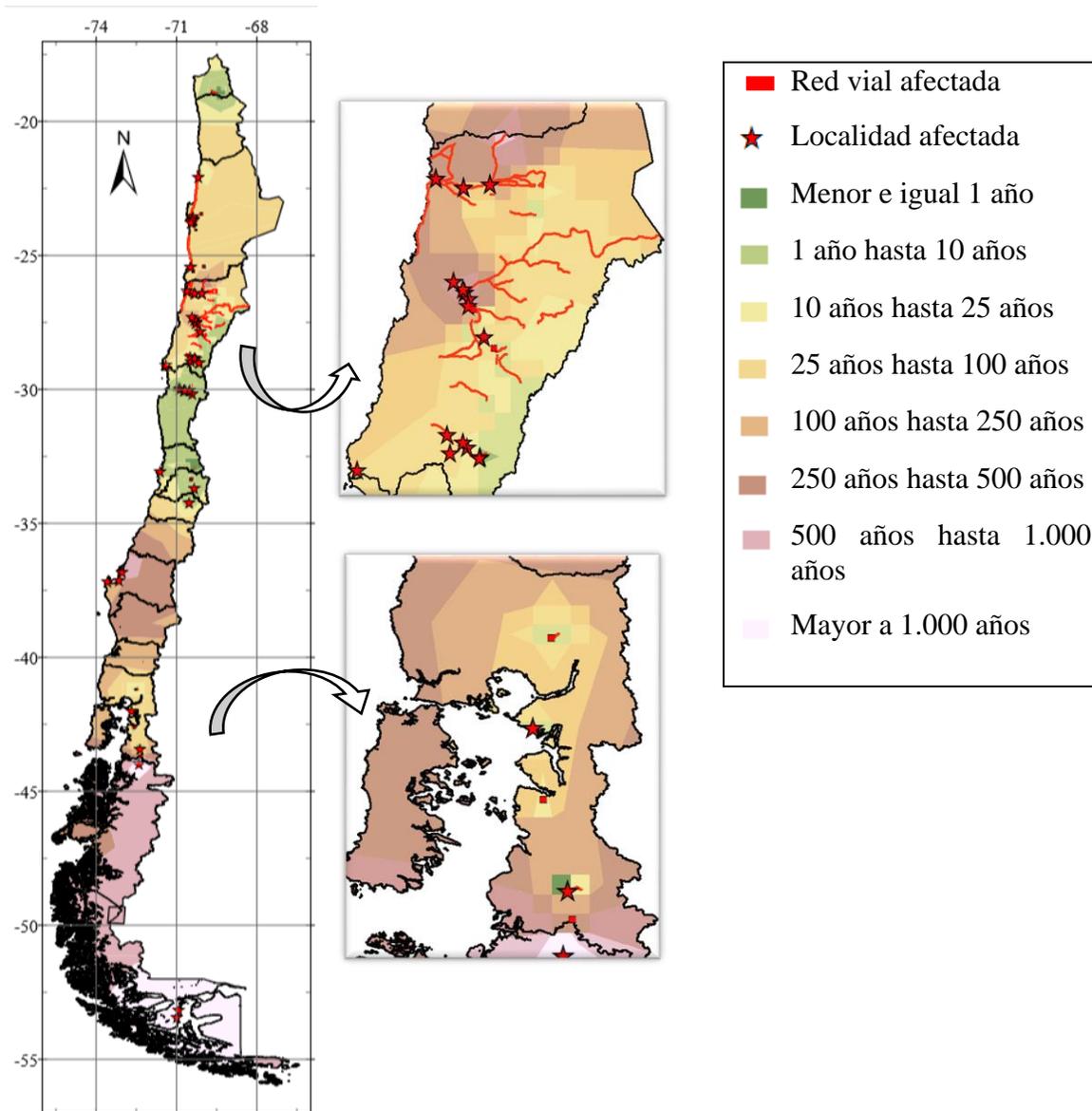


Figura 5. Mapa de periodo de retorno de aluviones

Mapa de Aluviones Relacionado con el Fenómeno ENOS

La Figura 6 muestra los episodios del fenómeno El Niño Oscilación Sur (ENOS) con relación al periodo de retorno de las precipitaciones que generaron aluviones que se encuentran en la zona de influencia del fenómeno climático, en la cual se aprecia una predominancia de eventos con periodo de retorno de aproximadamente 1 año. Desde el año 2.009 se observa una mayor cantidad de eventos y fechas sin presencia de episodios del fenómeno El Niño.

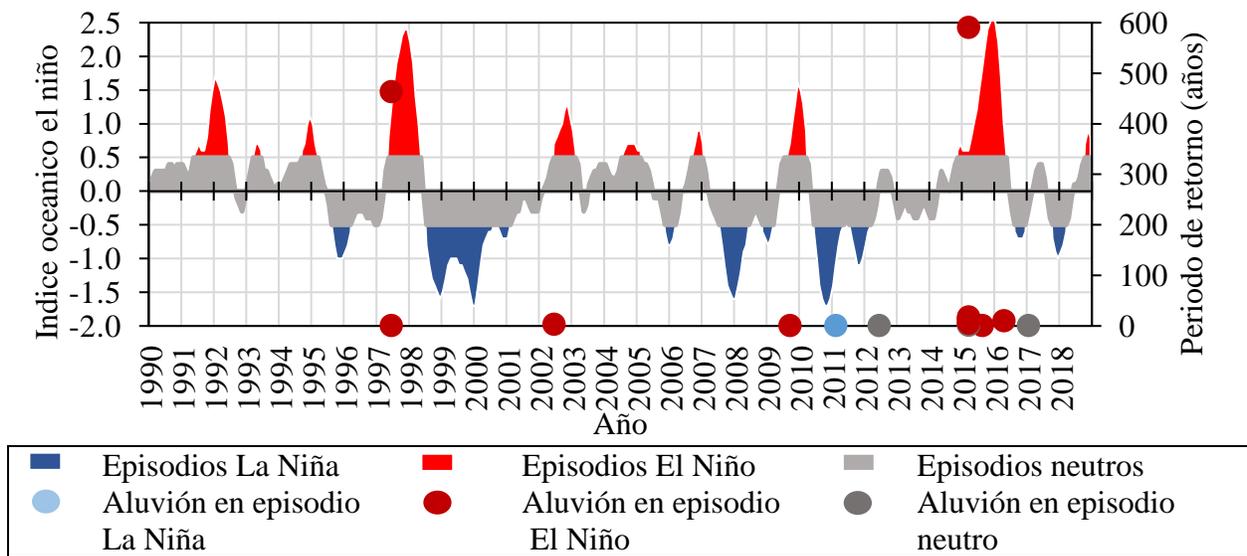


Figura 6. Relación del Índice Oceánico El Niño y los periodos de retorno de los aluviones.

La Figura 7 muestra los episodios del fenómeno ENOS en los aluviones georreferenciados respecto al periodo de retorno y red vial afectada, se observa la mayor cantidad de ocurrencia de aluviones y una mayor extensión del daño vial en episodios El Niño. Además, se perciben aluviones sin presencia de episodios El Niño en zonas precordillerana que históricamente habían presentado estos eventos.

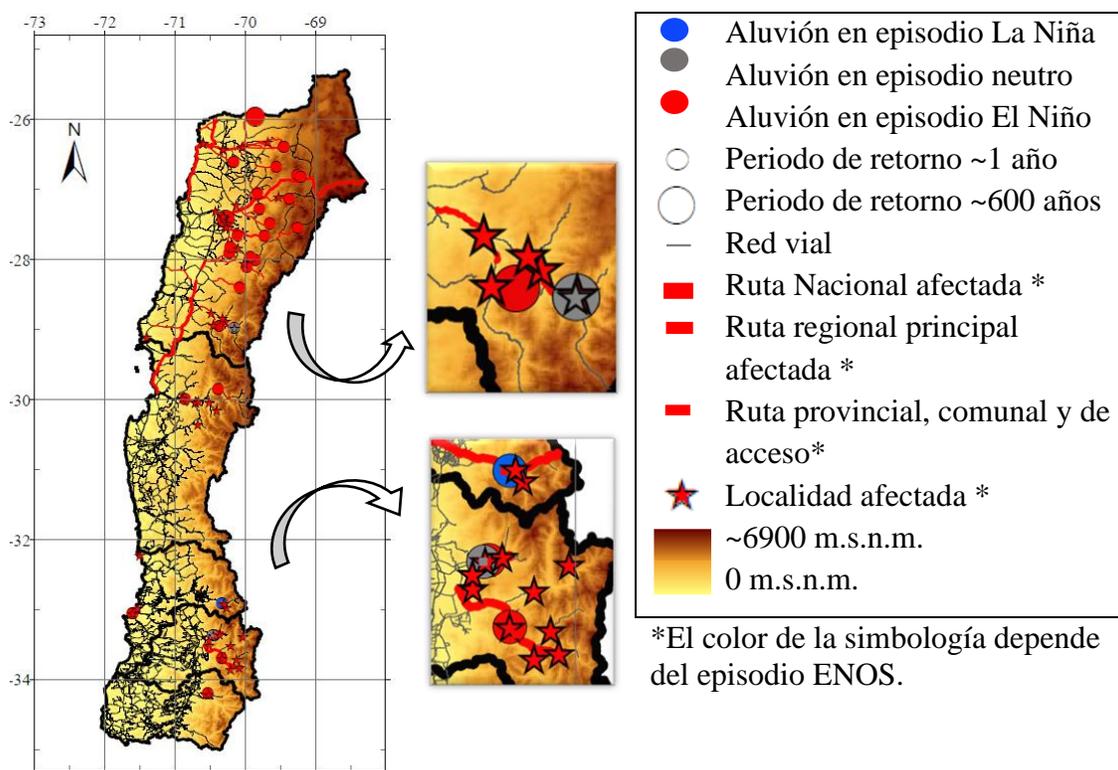


Figura 7. Relación del ENOS y la red vial afectada.

4. CONCLUSIONES

En Chile, los aluviones en las zonas de alta pendiente, principalmente en la Precordillera y Cordillera, suelen generarse por precipitación. La distribución espacial de los eventos muestra en el norte del país la mayor cantidad de aluviones registrados, destacándose la región de Atacama; la cual se caracteriza por una depresión intermedia con presencia de cordones montañosos transversales y una escasa cobertura vegetal. Los aluviones originados en esta zona se caracterizan por largas trayectorias de drenaje que cruzan transversalmente la región. Asimismo, la morfología de este territorio restringe el trazado de la red vial, la cual se encuentra emplazada paralela al cauce en la mayor longitud de los caminos afectados.

La distribución de frecuencias muestra en el sur del país a los aluviones que poseen la precipitación detonante de mayor periodo de retorno, cuya zona se caracteriza por una cobertura vegetal densa. Además, los eventos registrados destacan trayectorias de flujo reducido, los cuales históricamente se han depositado en la primera localidad afectada.

Para estimar los periodos de retorno de las precipitaciones que detonaron a los aluviones, se consideró que el análisis de frecuencia hidrológico estándar es suficiente, cuyo valor se encuentra influenciado por la cercanía de la estación pluviométrica al evento georreferenciado. En las zonas con abundante vegetación, ubicadas en la depresión intermedia de periodo de retorno bajo, indican una mayor influencia de los factores condicionantes por sobre la precipitación. Al contrario, los eventos georreferenciados en la Cordillera de los Andes de bajo periodo de retorno se asocian a la baja representatividad del régimen pluviométrico en la estación debido al efecto orográfico.

En cuanto al fenómeno climático ENOS, se identifica una mayor incidencia de aluviones en los episodios El Niño, los cuales registran precipitaciones de mayor periodo de retorno y una mayor longitud de la red vial afectada. En cambio, los eventos en episodios neutros y La Niña, ocurren en sectores que históricamente registraron aluviones, cuya extensión de daño vial es menor, aun así, ha afectado a caminos de importancia regional y nacional; son de bajo periodo de retorno, lo cual indica una mayor influencia de factores condicionantes a observar en las potenciales zonas de recurrencia.

REFERENCIAS

Costa, J.E. (1984) Physical Geomorphology of Debris Flows. En J. E. Costa y P. J Fleisher (eds.). Developments and Applications of Geomorphology. Springer. Berlin.

Cruden, D.M. (1991) A simple definition of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology 43 (1). 27-29.

Hungr, O, S. G. Evans, M. J. Bovis y J. N. Hutchinson (2001) Review of the classification of landslides of the flow type. Environmental and Engineering Geoscience 7 (3). 221 -238.

Lara, M. (2007) Metodología para la evaluación y zonificación de Peligro de Remociones en Masa con Aplicación en la quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para

optar al Grado de Magister en Ciencias Mención Geología y Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Geología. Universidad de Chile.

NOAA (2019) Cold and warm episodes by season. National Centers for Environmental information.

(https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php). Visitado el 01/05/2019.

Pierson, W. J. y K. B. Katsaros (1986) Introduction. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 91 (2). 2219 – 2219.

RAE (2001) *Diccionario de la Lengua Española*. Real Academia Española. España.

VanDine, D. F. (1996) *Debris Flow Control Structures for Forest Engineering*. Ministry of Forests Research Program. British Columbia.

Varnes, D. J. (1978) *Slope Movement Types and Processes*. En R.L. Schuster y R.J. Krizek (eds.). *Landslides: Analysis and Control*, Transportation Research Board of the National Academy of Sciences, Washington DC.

Wieczorek, G. F. (1996) *Landslide Triggering Mechanisms*. En A. K. Turner y R. L. Schuster (eds.). *Landslides: Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board of the National Academy of Sciences, Washington DC.