

Transporte Inteligente y Desarrollo Tecnológico - T 082

UN SISTEMA INFORMÁTICO PARA LA VIALIDAD INVERNAL DE LA RN7

Ing. Gabriel CABRERA *
Ing. Jorge DEIANA **
Téc. Isidoro BUSQUETS ***
Lic. Rodrigo NIELSEN ***

(*) Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales,
IANIGLA, Centro Científico Tecnológico CCT-CONICET. Pcia. de Mendoza.
(**) Dirección Nacional de Vialidad.
(***) Colaboración.

ARGENTINA

Un sistema informático para la vialidad invernal de la RN7

I. INTRODUCCIÓN: El SCyMVI y el SAC

Este trabajo comienza presentando brevemente lo realizado por la Dirección Nacional de Vialidad desde 2004 para mejorar las condiciones de transitabilidad de la Ruta Nacional 7 (RN7) en la alta montaña de la provincia de Mendoza, entre las localidades de Uspallata y Las Cuevas. Luego se focaliza en el software **Sac7**, uno de los instrumentos tácticos que permitirá comenzar en 2010 con una operatoria de procedimientos con base científica.

El *Sistema de Control y Manejo de Vialidad Invernal*, o *SCyMVI*¹, se concibió sobre dos tipos de objetivos. En primer lugar, se suma a los esfuerzos estratégicos de la institución para incrementar el control y manejo del sistema vial troncal del país, buscando asegurar la capacidad y calidad del servicio vial en los nodos claves del tránsito y el comercio, promover la eficiencia interna del transporte de carga a través de la integración internodal, y fortalecer los cruces de fronteras y corredores regionales. Este objetivo se integra con otros estudios que se hacen desde diversos ámbitos, como el estudio de la Subsecretaría de Planificación del Gobierno Nacional para la mejora de la operatoria del Paso.

En segundo lugar, desde un punto de vista más tecnológico y en particular para la RN7, se intenta neutralizar, minimizar o mitigar la vulnerabilidad de la transitabilidad frente a eventos naturales, cada vez más incidentes ante el crecimiento sostenido del intercambio comercial, que históricamente ha evidenciado no estar acompañado de una organización adecuada, tecnología apropiada ni conocimiento de los eventos naturales actuantes.

Para lograr esto a mediano plazo se determinaron los siguientes esfuerzos estratégicos:

- Adquisición de equipos viales, consistentes en 13 equipos nuevos, por un valor de 5.2 Mu\$s, actualmente todos entregados.
- Redimensionamiento y reconstrucción de los campamentos Uspallata, Punta de Vacas, Puente del Inca y Las Cuevas, por un valor de 21 M\$, actualmente terminando con el último campamento en Puente del Inca.
- Contratación y capacitación de nuevo personal, que pasó de 9 personas a 37, lo que implica una inversión de unos 30 M\$.
- Consultoría de estudios al CONICET para dar una base científica al SCyMVI, por 768 K\$ para la primera etapa, finalizada en 2008.

¹ Deiana, J., 2006

- Renovación del Contrato de Reconstrucción y Mantenimiento (CReMa) de la Malla 330, por 60 meses y un valor de 85 M\$, actualmente en mitad de su plazo.

Estos esfuerzos convergentes originaron o repotenciaron los distintos Subsistemas que integran el SCyMVI. Ellos son, respectivamente con lo listado (Figura 1) el Subsistema de Equipos Viales (SEV), el de Campamentos (SCA), el de Personal (SPE), el de Alerta y Control (SAC) y, por supuesto, el propio tramo de alta montaña de la Ruta Nacional 7 (RN7).

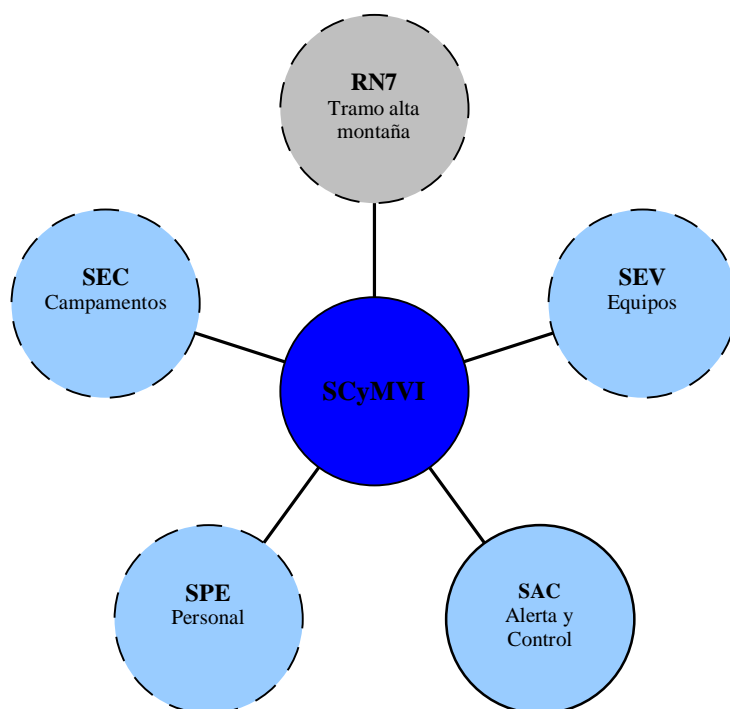


Figura 1. El Sistema de Control y Manejo de Vialidad Invernal del tramo de alta montaña de la Ruta Nacional 7, y los subsistemas que lo componen. En línea continua, el Subsistema de Alerta y Control, sobre el cual se trata en este trabajo.

Los estudios tendientes a la elaboración del SAC se contrataron con la **Fundación CRICYT** (Centro Regional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas) del CONICET, a consultores del **IANIGLA** (Instituto Argentino de Nivología y Glaciología). Estos estudios se organizaron en tres líneas científicas: *nevadas, avalanchas de nieve, e inestabilidad de laderas y cauces*; es decir un triple enfoque científico desde la Meteorología, la Nivología y la Geología, cuyo primer resultado fueron los correspondientes informes de detalle. Además se desarrolló una línea técnica de apoyo de *Cartografía* que elaboró los productos georreferenciados para el trabajo; y una línea ingenieril de *Integración* que aplicó criterios de ingeniería para darle aplicación práctica a todos los resultados.

Además de esto, la línea Integración colaboró con Vialidad Nacional para la especificación del SPE y la concepción estratégica que desembocó en el trazado y organización del Teatro de Operaciones de Alta Montaña de la RN7 (TOAM7) y la identificación de las acciones tácticas del sistema, particularmente su máxima expresión con el Despeje Integral del Corredor Trasandino (DICTA). Estos resultados, que no serán tratados aquí, fueron sin embargo los puntos de partida para el desarrollo racional del SAC.

En base a los estudios nivológicos y geológicos de la consultoría CONICET se localizaron 41 sitios de avalanchas y 11 de caídas de rocas o flujos de detritos, de los cuales en una primera etapa se estudiaron en detalle 4 de los primeros y 3 de los segundos. Sobre estos 7 sitios se elaboró cartografía de detalle, se corrieron modelos de simulación y se diseñaron algoritmos para generar alertas basadas en información topográfica, meteorológica, nivológica y sísmica, y se redactaron manuales de procedimientos para cada tipo de evento.

Sobre estos resultados, y aplicando criterios de ingeniería, conducción operacional y administración, la línea Integración concibió e integró el **Subsistema de Alerta y Control (SAC)**. Este subsistema consiste en un conjunto de instrumentos que son propios de la Conducción Táctica Superior. Estos instrumentos son (Figura 2):

- Un Centro de Operaciones Tácticas (COT) móvil entre Uspallata, Punta de Vacas y Puente del Inca, responsable de confeccionar los planes y órdenes para el SCyMVI.
- Un Centro de Operaciones Logísticas (COL) fijo en Uspallata, responsable del sostén logístico del SCyMVI.
- Una red de cinco estaciones meteorológicas (MET) en Uspallata, Punta de Vacas, Penitentes, Puente del Inca y Las Cuevas.
- Una red de cuatro sitios de observación nivométrica (SON) en los mismos sitios excepto Uspallata (La SON₃ Penitentes es 200 m más alta que la MET₃, a 2800 m de altura).
- Una red de comunicaciones (COM) del SCyMVI.
- Una red informática (DAT) *Intranet* hacia arriba de la UCO o Zona de Comunicaciones, y en profundidad del Teatro de Operaciones de Alta Montaña de la RN7 (TOAM7) o Zona de Acción; y una red *Internet* hacia abajo de la UCO o Zona Interior.
- Un mural cartográfico magnético de Situación del TOAM7 en la UCO, con un duplicado en la Jefatura del Distrito 4° en Mendoza (Figura 3).
- Un software informático denominado *Sac7* que corre en la UCO en un hardware adecuado, también provisto por la consultoría.

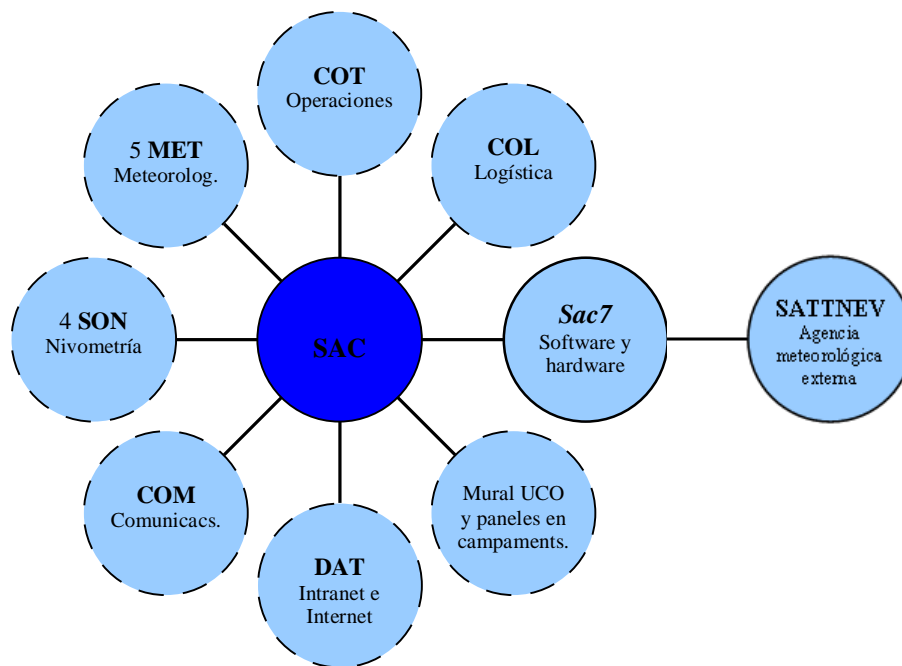


Figura 2. El Subsistema de Alerta y Control del sistema SCyMVI, y los instrumentos que lo componen. En línea continua se representan el instrumento informático Sac7, el cual se detalla en este trabajo, y el sistema externo SATTNEV, al cual se hace referencia somera.



Figura 3. El mural del COT, de 4.4 m de largo. En él se visualiza todo el Teatro de Operaciones del tramo de alta montaña de la RN7, y se fijan magnéticamente íconos ambientales, sitios críticos y posiciones de estaciones meteorológicas, nivométricas, campamentos, cuadrillas y equipos. Está instalado en el Campamento Uspallata (UCO).

El 4° Dto VN está en proceso de instalar las redes MET, SON, COM y DAT. Una vez hecho esto se dictarán talleres para constituir formalmente los COT/COL y se instalarán los paneles en los campamentos. La consultoría CONICET ha diseñado la red MET y el sistema externo SATTNEV por parte de su línea Meteorología²; la red SON por la línea Nivología³; y el COT, el COL, el mural y los paneles por la línea Integración⁴.

² Norte, F.A. *et al*, 2008

³ Leiva, J.C. *et al*, 2008a

⁴ Cabrera, G.A, 2008a

Es importante conceptualizar que este conjunto de instrumentos son indivisibles, y debe evitarse que el empirismo o la resistencia al cambio impidan su implementación integral. No sólo deben materializarse todos los instrumentos, sino también actuar de modo coordinado, tanto dentro del SAC como entre éste y los demás subsistemas. Por ejemplo, la contratación y capacitación del nuevo personal debe insertar en forma rutinaria las observaciones nivométricas junto a las tareas viales tradicionales en VN. El informe de Integración⁴ contiene abundante doctrina sobre este tipo de problemática operacional.

Planteado así este marco organizacional y su problemática, el presente trabajo se enfoca sobre el producto informático Sac7, como instrumento central del Subsistema de Alerta y Control (SAC) del Sistema de Control y Manejo de Vialidad Invernal (SCyMVI).

II. DESARROLLO: El software Sac7

Este software asesora a los instrumentos de comando de la UCO: el Centro de Operaciones Tácticas, órgano de planeamiento que se constituye en Uspallata, Punta de Vacas o Puente del Inca; y el Centro de Operaciones Logísticas, siempre en Uspallata, que provee sostén logístico a las operaciones que se planifican y ordenan desde la UCO.

La versión beta 0.10, está totalmente concluida, y su hardware ya está instalado en la UCO en Uspallata, restando la instalación y conexión de las redes MET, SON, COM y DAT, a concretarse durante 2009; y posteriormente a su puesta a punto, su utilización conjunta con el COT y el COL; todo esto en una etapa posterior a implementarse en 2009/10.

1. Funcionalidad SIG

La mayor parte de los estudios de consultoría del SCyMVI pueden integrarse en un Sistema de Información Geográfica (SIG), que aún resta por incorporar al SIG de Vialidad Nacional, como por ejemplo la nueva cartografía, la traza precisa de la ruta y el inventario vial.

Sac7 es también, en esencia, un SIG; pues presenta su información georreferenciada. Sin embargo no es un producto que corra sobre un SIG comercial ni a ser cargado en el de VN, sino que se ha diseñado atendiendo exclusivamente a las funciones que se esperan del SAC, con la ventaja de poder expandir o reorientar en el futuro cualquiera de las funcionalidades del programa, sin atarse a ninguna limitación impuesta por formatos comerciales, y no requiere de un operador que deban conocer programas SIG.

La información se presenta en diversas pantallas que muestran el tramo Uspallata – Las Cuevas en planta y en elevación, detalle de cada kilómetro, estaciones meteorológicas y

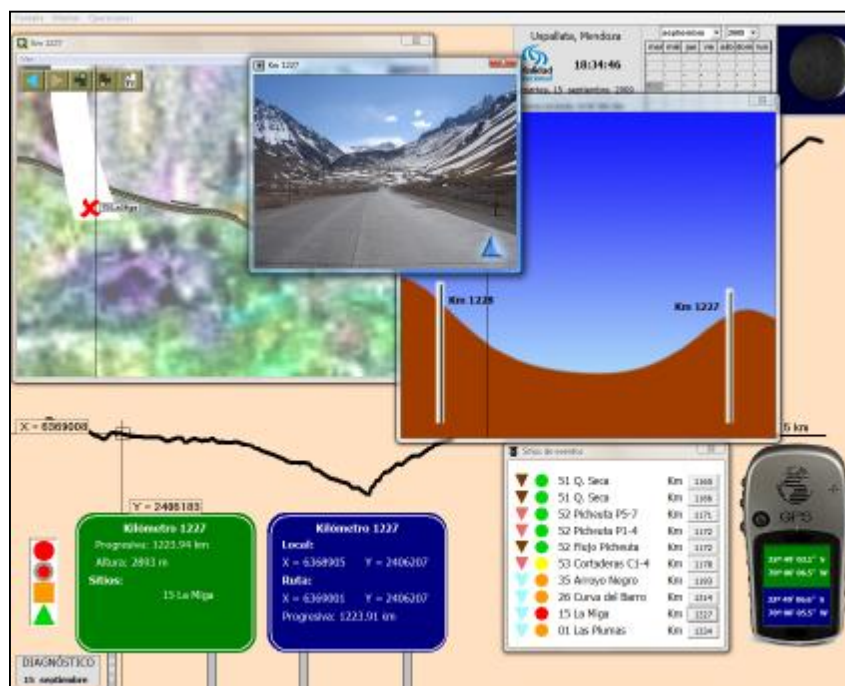
nivométricas, localidades, campamentos y cuadrillas, y un completo inventario vial actualizable, con puentes, túneles, alcantarillas, vallados y señalización vertical y horizontal.

Los elementos que despliega el SIG son:

- Coordenadas: planimétricas planas y geodésicas, y progresivas de ubicación y al origen.
- Información territorial: traza de la ruta con sus poblaciones, campamentos y objetos culturales del inventario vial, con fotografías, otros gráficos y datos técnicos.
- Información topográfica: alturas, pendientes y curvas de nivel.
- Información administrativa: campamentos y cuadrillas viales, con listados y planillas.
- Información ambiental: datos meteorológicos, nivológicos y sísmicos, y además caracteriza a cada sitio peligroso con sus niveles de alerta.

Las pantallas básicas de Sac7 son planos matemáticos de proyección Mercator Transversa Gauss-Krüger en la faja IGM2 con meridiano central 69°W POSGAR (coordenadas planas GK2) diseñados para correr en un monitor 4:3 de 1280 x 1024 píxeles (Figura 4).

Figura 4. Pantalla de Sac7 con la traza de la ruta como fondo, las coordenadas planas del cursor y detalles (cartel verde). Puede verse una lista de todos los sitios críticos con sus alarmas, con una avalancha disparada (alarma roja). Al pulsar sobre el botón de su kilómetro (Km 1227) se despliega el zoom planimétrico (imagen, con sus detalles de cursor en el cartel azul) con la avalancha, desde donde se ha desplegado el zoom altimétrico y una fotografía mirando valle arriba. La ventana con forma de navegador GPS muestra las coordenadas geodésicas de ambos cursores.



Para presentar las coordenadas de la traza de la ruta, Sac7 lee la columna de la posición del cursor en la pantalla y la transforma en una coordenada plana GK2 Este, aprovechando que el tramo entre Uspallata y el Túnel Internacional discurre siempre al Oeste, excepto tres retrocesos al Este inadvertidos a escala de la pantalla. Esta coordenada se usa de puntero en una base de datos que contiene las coordenadas del punto y su progresiva kilométrica.

Esta base de datos se generó con un algoritmo que convierte las cuerdas de la poligonal de puntos relevados en el terreno (cada 10 m aproximadamente) en arcos de una línea curva obtenida resolviendo y combinando las circunferencias determinadas cada tres puntos inscriptos. El desarrollo de este complejo algoritmo excede la presentación de este trabajo.

2. Monitoreo ambiental

La información ambiental meteorológica, nivométrica y sismológica puede ser: *directa* desde las redes para cada variable y estación en tiempo real y pasado; *interpolada o extrapolada* para sitios cercanos sin estaciones, con resolución de cada kilómetro; *pronosticada* para 5 días; o *procesada* en indicadores como humedad relativa o absoluta, punto de rocío, sensación térmica por viento y alturas de la isoterma 0°C y de la línea de nieve.

Esta información se presenta en listados de variables por estación, o en listado y trazado de cada variable en las distintas estaciones (meteogramas) y todo esto tanto en registro (pasado), diagnóstico (presente) o pronóstico (futuro). El pronóstico meteorológico, en forma de meteogramas y listado numérico de variables, será suministrado desde Internet por la red DAT a partir de un programa externo⁵. En una etapa complementaria resta también compatibilizar el protocolo de datos con la red DAT, una vez instalada por VN.

Sac7 indica gráfica y numéricamente el tramo de la ruta que se halla con temperaturas bajo 0°C, a partir de una interpolación o extrapolación altitudinal de los datos de la red MET. Esta altura se expresa también con la progresiva en la cual intersecta a la ruta. Operando de modo similar con las temperaturas de rocío, cuando se cuente con la red MET se desarrollará un sistema similar para indicar la altura de la línea de nieve.

La información nivométrica proviene de la red SON (Sitios de Observación Nivométrica) que proporciona datos sobre acumulación y evolución del manto nival; monitoreo fundamental para la determinación de alertas de avalancha, como se explica en 3.1 y se detalla en 7.3.

Adicionalmente, datos a captar en forma automática por Internet desde la futura red DAT, detectan y seleccionan movimientos sísmicos regionales, con cuyos datos Sac7 calcula la distancia y las aceleraciones e intensidades locales en grados de la escala de Mercalli Modificada, utilizando rutinas de trigonometría esférica y de atenuación de ondas sísmicas.

De todas estas variables, algunas son utilizadas por Sac7 para prevenir las condiciones en zonas definidas a partir de las redes MET y DAT, y así generar alertas ambientales (Figura 5) Ellas son la temperatura del aire, la velocidad del viento, la sensación térmica por viento,

⁵ Cabrera, G.A., 2008b

la cantidad de lluvia y nieve caídas, la presión barométrica reducida al nivel del mar, la intensidad sísmica estimada para el Km 1175 (punto central de sitios prioritarios de caídas de rocas), y las alturas de la isoterma 0°C y de la línea de nieve para todo el TOAM7.

Un evento de tratamiento particular son las tormentas de nieve, que se previenen complementando la información de la red MET con asesoría meteorológica externa (Sistema de Alerta Temprana de Tormentas de Nieve, SATTNEV) bajo la forma de niveles de alerta de nevadas, como se describe en el apartado 7.2 . Si bien estas alertas externas no forman parte de las alertas del SAC, son datos que se utilizan para configurarlas.

Figura 5. Pantalla de Sac7 con la isoterma 0°C indicando su altura y su kilómetro de ubicación. Se despliega el monitoreo ambiental en las estaciones MET. Puede verse que desde Punta de Vacas hay alerta amarilla por frío y nieve acumulada y naranja por viento; en Penitentes la nieve ya configura alarma naranja, y desde Puende del Inca el frío ya es crítico. En Las Cuevas la sensación térmica ya está en alarma amarilla. Por su parte el SATTNEV acusa alerta roja al estar impactando el EMA. Independientemente de ello, el cursor sobre el Km 1178 muestra que Cortaderas está en alerta amarilla por caída de rocas. Esto se debe a que la base de datos registró lluvias en Uspallata la última semana.



3. Previsión de eventos puntuales

Aparte del mero monitoreo, Sac7 asesora al COT para definir operatorias a partir de modelizaciones de los fenómenos naturales en ciertos sitios puntuales de la ruta, por el momento cuatro de avalanchas y tres de otros tipos de rodados. Para eso procesa los datos de monitoreo ambiental con algoritmos desarrollados para cada sitio y fenómeno en particular, con aquellas variables que se relacionan con desprendimientos de nieve, rocas o cauces inestables, estableciendo alertas actuales o tempranas por el diagnóstico o pronóstico de tales condiciones críticas, según se trate de información actual o predictiva proporcionada por las redes MET, SON y sismos vía red DAT.

3.1. Avalanchas de nieve

Las avalanchas se prevén a partir de la acumulación crítica de nieve en sus Probables Zonas de Inicio (PZI), determinadas utilizando información topográfica de detalle y modelos de simulación. Esta acumulación se determina correlacionando con la altitud la acumulación en los SON vecinos. Los sitios que analiza Sac7 son Arroyo Negro entre Polvaredas y Punta de Vacas, Curva del Barro cerca de Penitentes, Quebrada de la Miga entre Puente del Inca y Las Cuevas, y Curva de las Plumas entre Las Cuevas y el Túnel Internacional.

La acumulación estimada en las PZI se convierte en datos probabilísticos de avalanchas de nieve fresca, en los cuales se tiene en cuenta la estabilidad del manto nival según la duración de las situaciones de tormenta, su antigüedad, el viento imperante en ellas, la existencia de nieve previa en las PZI y en los cauces, y el tipo de perfil de dureza y temperatura del manto en los SON, cuya evolución posterior permite prever también avalanchas de placa y de nieve húmeda. Estas previsiones de avalancha pueden ser de diagnóstico o de pronóstico, según las condiciones nivometeorológicas utilizadas provengan del monitoreo ambiental actual o pronosticado.

El manual de procedimientos elaborado por la línea Nivología de la consultoría CONICET⁶, establece un sistema de registro de eventos que recolectará datos valiosos para, en una etapa posterior, ajustar los algoritmos y agregar a las previsiones cualitativas una dimensión cuantitativa. Esta cuantificación permitirá establecer el alcance y las dimensiones de las avalanchas, para poder dimensionar la respuesta vial al evento y su logística.

3.2. Caídas de rocas

Las caídas de rocas de las laderas inestables se prevén a partir de las lluvias ocurridas en la semana anterior al evento en Uspallata o Punta de Vacas, y de la intensidad sísmica local desde el día anterior. A diferencia de la previsión de avalanchas, que surge de modelos, estos eventos se prevén probabilísticamente a partir de sus registros viales y periodísticos correlacionados con registros meteorológicos y sísmicos. Las previsiones por lluvia pueden ser de diagnóstico o de pronóstico, según éstas provengan del monitoreo ambiental actual o pronosticado. Las por sismo son sólo de diagnóstico, después de ocurrido y detectado.

Los sitios que analiza Sac7 son conos de deyección valle arriba del puente del Arroyo Picheuta y en la zona del puente del Arroyo Cortaderas; seleccionados por la línea Geología de la consultoría a partir de datos históricos, verificados también por un inventario espacial de eventos de remoción en masa y la determinación de su peligrosidad y riesgo.

⁶ Leiva, J.C. *et al.*, 2008b

3.3. Flujos de detritos

Al igual que las caídas de rocas, los flujos de detritos por arrastre de agua en cauces inestables, se pronostican y diagnostican probabilísticamente a partir de las lluvias de la semana anterior en Uspallata o Punta de Vacas, en base a registros históricos.

Los sitios que analiza Sac7 son un cauce y conos de deyección 1 km valle arriba del Arroyo Picheuta, y el abanico aluvial de la Quebrada Seca a 25 km de Uspallata; seleccionados por la línea Geología de la consultoría de un modo similar a los de caídas de rocas.

El Manual de Procedimientos de Rodados que fue elaborado por la consultoría CONICET⁷, establece un sistema de registro de eventos que recolectará datos valiosos para ajustar o rediseñar los algoritmos de caída de rocas y de flujos de detritos. Sac7 permite visualizar una base de datos con un registro histórico de ambos tipos de eventos, a fin de comparar las situaciones previstas con las ya ocurridas.

3.4. Congelamiento de la calzada

La red MET cuenta con terminales de monitoreo de la temperatura de la calzada frente al campamento Puente del Inca, la cabecera baja del puente sobre el Arroyo de Los Horcones, y la Curva de la Soberanía, que se reportan a las estaciones MET más cercanas.

Como Sac7 indica la altitud y posición de la isoterma 0°C, pueden estimarse los sitios de congelamiento de la calzada y tomar medidas preventivas o curativas, según sea pronóstico o de un diagnóstico, y revisar decisiones pasadas si se trata de un registro histórico.

Estas medidas involucran técnicas *anti-icing* para prevenir y eliminar la formación de hielo en la calzada, previsto en la compra de equipos viales mencionada, con la menor cantidad posible de sales y con productos que permitan su mayor permanencia sobre la calzada; sin dejar de tener en cuenta el efecto sobre la fricción, para evitar despistes de los vehículos.

4. Funciones logísticas

Si bien no fue el cometido inicialmente propuesto al CONICET para ser desarrollado en la consultoría, como la línea Integración tuvo que especificar un "ambiente administrativo" para el cual diseñar el SAC, Vialidad Nacional solicitó incorporar en Sac7 una parte administrativa con la cual, en una etapa posterior, relacionar el sostén logístico de las operaciones.

Por ello se diseñó un sistema de registro de personal, insumos y equipos viales, que permite al COT y al COL tener información inmediata de existencias de estos recursos, estado

⁷ Cabrera, G.A., 2008c

actual, historial, y niveles críticos en cada campamento; para verificar las existencias antes de las operaciones y detectar las necesidades y prioridades de adquisición. En una etapa posterior podrá simularse su evolución durante la ejecución de las operaciones planificadas.

Al llevarse estos registros en formularios web, es posible su visualización en la red DAT, incluso desde los niveles estratégicos de comando de la DNV en Mendoza y Buenos Aires.

5. Registro histórico

Todos los datos de registro ambiental sintetizados en estadísticas cuatrídurnas (cada 6 horas), las planillas de relevamiento de los SON y las alertas específicas actuales, se guardan al cambiar la fecha como información histórica; a lo que se suman los reportes de eventos ocurridos y las órdenes de operaciones. Estos registros se guardan en respaldos semanales y mensuales en la memoria de la PC de datos y en soportes extraíbles.

La información meteorológica se actualiza cada día desde 5 días en el futuro hasta el día siguiente al presente, luego de lo cual la cuenta regresiva pasa a ser horaria, y finalmente los datos pronosticados se reemplazan por los reales. El pronóstico de dos días en adelante a partir del presente se guarda en un registro especial, para ser auditado y contrastado con los registros reales, a efectos de comprobar la bondad y desvíos de los modelos.

Ciertos registros de los últimos días son utilizados para diagnosticar la situación actual: la evolución del manto nival para avalanchas, las precipitaciones para caídas de rocas o flujos de detritos, y los sismos para caída de rocas hasta el día siguiente de ocurridos.

6. Situaciones de alerta

A partir de las funciones de monitoreo ambiental, previsión de eventos y registro logístico, Sac7 determina situaciones de alerta y dispara las alarmas correspondientes, que distribuye geográficamente en el TOAM7 a partir de sus potencialidades SIG. Las alertas son estados del sistema que permiten tomar acciones con conocimiento de lo que está aconteciendo.

6.1. Tipos de alertas

Las alertas pueden ser generales para la totalidad del sistema, o específicas para determinados lugares o situaciones. Las alertas generales son siempre visibles en la pantalla principal de Sac7, y consisten en una circular de eventos, una cuadrada ambiental, y una triangular logística. Cada una toma su estado de una combinación de alertas específicas. Una cuarta, a activarse en una etapa posterior, muestra el estado de intervención o de actividad de las respuestas operativas del sistema.

Las alertas específicas se refieren a eventos en los sitios críticos puntuales; al ambiente en las zonas de cobertura de las cinco estaciones MET, al sistema SATTNEV, al sismo regional, y al nivel de algunos recursos logísticos críticos en los campamentos y el distrito.

La distribución geográfica de las alertas específicas de sitios se presenta en forma de listas indicando los kilómetros de progresiva, o bien en listas parciales por kilómetro, y desde cualquiera de éstas se accede a una representación gráfica del despliegue de los eventos en los mapas ampliados de cada kilómetro. Las alertas específicas ambientales se muestran en una planilla de estaciones que incluyen el estado sísmico y del SATTNEV. Las alertas específicas logísticas aparecen directamente sobre los registros de recursos.

6.2. Categorías de las alarmas

Las alarmas se categorizan en niveles dados por colores:

- ~ Verde: situación no crítica, sin alerta. Las probabilidades de ocurrencia de un evento están debajo del 25%, o la situación ambiental se sitúa debajo del nivel mínimo para afectar al confort humano o a la estabilidad razonable del sistema.
- ~ Amarilla: situación crítica probable, alerta temprana. Las probabilidades de ocurrencia de un evento están entre el 25% y el 75%, o la situación ambiental supera el nivel para afectar al confort humano o a la estabilidad razonable del sistema.
- ~ Naranja: indica situación de crítica inminente, de alerta alta, cuando las probabilidades de ocurrencia de un evento superan el 75%, o la situación ambiental supere el máximo admisible para afectar al confort humano o a la estabilidad razonable del sistema.
- ~ Roja: indica situación de crítica confirmada, de alerta máxima, cuando un evento adverso ha sido confirmado, o la situación ambiental se considera incompatible con el confort humano o a la estabilidad del sistema.
- ~ Negra: indica falta de datos para configurar una alarma, y en consecuencia reclama la intervención urgente del sistema para restablecer la provisión de datos.
- ~ Violeta: es una categoría transitoria, que dura 24 horas, que indica que una situación de alarma roja reciente se ha revertido por intervención del sistema.
- .. Blanca: esta categoría es utilizada sólo por el SATTNEV, e indica ausencia de condiciones para configurar una posibilidad de tormenta de nieve.
- ¥ Azul: esta categoría es utilizada sólo por el SATTNEV, e indica condiciones incipientes, de mero aviso, para configurar una aún lejana posibilidad de tormenta de nieve.

Las alarmas del SATTNEV son externas al SAC.

7. Algoritmos

Sac7 utiliza algoritmos para elaborar las variables procesadas y las alarmas. Dentro de los primeros están los cálculos locales y zonales de la humedad, la temperatura de rocío, las alturas de la isoterma 0°C y de la línea de nieve, la presión atmosférica reducida al nivel del mar y la sensación térmica por viento. Como éstas son conocidas no se las reproduce aquí.

Para el diseño de los algoritmos que se utilizan para establecer las alarmas, se han determinado los criterios y valores umbrales de las variables que inciden en la operatoria de la ruta por sí mismas o por medio del disparo de eventos adversos en sitios puntuales, como avalanchas, caídas de rocas y flujos de detritos. En éstos las constantes de los algoritmos varían según el lugar. Para avalanchas de nieve, por ahora estos sitios son Curva de Las Plumas, La Miga, Curva del Barro y Arroyo Negro. Para caídas de rocas son Cortaderas y una zona cercana a Picheuta, y para flujo de detritos esta última y la Quebrada Seca. En futuras etapas se completarán los demás sitios, que son casi 50.

A partir de esos criterios, utilizando leyes físicas y correlaciones estadísticas, se han elaborado los procedimientos lógicos y matemáticos para disparar las alarmas, que luego se escribieron en el código informático del programa Sac7. Sin entrar en sus fundamentos meteorológicos, nivológicos y geológicos, se exponen los algoritmos desarrollados, comenzando con las variables ambientales y siguiendo con los eventos puntuales.

7.1. Variables ambientales críticas

Las alarmas ambientales específicas que se originan por las variables zonales enumeradas en el apartado 2 se elaboran por simple comparación con sus niveles considerados críticos.

Cuando las variables ambientales se mantienen o pronostican dentro de los márgenes de calma, la alarma es verde. Pasa a amarilla cuando se alcanza o pronostica alcanzar el estado intermedio, situado entre el valor de calma y el crítico. Se torna naranja cuando se alcanza o se pronostica alcanzar el estado crítico. La alarma roja es manual y se activa por orden del Jefe de la UCO, cuando una situación de alerta naranja compromete, a criterio del COT, la transitabilidad o seguridad de la ruta o la operatividad del sistema.

La Tabla 1 muestra los valores preliminares para los estados de calma, intermedios y críticos de las diferentes variables ambientales. Nótese que aunque SATTNEV puede determinar alerta roja, la alerta roja del SAC no es automática, pues no existen las alarmas rojas de pronóstico sino que se las activa por orden del Jefe del SCyMVI.

Las alarmas ambientales no tienen restricciones para retornar a categorías más bajas, excepto la de sismo que permanece 24 horas. Por orden del J UCO pueden activarse alarmas ambientales de diagnóstico ante cualquier situación que determine el COT.

Variable	Calma $3 < 4$ Im	Intermed. < 4 Cr	Crítico < 4	Observaciones
Temperatura aire*	+5°C – 6.5 H_U	-2.5°C – 5.0 H_U	-10°C – 3.5 H_U	Mínimo de calma 0°C
Sensación térmica	-10°C	-30°C	-50°C	T interpolada, V ráfaga máxima
Viento	30 km/h	45 km/h	60 km/h	Ráf. máx.: Im 40, Cr 80 km/h
Lluvia (evento)	10 mm	25 mm	40 mm	O la mitad en una hora
Nevada (evento)	5 cm	10 cm	15 cm	O la mitad en una hora
Presión barométrica	758 hPa	756 hPa	754 hPa	En P. Vacas, 2435 m, nm 1020.5
EMA (SATTNEV)	pp	p	pp	De agencia meteorológica
Intensidad sísmica	III	IV	V	En el Km 1175

Tabla 1. Valores de diseño de las alarmas ambientales del SAC. H_U desnivel entre la localidad considerada y Uspallata: 0.50 km a Punta de Vacas, 0.71 a Penitentes, 0.83 a Puente del Inca y 1.29 km a Las Cuevas. Las flechas en el título indican en qué sentido de variación desde el valor de la tabla se establece la alarma. Im = intermedio, Cr = crítico, nm = reducida a nivel del mar.

La categoría negra indica que hay un problema de comunicación de datos entre los sensores o los medios de reporte y el SAC. Se enciende cuando no se han recibido datos en una hora, lo cual desencadena las consiguientes medidas de verificación y control. Una alarma negra no significa ausencia de alarma, y mucho menos calma, sino que genera una alerta administrativa que debe resolverse investigando la causa de la falta de datos.

Si no hay comunicación con la agencia meteorológica, la alarma del SATTNEV es negra, lo que ocasiona alarma ambiental negra. Sin embargo esta puede ser quitada manualmente por orden del J UCO, a su criterio, si el resto de las alarmas de pronóstico se mantienen en verde o amarillo. Todas las alarmas del SATTNEV se cargan manualmente en Sac7.

7.2. Tormentas de nieve

El SAC utiliza un Subsistema de Alerta Temprana de Temporales de Nieve (SATTNEV) que se basa en un diagnóstico de la situación actual y en un pronóstico para los días por venir, que lo opera una agencia meteorológica. En base al estado de alerta del SATTNEV, el SAC determina su propio estado y establece sus propias alarmas, como indica la Tabla 1.

La alerta ante un EMA de este tipo se compone de tres fases, dependiendo de si la perturbación se encuentra en fase de acercamiento al área interés, en fase de alejamiento de la misma, o en pleno impacto. En los estadios iniciales de la fase de aproximación y finales de la de alejamiento, las alarmas SATTNEV son de tipo pronóstico, pues describen una alerta de aviso o prevención para la primera fase y de seguimiento o vigilancia para la segunda, todas ellas conductas preventivas ante un *EMA pronosticado* (EMA'), ya sea porque aún no llega o porque todavía no se ha alejado lo suficiente. En cambio, en los

estadios cercanos, y en la fase de impacto, corresponde establecer una alarma de tipo diagnóstico, pues la alerta es de inminencia y confirmación de un EMA concreto.

Para cada fase, SATTNEV establece diferentes categorías de alarma en función de la probabilidad de ocurrencia del EMA sobre el TOAM7. Estas categorías son similares a las del SAC con la diferencia que posee un nivel previo, denominado *Aviso*, de color azul p. Este nivel no produce ningún efecto en el SAC, sino que ante la posibilidad de ocurrencia de un EMA impone una rutina previa de hacer a la UCO el correspondiente aviso y emitir informes cada 12 horas. Mientras el SATTNEV no se encuentre en ninguno de los niveles de alerta (estado de rutina o blanco " ") los reportes a la UCO se emiten cada 24 horas. Si ello no ocurre, el estado pasa a negro.

7.3. Avalanchas

7.3.1. Nieve seca

El programa elabora las alarmas de diagnóstico y de pronóstico para cada cauce en base a los datos de las redes MET y SON, y del modelo de predicción meteorológica vía red DAT. En el actual estado de desarrollo, la red MET aún no está disponible, y se simula con un ingreso manual diario de datos a Sac7. El pronóstico se hace de modo similar, hasta tanto se cuente con la conexión a Internet y se disponga por ese medio de un sistema de pronóstico en formato numérico digital.

Con respecto a la red SON, el SAC posee un manual de procedimientos⁶ para registrar el estudio del manto nival, y volcarlo en Sac 7. Se establecen así las acumulaciones d_{jii} probables en las *probables zonas de inicio* (PZI) a partir de los SON aledaños a cada cauce. Estos se cargan manualmente en Sac7 en la UCO, hasta tanto se cuente con la red Intranet y se diseñe el modo de carga remoto.

Se ha utilizado la siguiente notación: índice i para los SON (SON_i) y j para los cauces (C_j) donde i e i' son respectivamente el SON más alto y más bajo de los aledaños al cauce. Por ejemplo, para el cauce denominado Curva de las Plumas ($j = p$), en el Km 1234 (entre Las Cuevas y el Túnel Internacional) sus SON intervinientes son el 5 (Las Cuevas, 3180 m) y el 4 (Puente del Inca, 2720 m), y la PZI de su sendero principal posee una altura máxima de 3780 m. La acumulación de nieve en esta PZI puede calcularse a partir de las acumulaciones en los SON seleccionados:

$$d_{p54} = \frac{3780 - 2720}{3180 - 2720} (d_5 - d_4) + d_4 = 2.30 (d_5 - d_4) + d_4 = 2.30 d_5 - 1.30 d_4$$

a. Pronóstico

El pronóstico de avalanchas de nieve fresca con alarma de categoría superior a verde se establece sólo cuando se espera una perturbación atmosférica considerada un *evento meteorológico adverso pronosticado* (EMA')⁸, que se caracteriza por nevadas con una tasa de acumulación superior a 5 cm/h por más de 4 horas y menos de -10°C , o una acumulación (a cualquier tasa y temperatura) de más de 20 cm en cualquier SON, o la mitad de estas tasas o acumulaciones con viento superior a 40 km/h en cualquier SON. En tal caso se desencadena el siguiente procedimiento de pronóstico.

1) En base al pronóstico de precipitaciones y de viento, se elabora un pronóstico progresivo para tres días a partir del momento actual. Se calcula el espesor de nieve que se irá acumulando, d'_j (el apóstrofe *prima* indica que se trata de un pronóstico, no de una situación actual) tras un EMA', para la PZL_j superior del C_j considerado, según lo dicho

$$d'_j = d'_{ji} (2 - |v'_{i-\max} - 40| / 40)$$

donde d'_{ji} es el espesor acumulado en dicho cauce j extrapolado o interpolado desde los pronósticos en los SON_i adyacentes; $v'_{i-\max}$ es la velocidad del viento media horaria, en km/h, más alta en las MET_i (o el SON₃ especial de altura en Los Penitentes) adyacentes, pronosticada durante el período de acumulación considerado, considerando que si $v'_{i-\max}$ supera los 60 km/h, se trunca a dicho valor.

2) Como las recomendaciones suizas⁶ indican que la acumulación crítica son 50 cm, pero que si hay nieve subyacente son 30 cm, se calcula el valor crítico $d_{jc} = 50 - 20 s$, donde s es un valor lógico que vale 1 si existe actualmente nieve en el PZL_j inferior de los senderos del C_j, 0.7 si no hay nieve en el inferior pero sí en el superior, y 0 si no hay nieve en ningún punto de los senderos del C_j. El valor de s es 1 si hay nieve en ambas partes o si en el cálculo progresivo de la acumulación se superan cuatro días futuros con nevadas.

3) La categoría de alarma vendrá dada por las siguientes condiciones:

- ~ $0 < d_j < 0.25 d_{jc}$ con tasa de acumulación pronosticada que se mantenga bajo 7 cm/h
- ~ $0 < d_j < 0.25 d_{jc}$ con tasa pronosticada de 7 a 10 cm/h, o si $0.25 d_{jc} < d_j < 0.75 d_{jc}$
- ~ $0.25 d_{jc} < d_j < 0.75 d_{jc}$ con tasa pronosticada mayor a 10 cm/h, o si $d_j > 0.75 d_{jc}$

Los coeficientes 0.25 y 0.75 de estas inecuaciones fueron tomados de la distribución estadística de riesgo de avalanchas en función del espesor de la nieve caída en 3 días, y

⁸ Para mayores consideraciones sobre los EMA, ver el apartado 7.2.

representan aproximadamente la probabilidad del 25% y 75%, respectivamente, de ocurrencia⁹. Estos coeficientes son provisorios y podrán variar tras las verificaciones de sensibilidad que se hagan en el futuro, y hasta ser diferentes en cada cauce.

Estas alarmas de pronóstico se referirán al instante en el cual el cálculo de acumulación progresiva verifique alguna de las inecuaciones o las tasas indicadas se cumplan durante 4 horas. Normalmente se tendrá una alarma verde hasta cierto tiempo, luego un pronóstico de paso a amarilla en otro momento y tal vez un pronóstico de paso posterior a naranja.

4) Posteriormente al pronóstico de avalanchas de nieve fresca, es posible extender un pronóstico de riesgo de avalanchas de placa, lo cual en una primera etapa se hará a modo de ensayo, ya que difícilmente tal tipo de avalanchas alcance la ruta. Mientras no se mantengan las condiciones anteriores y no siga acumulando nieve (lo que extendería en el tiempo el pronóstico de avalanchas de nieve fresca de los últimos 3 días de acumulación progresiva, evaluada cada día) las alarmas de pronóstico así determinadas cambiarán por riesgo de avalanchas de placa:

$$\sim 0.8 d_{jc} < d_j < 2.3 d_{jc}$$

$$\sim d_j > 2.3 d_{jc}$$

Los coeficientes 0.8 y 2.3 de estas inecuaciones fueron estimados tomando en cuenta la distribución estadística del riesgo de avalanchas de placa en función del espesor de nieve⁹, y representan aproximadamente la probabilidad del 25% (en rigor 0.84) y 75% (en rigor 2.40) respectivamente, de ocurrencia. Estos coeficientes podrán variar tras las verificaciones de sensibilidad que se hagan en el futuro, y hasta ser diferentes en cada cauce.

5) Las alarmas de pronóstico de nieve seca no son afectadas por observaciones estratigráficas del manto nival, ya que cuando la nieve es fresca el metamorfismo del manto es incipiente y no es necesario observarlo para saber de su evidente inestabilidad. Cuando las avalanchas no han caído y cabe pronosticarse entonces avalanchas de placa, basta con que el sistema evalúe la acumulación y alerte tal condición. El conocimiento del manto dará entonces mayores elementos de juicio para evaluar el riesgo, pero no es necesario que lo advierta un algoritmo. Además las avalanchas de placa son de muy baja incidencia histórica.

b. Diagnóstico

El diagnóstico de avalanchas de categoría superior a verde se establece sólo cuando esté ocurriendo, o haya ocurrido en los últimos 4 días, una perturbación atmosférica considerada un evento meteorológico adverso en curso (EMA), que se caracteriza por nevadas con una

⁹ McClung, D.M. & P.A. Schaerer, 1993

tasa de acumulación superior a 5 cm/h por más de 2 horas y menos de -10°C , o una acumulación (a cualquier tasa y temperatura) de más de 10 cm en cualquier SON, o la mitad de estas tasas o acumulaciones con viento superior a 40 km/h en cualquier SON. En tal caso se desencadena el siguiente procedimiento de diagnóstico.

1) Se calcula el espesor de nieve esperado d_j , en cm, de los últimos 3 días para la PZI_j superior del C_j considerado según la misma expresión vista, pero esta vez sin apóstrofes

$$d_j = d_{ji} (2 - |v_{i-\text{max}} - 40| / 40)$$

y con datos reales interpolados o extrapolados desde los SON_i y MET_i adyacentes durante las nevadas ocurridas en los últimos 4 días. Es importante destacar que el espesor d_{ji} se calcula solamente con la nieve de los SON de las últimas 72 horas, descartando las acumulaciones anteriores al calcularse cada hora el nuevo espesor.

2) Se calcula el valor crítico d_{jc} del mismo modo que el visto para pronóstico, pero en este caso el valor de s_j es 1 si hay nieve en la PZI y el sendero o si en el cálculo progresivo de la acumulación lleva más de cuatro días con nevadas y se han descartado acumulaciones previas como en el paso 1.

3) La categoría de alarma vendrá dada, como se explicó más arriba, por

$$\sim 0 \leq d_j < 0.25 d_{jc}$$

$$\sim 0.25 d_{jc} \leq d_j < 0.75 d_{jc}$$

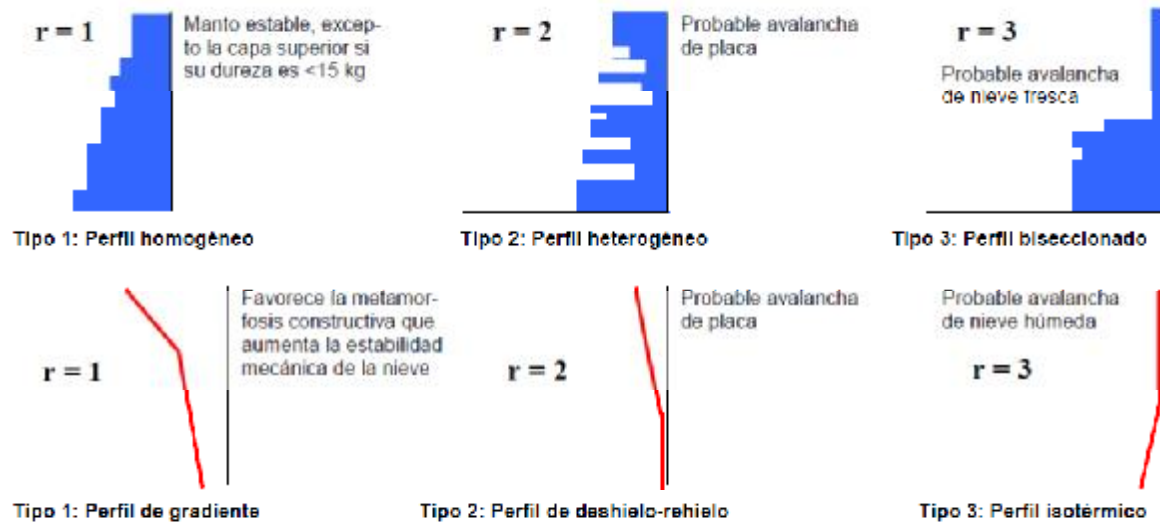
$$\sim d_j \geq 0.75 d_{jc}$$

4) Una vez transcurridos 4 días, y mientras no se mantengan las condiciones anteriores (de los últimos 3 días, evaluadas cada día) las alarmas así determinadas cambiarán por riesgo de avalanchas de placa, como ya se explicó, en base a los mismos criterios para pronóstico.

5) Las categorías de alarma establecidas hasta este punto para nieve seca, se pueden alterar en función de las observaciones estratigráficas del manto nival en los SON, protocolizadas en un Manual de Procedimientos⁶ que se ha suministrado a Vialidad Nacional, tanto de dureza al impacto como de temperatura. No se considera la cristalogrametría ni la resistencia al cizallamiento, que se guardan para constituir registros históricos para estudios estadísticos futuros. Se consideran los SON_i aledaños al C_j que posea el índice de riesgo r_i más alto. Este índice se define a partir de las condiciones físicas del manto nival, según los criterios establecidos en los siguientes tres pasos:

5a) Se caracteriza el perfil de dureza según los tipos de la Figura 6a. Los perfiles en forma inversa al tipo 3, con una capa dura sobre otra blanda, se consideran tipo 2.

5b) Se caracteriza el perfil de temperatura según los tipos de la Figura 6b.



Figuras 6. Índices de riesgo del manto nival según su perfil de dureza al impacto (6a, arriba) y de temperatura (6b, abajo) para redefinir las alarmas.

5c) Se caracteriza la estabilidad sumando los índices de riesgo r de la dureza y de la temperatura. Es posible en casos intermedios estimar r con medio punto, por ejemplo entre los tipos térmicos 1 y 2 ($r = 1.5$) si la parte baja se aproxima a 0°C en un pequeño espesor basal. Para el caso 2 de dureza, se agrega 0.5 ($r = 2.5$) si las heterogeneidades, principalmente bajo 50 cm de acumulación, llegan a valores < 4 kg. El caso 3 se define si la dureza de la sección blanda es < 15 kg; si no, es caso 1.

Así se obtiene para el SON_i considerado una escala de riesgo creciente r_i de 2 a 6. Con esta escala se pondera empíricamente la alarma del C_j considerado, del siguiente modo:

$$a_j = 0.3 a_j' r_i$$

donde a_j' es la categoría de alarma anteriormente determinada para el C_j y a_j es la nueva. Estas categorías valen: para verde 0.25, para amarilla 0.5 y para naranja 0.75. La nueva alarma conserva la anterior si el valor de a no sobrepase el de a' . Si lo sobrepasa, la alarma pasa a la categoría inmediata superior, excepto si es naranja, que conserva su categoría.

Ha de tenerse en cuenta que los valores propuestos aquí para los índices de riesgo del manto nival son absolutamente preliminares, y deberán ser ajustados a medida que se

vayan obteniendo los registros históricos protocolizados en el Manual de Procedimientos, y hacer los estudios estadísticos correspondientes en etapas futuras de este estudio.

7.3.2. Nieve húmeda

Estas avalanchas sólo se verifican ante eventos de fusión o de precipitaciones pluviales en otoño y primavera, tal como fue discutido en el informe de la línea Avalanchas, basándose en la temperatura del manto nival y en la tasa de las precipitaciones. No hay diferencias en el algoritmo de pronóstico y el de diagnóstico, salvo la procedencia de los datos.

Un indicador de alta disposición para que se produzcan avalanchas de nieve húmeda es un manto nival isotérmico expuesto al trópico (en nuestro caso, el Norte) lo cual en nuestros cauces estudiados hasta el momento sólo se da en la Curva de Las Plumas. Sin embargo, preliminarmente, aplicaremos los mismos criterios para los diferentes cauces, aunque seguramente se verificarán antes o preferentemente para el cauce citado.

- 1) ~ Alarma verde: mientras no ocurra una situación de otra categoría de alarma.
- 2) ~ Alarma amarilla: Cuando se acumulen (en pronóstico o diagnóstico más el registro histórico) 5°C-día utilizando la temperatura media diurna, o un EM de precipitación leve (<10 mm/h, <4 h) pluvial o nival con temperatura sobre -2°C; todas estas condiciones contadas a partir de diagnosticado un manto isotérmico sobre -2°C.
- 3) ~ Alarma naranja: Cuando se acumulen (en pronóstico o diagnóstico más el registro histórico) 10°C-día utilizando la temperatura media diurna, o un EM de precipitación intensa (>10 mm/h, >4 h) pluvial o nival con temperatura sobre -2°C; todas estas condiciones contadas a partir de diagnosticado un manto isotérmico sobre -2°C.
- 4) Siendo las condiciones para nieve húmeda casi siempre debidas al cambio de estación, no se evalúa, ni mucho menos pronostica, el cambio de tipo de avalanchas (como en el caso de nieve seca que pasa eventualmente a placa).
- 5) Al igual que para nieve seca, las alarmas de nieve húmeda no son afectadas por las observaciones estratigráficas del manto, ya que su estratigrafía es muy característica y no es necesario observar el manto para saber de su evidente inestabilidad. La evolución del manto con el pasar de los días ya se ha considerado en el algoritmo al contabilizar °C-día.

7.4. Caídas de rocas y flujos de detritos

Con la base de datos históricos de eventos y las precipitaciones en Uspallata y Punta de Vacas, Sac7 determina las alarmas respectivas para cada sitio, tanto de diagnóstico como de pronóstico. El EMA en este caso son precipitaciones líquidas cuyo diagnóstico son los

registros de la red MET y cuyo pronóstico lo aporta el modelo de predicción meteorológica vía red DAT en formato digital. Por el momento, con las redes MET y DAT aún no disponibles, se simula con un ingreso manual diario de datos presentes y futuros a Sac7.

Los pocos datos disponibles no permitieron inferir precipitaciones caídas en los sitios propiamente dichos, sino sólo correlacionar eventos con precipitaciones remotas en las MET Antiguas, del SMN) Uspallata y Punta de Vacas. La búsqueda de los eventos fue sesgada, pues en la mayoría de los casos se fue a buscar el evento en los periódicos a partir de precipitaciones registradas. Muy poco se pudo hacer al revés, es decir hallar la precipitación a partir del evento en los archivos viales. Dado el carácter esporádico de los registros históricos de los eventos, tampoco es posible suponer que no hubo evento si no estaba registrado. Estas limitaciones imposibilitaron la expresión de límites de confianza para los disparadores, por lo que los umbrales de disparo se hicieron a partir de condiciones envolventes, seleccionando el valor de la precipitación o del sismo sobre el cual se verifican todos o la mayoría de los eventos registrados bajo esa causal.

Esto se logró, con muy buena aproximación, cuando se sumaron las precipitaciones antecedentes (de los días previos) en una semana. De ese modo se verificó que la cantidad de precipitación que dispara el evento es, en cada sitio, casi siempre la misma, ya sea que se produzca toda en un sólo día o en hasta 7 días. Se denomina P_{7U} a este valor semanal cuando se refiere a la MET₁ Uspallata y P_{7V} cuando se refiere a la MET₂ Punta de Vacas.

Al estado actual del estudio, como ya se mencionó, sólo se han desarrollado como zonas prioritarias Quebrada Seca (Km 1166) con flujo de detritos, Cortaderas (Km 1178) con caídas de rocas, y una zona valle arriba del puente de Picheuta (Km 1172) con ambos fenómenos. En este último los datos no presentaron la sensibilidad suficiente para determinar umbrales de precipitación diferentes para disparar uno u otro evento, fundamentalmente porque la mayoría de los eventos registrados no especifican qué proceso tuvo lugar. Los que sí varían son los umbrales entre diferentes sitios, lo que también ocurre con las intensidades sísmicas estimadas por atenuación de los sismos regionales.

Estos umbrales podrán variar tras las verificaciones de sensibilidad en estudios futuros, pues con más datos se espera aplicar una función de atenuación al efecto de las precipitaciones con los días transcurridos, y luego ajustarla con un análisis estadístico.

7.4.1. Flujos de detritos por precipitaciones

Dado que aquí tratamos simplemente con una sumatoria de precipitaciones diarias, las alarmas de pronóstico y de diagnóstico son las mismas. Los valores hallados son

a. Quebrada Seca

- ~ $P_{7U} < 5 \text{ mm}$ ó $P_{7V} < 2 \text{ mm}$
- ~ $5 \text{ mm} \leq P_{7U} < 15 \text{ mm}$ ó $2 \text{ mm} \leq P_{7V} < 5 \text{ mm}$
- ~ $15 \text{ mm} \leq P_{7U}$ ó $5 \text{ mm} \leq P_{7V}$

b. Zona de Picheuta

- ~ $P_{7U} < 5 \text{ mm}$ ó $P_{7V} < 1 \text{ mm}$
- ~ $5 \text{ mm} \leq P_{7U} < 10 \text{ mm}$ ó $1 \text{ mm} \leq P_{7V} < 3 \text{ mm}$
- ~ $10 \text{ mm} \leq P_{7U}$ ó $3 \text{ mm} \leq P_{7V}$

Es decir que Picheuta es ligeramente más sensible que la Quebrada Seca, lo cual parece natural dado que ésta última cuenca es mucho mayor y por lo tanto sería más absorbente.

7.4.2. Caídas de rocas por precipitaciones

Estos procesos se disparan por dos mecanismos diferentes: precipitaciones al igual que los flujos de detritos, o sismos. Ambas contingencias se han analizado en la base de datos históricos relevados. Como en el caso de flujos de detritos, también aquí las alarmas de pronóstico y de diagnóstico son las mismas. Los valores hallados son los siguientes

a. Cortaderas

- ~ $P_{7U} < 1 \text{ mm}$ ó $P_{7V} = 0 \text{ mm}$
- ~ $1 \text{ mm} \leq P_{7U} < 5 \text{ mm}$ ó $0 \text{ mm} < P_{7V} < 2 \text{ mm}$
- ~ $5 \text{ mm} \leq P_{7U}$ ó $2 \text{ mm} \leq P_{7V}$

b. Zona de Picheuta (igual a los flujos de detritos)

- ~ $P_{7U} < 5 \text{ mm}$ ó $P_{7V} < 1 \text{ mm}$
- ~ $5 \text{ mm} \leq P_{7U} < 10 \text{ mm}$ ó $1 \text{ mm} \leq P_{7V} < 3 \text{ mm}$
- ~ $10 \text{ mm} \leq P_{7U}$ ó $3 \text{ mm} \leq P_{7V}$

Es decir que Cortaderas es mucho más sensible que Picheuta, lo cual parece natural probablemente porque que en ésta última los conos de deyección son más extensos y de menor pendiente, y por lo tanto tal vez más absorbentes. Nótese que siempre que llueva en Punta de Vacas hay probabilidades de caída de rocas en Cortaderas, porque el umbral es cero; y es apenas 1 mm en Uspallata.

7.4.3. Caídas de rocas por sismo

La evaluación de los sismos se hace calculando la intensidad en la zona del Km 1175, que es céntrica a los sitios analizados, cuyas coordenadas geográficas son $j_0 = 32.67^\circ \text{ S}$ y $I_0 =$

69.54° W. Dado un sismo ocurrido en una localidad de latitud Sur j , longitud Oeste I y a una profundidad h , en primer lugar se calcula la distancia angular geodésica a al epicentro

$$\cos a = \cos(j_0 - j) \cos(I_0 - I)$$

y se descartan aquellos sismos cuyo $\cos a < 0.99$ (alejados más de 8.11° de arco). La distancia al epicentro es

$$D = R a$$

donde el radio terrestre local R se calcula en función de los semiejes terrestres $a = 6\,378\,388.0$ km y $b = 6\,356\,911.9$ km, como

$$R^2 = \frac{a^2 b^2}{a^2 \sin^2 j_0 + b^2 \cos^2 j_0} = 6372.1 \text{ km}$$

La distancia H al hipocentro es entonces

$$H^2 = h^2 + 4R^2 \sin^2(a/2)(1 - h/R)$$

Si la magnitud del sismo es M en la escala de Richter, la aceleración atenuada en el punto de interés viene dada en cm/s^2 por la ecuación¹⁰

$$A = \frac{5110 e^{0.67M}}{(H + 60)^{1.73}}$$

donde la magnitud M se toma igual al valor de la magnitud de cuerpo m_b o se calcula con la magnitud superficial M_S según¹¹

$$M = M_S - 0.37 (M_S - 6.76)$$

Con la aceleración localizada en la zona de interés, es posible calcular la intensidad en la escala de Mercalli modificada (MM)¹²

$$I = 3 \log_{10}(3.16A)$$

Dado que los sismos no pueden ser pronosticados, el algoritmo sólo prevé alarmas de diagnóstico ante la ocurrencia verificada de un sismo regional. Del análisis envolvente de la base de datos fue posible determinar los umbrales prácticos para disparar las alarmas, cuyos valores son los siguientes

¹⁰ Esteva, L. & R. Villaverde, 1973

¹¹ Gutenberg, B. & C.F. Richter, 1956

¹² Richter, C.F., 1958

a. Cortaderas

~ $I < 3 \text{ MM}$

~ $3 \text{ MM} \leq I < 4.5 \text{ MM}$

~ $4.5 \text{ MM} \leq I$

b. Zona de Picheuta

~ $I < 4.5 \text{ MM}$

~ $4.5 \text{ MM} \leq I < 5.5 \text{ MM}$

~ $5.5 \text{ MM} \leq I$

Nótese que Cortaderas es bastante más sensible al sismo que la Zona de Picheuta. Como la escala de intensidades no es lineal, sino logarítmica, puede inferirse que la sensibilidad sísmica de Cortaderas es de 10 a 30 veces mayor que la de Picheuta.

7.5. Condiciones generales a todos los eventos puntuales

Una vez cumplidos los pasos anteriores, ya se trate de avalanchas de nieve, flujos de detritos o caídas de rocas, los siguientes pasos del algoritmo son casi los mismos.

1) Las alarmas de pronóstico expiran cuando faltan 6 horas para que se arribe al instante pronosticado o cuando comienza el EMA' (que pasa a ser EMA en curso, sin apóstrofe) según lo que ocurra primero. En ese momento se consideran como alarmas de diagnóstico, aunque los datos reales del EMA, si aún no ha comenzado, se apliquen más tarde.

Las alarmas de diagnóstico pasan de naranja a amarillo directamente al cambiar sus condiciones. Las alarmas amarillas pasan a verdes transcurridos 4 días sin EMA para avalanchas de nieve seca y flujos de detritos, y con temperatura bajo 0°C ó 2 días sin precipitar para avalanchas de nieve húmeda. En el caso del sismo, si no hubo derrumbe, las alarmas pasan a verde al transcurrir 24 horas desde la última réplica significativa.

2) En cualquier momento, verificado un evento sobre la ruta, la alarma pasa a roja ~ .

3) Una vez intervenida y solucionada la transitabilidad alterada por una avalancha, un flujo o un derrumbe, pasa de roja ~ a violeta ~ , permaneciendo en este estado hasta el día siguiente a mediodía, en que se vuelve al paso 1. No hay pronóstico de estas alarmas; son sólo de diagnóstico.

4) Alarmas inactivas: Cuando no se puede establecer una alarma, por falta de datos por cualquier razón o por no haberse recibidos los reportes, la alarma es negra ~ . Una alarma negra no significa ausencia de alarma, y mucho menos calma, sino que genera una alerta administrativa que debe resolverse investigando la causa de la falta de datos.

5) Intervenciones: Cuando a partir de una alerta se toman medidas de intervención vial en el sitio, con personal o maquinaria, no cambia la alarma, sino que se la representa con un aro (corona circular) gris > a su alrededor. El interior de color sigue al algoritmo general.

III. CONCLUSIONES

8. Futuras versiones de Sac7

El desarrollo futuro del sistema en general y de *Sac7* en particular, no es aislado sino que depende de un proceso institucional de consolidación de lo actuado hasta el momento en cada uno de los subsistemas del SCyMVI de la RN7 (Figura 1), de la implementación consciente de los instrumentos del SAC (Figura 2), y de un seguimiento externo del proceso por parte de quien tenga a su cargo el desarrollo de futuras etapas.

Es este proceso, y no al revés, el que determinará que el programa evolucione de la actual versión beta¹³ 0.10 en las sucesivas etapas previstas para la implementación definitiva del SCyMVI, pues en su estado actual *Sac7 beta 0.10* no es un producto final sino sólo el comienzo de una filosofía de control y manejo operativo para teatros de operaciones ambientalmente adversos a la vialidad.

8.1. Versiones beta 0.10+

Antes de salir de su fase experimental beta, las versiones 0.x superiores a 0.10 contendrán las interfases de entrada y salida para integrarse a las redes MET, SON y DAT una vez provistas por VN. Esto incluye algunas cuestiones de diseño, como los meteogramas y las bases de datos para manejar la gran cantidad de información que proveerán las redes.

Además hay que rediseñar los zooms kilométricos con imágenes de alta resolución, pues la mayoría son todavía Landsat, únicas disponibles al desarrollar la versión beta; e incorporar la nueva señalización y obras colocadas por la contratista CReMa de la Malla 330.

Se desarrollarán varias funciones para entrelazar la logística con las operaciones en planeamiento o en curso, lo que surgirá de los talleres de trabajo que están pendientes hasta tener a disposición las redes.

8.2. Versiones 1.x

Tras el abandono de la fase beta, las primeras versiones de plena operatividad deberán completarse para abarcar todos los sitios críticos del TOAM7 que fueron oportunamente

¹³ Una versión beta de un software es aquella que está en proceso de prueba por parte de los usuarios. Su indicativo numérico es siempre 0, seguido del número de actualización.

detectados por los estudios científicos de base, y que llevará el SAC de los actuales 7 a casi 50 sitios de eventos. Cabe también incorporar el riesgo hidrológico, materializado en flujos extraordinarios y aluviones, al verificarse cada vez más precipitaciones líquidas en vez de sólidas, a causa del Cambio Climático.

Además se impone que las versiones futuras se adapten a las nuevas tecnologías disponibles. Las versiones 1.x poseerán un rediseño visual de escalabilidad a hardware *WideScreen* y a ambiente *Google Earth*, y una versión portátil para micro PC en vehículo.

8.3. Versiones 1+

Tras uno o dos años de funcionamiento de *Sac7* y tras el seguimiento de los procedimientos establecidos para monitorear y registrar los eventos adversos, seguramente se podrán ajustar los modelos matemáticos y la bondad de los pronósticos en las versiones 2.x ; lo que traerá aparejado actualizar los Manuales de Procedimientos, actualmente en versión 1.1. Justamente estos manuales establecen los procedimientos de monitoreo de eventos futuros.

Probablemente esto pueda llevar a modelizar el tamaño de los eventos, y simularlos en pantalla en las versiones 3.x (Figura 7), lo cual permitiría estimar cuantitativamente los recursos necesarios para las operaciones a aplicar. Además, como en los manuales ya se han recomendado algunas medidas estructurales para neutralizar o mitigar los efectos adversos de los eventos sobre la ruta, se tendrán en cuenta tales ajustes para aproximar al dimensionamiento ingenieril de tales obras, y la consiguiente actualización de los manuales.

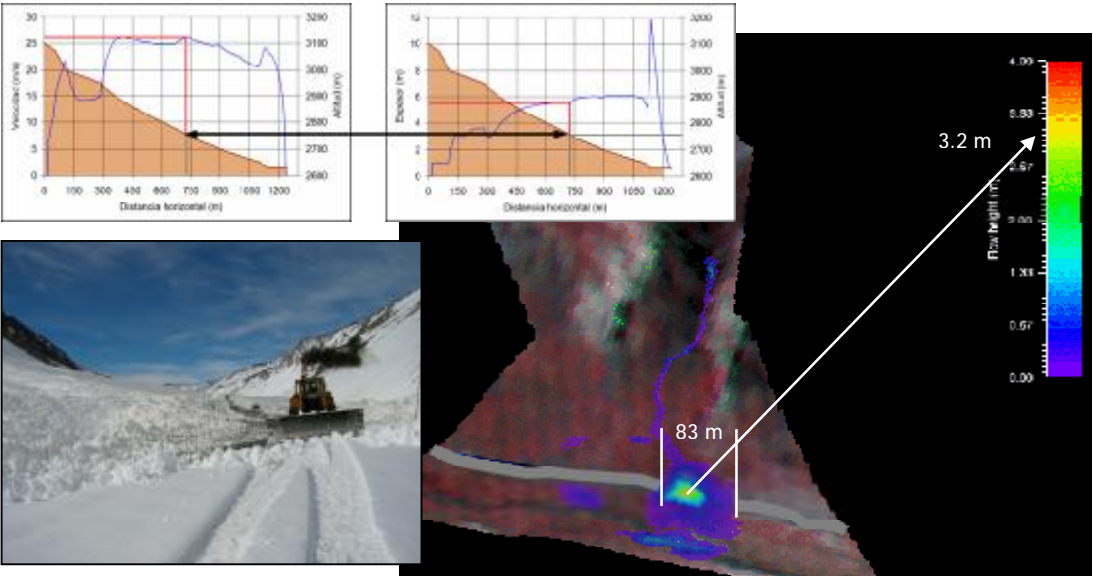


Figura 7. El registro y estudio de nuevas avalanchas permitirá ajustar los modelos de simulación numérica para poder predeterminar sus dimensiones, velocidad y energía de impacto. Con esto se espera dimensionar las obras preventivas de mitigación y optimizar las operatorias curativas de despeje. En la figura, el modelo de la avalancha de La Miga.

Finalmente, cabe esperar que las versiones 4.x y superiores posean capacidades de animación 3D, la integración de capacidades ITS (Sistemas de Transporte Inteligente) tales como la incorporación de monitores *webcam* a lo largo del TOAM7, y el cálculo automático de los Niveles de Servicio, una vez que se terminen de definir estos para la vialidad invernal.

El desarrollo de estas versiones superiores conlleva una evaluación del perjuicio económico, social y de seguridad que implican las afectaciones a la transitabilidad de la RN7.

8.4. Generalización a SacN

Finalmente, esta evolución debería conducir a una generalización del desarrollo de programas gemelos, la familia *SacN*, a todos los N pasos de montaña u otros ambientes viales adversos que impliquen desarrollar los correspondientes SCyM en sus teatros de operaciones particulares.

IV. BIBLIOGRAFÍA

Cabrera, G. A., 2008a. *Sistema de Control y Manejo de Vialidad Invernal de la RN7. Línea Integración.* Asesoría del CONICET a Vialidad Nacional. 381 p.

Cabrera, G. A., 2008b. *Manual de Procedimientos de Meteorología, MPM7 v1.1.* Sistema de Control y Manejo de Vialidad Invernal de la Ruta Nacional 7, Línea Nevadas, Asesoría del CONICET a Vialidad Nacional. 24 p.

Cabrera, G. A., 2008c. *Manual de Procedimientos de Rodados, MPR7 v1.1.* Sistema de Control y Manejo de Vialidad Invernal de la Ruta Nacional 7, Línea Rodados, Asesoría del CONICET a Vialidad Nacional. 27 p.

Deiana, J., 2008. *Sistema de Control y Manejo de Vialidad Invernal del tramo de alta montaña de la Ruta Nacional 7.* Presentación en el II Congreso de Vialidad Invernal, Uspallata, Junio 2006.

Esteva, L. & R. Villaverde, 1973. *Seismic Risk, design spectra and structural reliability.* Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering. Roma.

Gutenberg, B. & C.F. Richter, 1956. *Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration.* Bulletin of Seismic American Association. Vol. 46. pp 105-145.

Leiva, J. C., H. H. Martínez, A. Casteller & G. A. Cabrera, 2008a. *Sistema de Control y Manejo de Vialidad Invernal de la RN7. Línea Avalanchas.* Asesoría del CONICET a Vialidad Nacional. 211 p.

Leiva, J. C., G. A. Cabrera & H. H. Martínez, 2008b. *Manual de Procedimientos de Avalanchas, MPA v1.1.* Sistema de Control y Manejo de Vialidad Invernal de la Ruta Nacional 7, Línea Avalanchas, Asesoría del CONICET a Vialidad Nacional. 30 p.

McClung, D.M. & P.A. Schaerer, 1993. *The avalanche handbook.* The Mountaineers Books. Seattle. 288 pp.

Norte, F. A. & S. Simonelli, 2008. *Sistema de Control y Manejo de Vialidad Invernal de la RN7. Línea Nevadas.* Asesoría del CONICET a Vialidad Nacional. 157 p.

Richter, C.F., 1958. *Elementary Seismology.* W. H. Freeman, San Francisco, 768 pp.