

MARÍA VICTORIA SOTO BÄUERLE (*), MICHAEL MÄRKER (**),
CARMEN PAZ CASTRO CORREA (*) & GIULIANO RODOLFI

DINÁMICA ACTUAL DE MICRO CUENCAS DEL DESIERTO COSTERO DE ATACAMA (CALDERA, CHILE) Y SU INFLUENCIA EN LA GENERACIÓN DE AMENAZA

RESUMEN: SOTO BÄUERLE M.V., MÄRKER M., CASTRO CORREA C.P. & RODOLFI G., *Dinámica actual de microcuencas del desierto costero de Atacama (Caldera, Chile) y su influencia en la generación de amenaza*. (IT ISSN 0391-9838, 2012).

En la región costera del norte de Chile, las terrazas marinas escalonadas de edad cuaternaria presentan escarpes disectados por profundas cárcavas, a partir de las cuales se forman micro cuencas torrenciales. Las cárcavas están controladas por los escarpes de las terrazas. Las condiciones climático-atmosféricas, la presencia de surgencia oceánica y El Niño, contribuyen a que existan precipitaciones esporádicas. Las micro cuencas y quebradas se reactivan y funcionan como lechos torrenciales y flujos de detritos. Los sistemas torrenciales drenan hacia el área urbana de Caldera, generando inundaciones en las partes bajas de la ciudad. La ciudad está en proceso de crecimiento hacia el área de influencia de los sectores con amenazas de flujos de detritos e inundaciones a la población residente.

PALABRAS CLAVE: Caldera (Chile), Terrazas marinas, Cárcavas, Flujos torrenciales, Amenazas.

ABSTRACT: SOTO BÄUERLE M.V., MÄRKER M., CASTRO CORREA C.P. & RODOLFI G., *Present day dynamics in a micro catchment of Atacama coastal desert (Caldera, Chile) and its influence on the generation of hazard*. (IT ISSN 0391-9838, 2012).

In the Caldera coastal district of Northern Chile, the marine terraces of Quaternary age are characterized by steep cliffs dissected by deep gullies, from which torrential streams are formed. The gullies are controlled by the scarps of the terraces. Climate conditions, such as the presence of Ocean waters upwelling and El Niño, cause sporadic rainfall events. Hence, the micro-watersheds and streams become active and function as torrential channels producing debris flows. Moreover, torrential systems drain into the urban area of Caldera, causing flooding in the lower parts of the city. The city is growing into the area influenced by flooding and

debris flows hazard and thus making vulnerable the resident population and infrastructure.

KEY WORDS: Caldera (Chile), Marine terraces, Gullies, Debris flows, Hazards.

INTRODUCCIÓN

El desierto marginal costero del norte de Chile corresponde a un sistema de planicies litorales modeladas como terrazas marinas escalonadas, heredadas de las condiciones geológicas, geomorfológicas y morfoclimáticas diferentes del actual ambiente de aridez costera. Godoy & *alii* (2003) describió las terrazas pleistocénicas, compuestas por secuencias marinas-litorales y fluvio-estuarinas, modeladas como una sucesión de terrazas escalonadas, de unos 20 kilómetros amplitud Oeste-Este y, con al menos, seis o siete relictos de terrazas costeras (Quezada & *alii*, 2007).

La litología de estas terrazas, principalmente de la secuencia baja, localizada entre el nivel del mar y los 105+–18m, son de edad cuaternaria y están conformadas por depósitos bien cementados, como una losa carbonática resistente, asociada a una facies de coquinas superiores, pertenecientes a los Estratos de Caldera (Godoy & *alii*, 2003). Los autores ya mencionados dan cuenta del efecto de la tectónica, al igual que Araya-Vergara (2008), quien concluyó que las superficies elevadas de terrazas son formas derivadas de la fragmentación tectónica.

El evento sísmico del 2010 en Chile centro sur da cuenta de esta realidad, pues hubo lugares en los que se registró un alzamiento de hasta 250 cm (37°02' 37" Lat S / 73° 55' 35" Log W) y subsidencias de hasta 100 cm (36° 97' 85" Lat S 73° 00' 36" Long W), según las mediciones realizadas por Farías & *alii* (2010).

(*) *Departamento de Geografía, Universidad de Chile (Chile)*. E-mail: mvsoto@uchilefau.cl; cpcastro@uchilefau.cl

(**) *Dipartimento di Scienze delle Produzioni Vegetali, del Suolo e dell'Ambiente Agroforestale, Università di Firenze (Italia)*. E-mail: michael.maerker@unifi.it

Proyecto FONDECYT N° 1100223.

Las actuales condiciones desérticas de la ciudad de Caldera se traducen en un paisaje geomorfológico dinamizado por la acción eólica y de las precipitaciones esporádicas. El promedio anual de precipitaciones es de 3 a 10 mm; ocurren precipitaciones ocasionales de carácter torrencial y en los eventos El Niño, este promedio aumenta considerablemente, registrándose 39,4 mm en 24 horas en Caldera el año 1991 (Hauser, 1997). Garreaud & alii (2008), han modelizado los cambios climáticos del semiárido, que estarían relacionados con modificaciones en las precipitaciones. Vicuña & alii (2010) en una cuenca del semiárido (30° lat. S y 70° Long. W), modelizaron cambios que resultaron en un adelantamiento de los máximos flujos estacionales, debido al aumento de las temperaturas en primavera /verano y a la más baja acumulación de nieve en la cordillera. Falvey & Garreaud (2009) destacan un patrón de enfriamiento de la costa de 2° por década y el calentamiento en el valle y el sector andino. No obstante, estos escenarios de cambio no han sido modelizados para la zona costera del semiárido, donde además la presencia casi constante de nubosidad costera (*camanchaca*) aporta condiciones de humedad relativa del aire, con un promedio anual del orden del 74% (Juliá & alii, 2008). En este escenario de cambio climático, se inserta por un lado la geodinámica de las formas del paisaje geomorfológico del desierto costero y, por otro, las transformaciones en el uso del suelo asociadas a la acelerada expansión urbana de la ciudad de Caldera.

A partir de las condiciones dinámicas del sistema territorial del desierto costero de Caldera, se desarrolla un escenario de amenazas naturales, que a su vez indica una condición de riesgo, entendido como la exposición a procesos naturales de una comunidad (Helmholtz Association, 2007). En la actualidad, el riesgo natural es considerado un problema socio ambiental, no resuelto (Cardona, 2009). El sistema geomorfológico del área de estudio genera condiciones de amenaza natural asociados a procesos de carácter endógeno

como exógeno (Castro & alii, 2009; Soto & alii, 2007), junto con ello se debe considerar la interacción de los procesos de incorporación de tierras y el desarrollo de asentamientos costeros legales o ilegales, que añaden la componente de vulnerabilidad del sistema territorial. Ello implica aumento del riesgo asociado al emplazamiento de las entidades pobladas en áreas de amenaza. La amenaza corresponde a procesos de remoción en masa debido a las precipitaciones, o a la inundación pluvial por la impermeabilización del sustrato de coquinas impermeables o por la urbanización de las terrazas marinas del Cuaternario.

Otro tema que surge del tratamiento de estos ambientes de planicies costeras desérticas, es que en estas se desarrollan sistemas morfodinámicos de pequeñas dimensiones, tales como micro cuencas, del orden de los 0.77 km², y en consecuencia, la escala de análisis pasa a ser un tema relevante de platear. En relación a las escalas de análisis, Schumm & Lychty (1965) señalaron que la distinción de causa-efecto en las formas dependen del período de tiempo y del tamaño de las formas consideradas. De esta manera, en tiempo geológico, las formas representan un estadio en el ciclo de erosión y son dependientes del tiempo, pero en un análisis de corto término, las componentes del sistema geomorfológico pueden ser vistos como sistemas en equilibrio dinámico y son independientes del tiempo. A partir de tales postulados Summerfield (2005) concluye que la geomorfología actual abarca todas las escalas, espaciales y temporales y que estas deben correlacionarse.

En consecuencia, el propósito de esta investigación es establecer las condiciones de dinámica actual de las formas relevantes del paisaje costero asociado a las terrazas marinas y su funcionamiento ante eventos pluviométricos excepcionales y a eventos El Niño. La identificación y caracterización de la geodinámica actual cobra importancia toda vez que los efectos de tal dinámica inciden en las áreas de expansión urbana de Caldera y sus actividades asociadas.

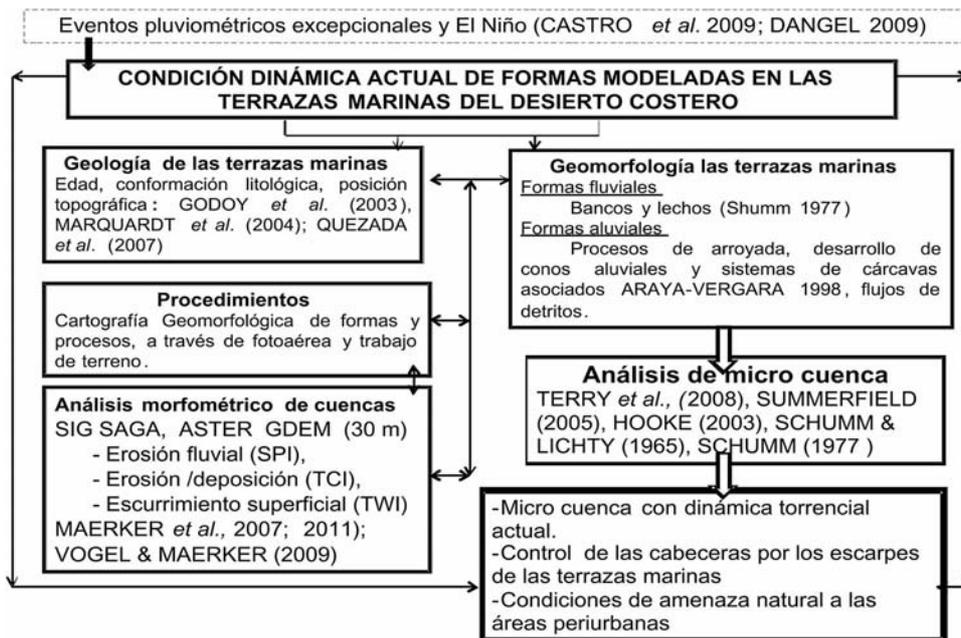


FIG. 1 - Esquema metodológico

MATERIALES Y MÉTODOS

Los contextos ambientales y los cuerpos teóricos, metodológicos y procedimentales que sustentan esta investigación, se observan en la fig. 1. A partir de la identificación y caracterización de las formas del paisaje, su conformación geológica y los procesos dinámicos actuales, se deriva una condición de amenaza natural relacionada a los agentes subáreos. A partir de los trabajos realizados en la cuenca del Copiapó por Castro & alii (2009) y Dangel (2009), quienes concluyen que en ambiente de desierto marginal los efectos de la pluviometría asociada a los años El Niño son de alto impacto en la dinámica geomorfológica, se deriva que tales condiciones serán válidas también para la zona costera de la misma cuenca.

Se analizó la conformación geológica del área de estudio, constituida por terrazas marinas de edad cuaternaria, y relictos del mioceno-plioceno marino. Los trabajos de Godoy & alii (2003), Marquardt & alii (2004) y Quezada & alii (2007), proveyeron la información de las edades absolutas de las terrazas marinas, la conformación litológica y la influencia de la neotectónica en las unidades geológicas presentes en el área de estudio. A partir de la información geológica ya citada se realizó la carta geomorfológica, a través de trabajo de fotointerpretación de fotos escala 1:20.000 y verificación en terreno. Las unidades generales sobre las que se realizó la cartografía son las terrazas marinas, identificando las formas indicativas de acción dinámica actual. Se trataron las superficies de terrazas a través de la identificación de las quebradas; los escarpes de terrazas se analizaron con la clasificación de cárcavas de Araya Vergara (1998) y las micro-cuencas utilizando las nociones del *continuum* fluvial de Schumm (1977) y las formas de terrazas de Tricart (1960).

Los cuerpos teóricos y conceptuales empleados para dar cuenta de la dinámica de las formas analizadas corresponden a otras escalas de análisis en geomorfología, pero se consideró adecuada su aplicación ya que existen experiencias de terreno y laboratorio que han replicado y asimilado la dinámica de formas de pequeño tamaño con formas de dimensión espacial mayor. En este sentido, Hooke (2003) analizó la evolución espacio temporal de un segmento fluvial meandrante de 500 m, concluyendo en un modelo evolutivo; de la misma manera Kleinhans & alii (2009), analizaron la dinámica de micro canales meandranes, y Soto (1991), la dinámica de canales *braided* en un micro cono deltaico. Araya-Vergara (1998) aplicó formas y procesos aluviales y de las vertientes para establecer diferentes tipos de cárcavas.

Complementariamente se trabajó con procesamiento de información digital a través de herramientas SIG. Se realizó un análisis morfométrico aplicando la metodología de Märker & alii (2001, 2008, 2011). Se trabajó en base al análisis de un DEM de 5 m de resolución basado en mapas de topografía local a escala 1:10.000. A partir de los puntos topográficos y de las líneas de contorno se derivó un raster DEM usando el método *Topot raster* implementado en ArcGis (Hutchinson, 1989). El modelo fue corregido hidrológicamente según el algoritmo de Planchón & Darboux (2001). El DEM preprocesado se utilizó para un análisis del terreno a través del SIG SAGA.

La evaluación de los procesos de erosión hídrica se hizo por medio de tres índices topográficos. Para los fines de la modelización se consideró la presencia de un substrato geológico homogéneo e indiferenciado, y los índices se derivaron directamente de la topografía. Para el análisis de los procesos de degradación provocados por la acción del agua y sus efectos en el terreno, las características de escurrimiento son de gran importancia, de la misma manera que la pendiente, que influye en la velocidad de movimiento, mientras que la curvatura condiciona la convergencia o divergencia de la escorrentía, así como la aceleración de esta. La pendiente se obtuvo con el algoritmo de Zevenberg & Thorne (1987), siendo un método adecuado para superficies relativamente suaves. Para determinar la dirección y la acumulación de flujo, se aplicó un algoritmo de flujo múltiple (Tarboton, 1997). Los índices combinados permitieron describir las características complejas de la escorrentía (Wilson & Galland, 2000, en Märker & alii, 2011) y, en consecuencia, se utilizaron como indicadores relativos de amenaza natural. El índice *Stream Power Index* (SPI) se obtuvo como producto de la zona de captación específica y el gradiente. El índice *Topographic Wetness Index* (TWI) se calculó como el logaritmo de la proporción específica entre el área de captación y la pendiente. El índice de capacidad de transporte (TCI) según Moore & Burch (1986, en Märker & alii, 2011), es una aplicación específica en 3D del factor de longitud de la pendiente de la USLE; caracteriza las zonas afectadas por la erosión laminar, transporte de sedimentos y procesos de depósito.

Área de estudio

La ciudad de Caldera se localiza en la bahía homónima (fig. 2), que corresponde a un sector litoral que Araya-Vergara (1972) clasificó como de costa abrasiva, de bahías amplias, con una marcada influencia tectónica. Marquardt & alii (2004) señalan que los depósitos continentales, marinos y litorales del Cenozoico Tardío sobreyacen a un basamento metamórfico del Paleozoico Superior y rocas plutónicas mesozoicas (fig. 3); este basamento estaría pre-fracturado por estructuras predominantemente sub-verticales. Los autores concluyen que la neotectónica ha significado un levantamiento vertical de $0.34 \pm 0.06 \text{ m/Ka}$, dando cuenta que tales patrones de deformaciones son indicativos de terremotos interplacas e intraplacas, moderados a grandes.

La bahía de Caldera está conformada por los denominados Estratos de Caldera (Godoy & alii, 2003), conformados por terrazas marinas cuaternarias, correspondientes a edades de $0,89 \pm 0,11 \text{ Ma}$, identificando 3 interestadiales (MIS 19 (780 Ka), MIS 21 (860 Ka) y MIS 25 (950 Ka). Los estadios MIS 11 (440 Ka), MIS 9 (330 Ka), MIS 7 (210 Ka) y MIS 5 (125 Ka) para las terrazas bajo los 200 m.s.n.m. (Marquardt & alii, 2004).

En estas terrazas marinas se han desarrollado sistemas de quebradas de carácter torrencial y esporádico, que drenan el área urbana de la ciudad de Caldera.

RESULTADOS

El área costera en estudio está conformada por relieves de baja montaña, esculpidos principalmente en rocas

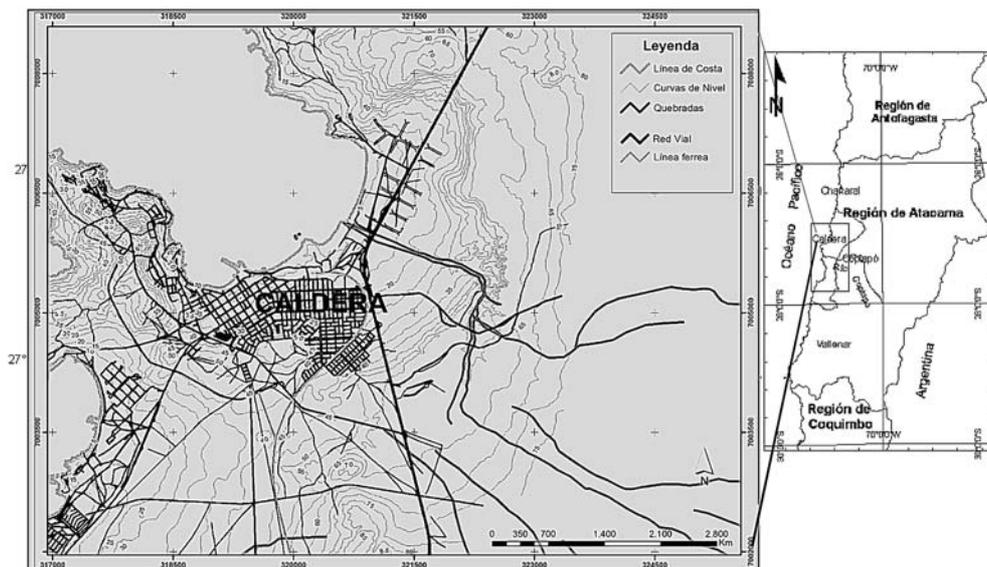


FIG. 2 - Área de estudio. Sector urbano y periurbano de la Comuna de Caldera.

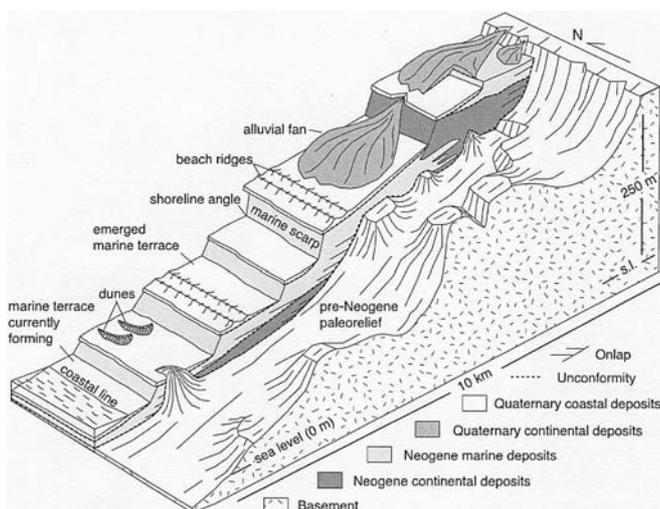


FIG. 3 - Reconstrucción esquemática en 3D que muestra las relaciones geométricas y las discordancias entre el basamento y las unidades sedimentarias del Cenozoico tardío a lo largo del río Copiapó (Marquardt *et al.*, 2004).

graníticas con diferentes grados de trabajo hidrológico en las laderas, como relictos de condiciones climáticas anteriores. Desde los sistemas de laderas del entorno, se observa un nivel bastante homogéneo de formas de glacis y de conos aluviales; presentan su geometría muy clara, denotan una profunda disección debida a la acción heredada del agua, con materiales de diverso calibre a lo largo de su curso (zonas distal, media, proximal) y con evidencias de actividad dinámica actual de las quebradas, tales como micro terrazas y escarpes. Estas formas aluviales sobreyacen a las terrazas marinas (fig. 3). Desde estos sistemas de laderas se han generado sistemas de drenaje, de aparente baja importancia desde el punto de vista dinámico y también en su capacidad de incisión y arrastre de materiales.

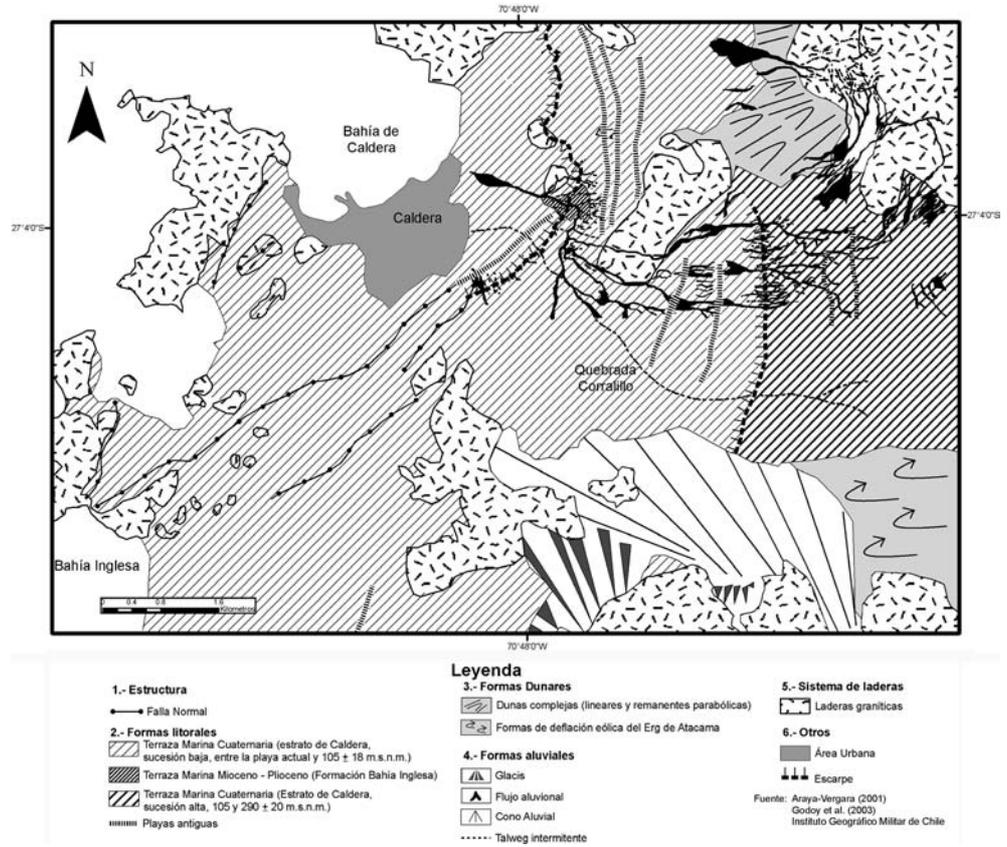
Sistemas de quebradas urbanas

La micro cuenca Quebrada Blanca presenta un desarrollo complejo en la medida que es posible observar variedad de formas de lechos fluviales, formas de incisión de lechos y bancos y de las riberas. Su origen es complejo también, pues presenta una alimentación discontinua y esporádica en forma de cascada, siguiendo los peldaños de las terrazas marinas. Se origina en cuencas de baja montaña de la cordillera costera (vertiente W), con cauces poco desarrollados (poco incididos) que se distribuyen en las superficies de la terraza marina alta (fig. 4). El sistema adquiere su mayor extensión lateral y desarrollo geomorfológico en los niveles de terrazas más bajas. En el escarpe del segundo nivel de terraza se ha desarrollado la cabecera de la cuenca, incidiendo profundamente las coquinas, areniscas y rodados de los Estratos de Caldera.

Es importante destacar la abundancia de marcas de erosión lineal, de la disponibilidad de material en el escarpe y de la acción combinada del agua y la gravedad, e hipotéticamente la sismicidad, que estaría generando el desprendimiento de los bloques más duros, de la cornisa superior del escarpe de la terraza (fig. 5). Destaca en este tipo de micro cuencas que las cabeceras están controladas por los escarpes de las terrazas y por las formas de erosión lineal, desarrollándose una sucesión de cárcavas paralelas entre sí. En un escarpe de nivel inferior, las cárcavas están paralelas entre sí, y no coalesciendo como en la secuencia superior (fig. 6). De acuerdo con las formas identificadas a través de las imágenes y el reconocimiento de terreno, se aprecia un patrón recurrente, dado por la secuencia de la superficie de terraza marina y el escarpe de la terraza, la generación y evolución de cárcavas y la formación de una micro cuenca.

En relación a las formas presentes en la cuenca, es importante destacar la dinámica fluvial, toda vez que el sistema de drenaje presenta en general un patrón anastomosa-

FIG. 4 - Carta geomorfológica.



do, con bancos medios y centrales muy bien desarrollados. También se aprecian segmentos meandranes, sobre todo en la sección más proximal, los cuales derivan aguas abajo a un patrón de anastomosis. La presencia de diferentes niveles de terrazas fluviales asociado a la erosión lateral del lecho, es indicativa de una acción dinámica actual, de la misma manera que la posibilidad de identificar las terrazas actuales, es decir de un nivel de T^0 y T^1 . En este sentido, se pueden asimilar estos niveles a las formas expresadas en la figura 6 de la siguiente manera: la T^0 , correspondería al lecho actual anastomosado, que es atacado por el agua de las precipitaciones en todo evento; son formas efímeras pero que se aprecian en terreno, a través de los escarpes de bancos, del orden de los 30 cm. La T^1 (de una altura relati-

va de los 60 cm), se inunda sólo en los eventos pluviométricos mayores, probablemente durante los años El Niño y corresponderían morfológicamente a los bancos en lechos anastomosados, que son formas laterales, más altas que T^0 y hasta con dos niveles de escarpes, de mayor altura (1m), mejor preservadas y con una cubierta eólica leve.

La red fluvial está controlada por las partes distales del glacis y drena el cono aluvial como una red de canales anastomosados que, al entrar en contacto con la terraza, divergen. Algunos de estos drenes se difunden en las terrazas, pero el *talweg* principal continua su curso hasta el límite de la ciudad de Caldera, aunque con un trazado casi imperceptible. De la misma manera, quebradas menores provenientes de las laderas cercanas a Caldera, son fácil-

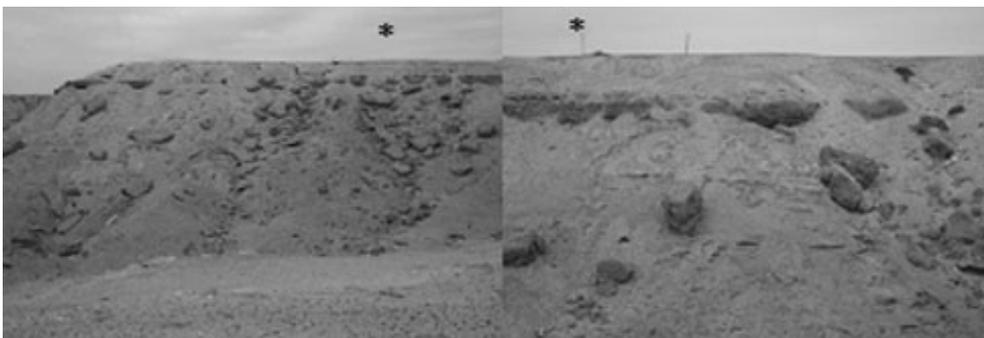


FIG. 5 - Escarpes de las terrazas marinas de la micro cuenca Quebrada Blanca, Caldera. Izquierda: vista general. Derecha: detalle que muestra el borde de la cornisa y el tamaño de los bloques en curso.

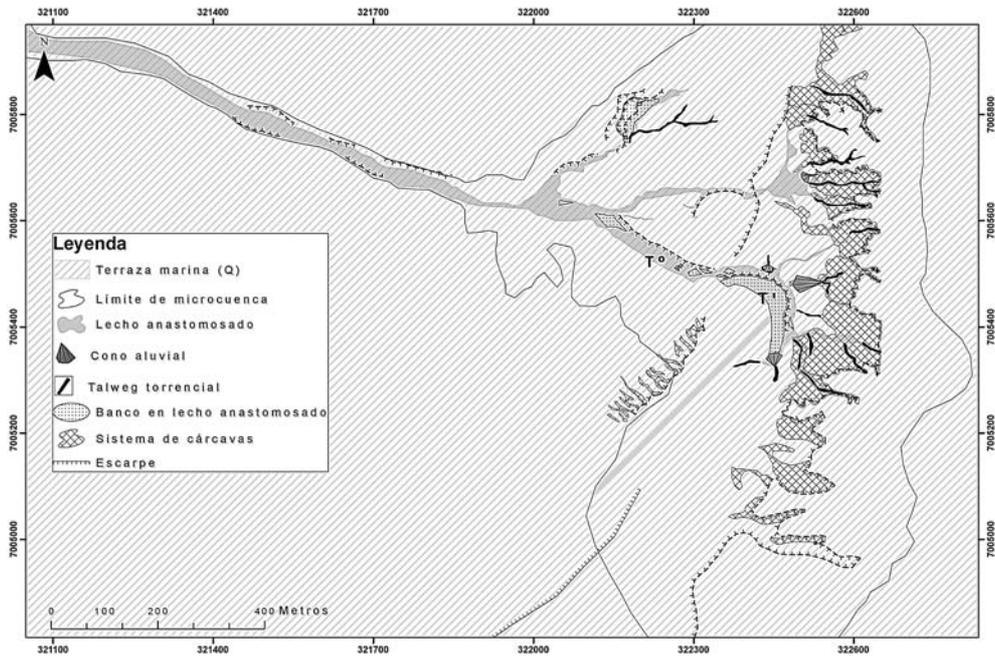


FIG. 6 - Geomorfología de la microcuenca Quebrada Blanca, Caldera.

mente observables en la periferia de la ciudad. A diferencia de Quebrada Blanca, Quebrada Corralillo, cuenca de media montaña, asociada a depósitos aluviales, solo presenta un desarrollo hidrológico importante en la sección distal del cono aluvial principal. No obstante lo anterior, en las partes distales de estas quebradas es posible percibir una condición de incisión mayor que agua arriba, sobre todo cuando incide las coquinas impermeables en las cuales se asienta la ciudad de Caldera. Si bien existe una cobertura eólica permeable, la antropización del sector periurbano ha facilitado la excavación de esta cobertura, exponiendo en superficie las coquinas y losas carbonáticas impermeables (fig. 7). Destaca también el nivel de degradación y deterioro del entorno, como la construcción creciente de viviendas en este sector de denaje de quebradas intermitentes y esporádicas.

De lo anterior se desprende que la cuenca de menor tamaño es más compleja y dinámica que la cuenca mayor, y que desde el punto de vista de la condición de amenaza de flujos torrenciales e inundaciones de carácter local, la pri-



FIG. 7 - Incisión de quebradas exponiendo coquinas impermeables.

mera presenta una condición de amenaza mayor a la cuenca de montaña. Ello debiera estar asociado al hecho que los procesos de escurrimiento superficial actual se difunden con mayor intensidad hasta la sección distal de los conos aluviales e infiltra en las superficies de las terrazas altas, las que presentan una superficie de cubierta eólica que la hace permeable, tanto por la textura como por la escasa humedad del terreno, asociada a las neblinas costeras, *ca-manchaca*.

Dinámica geomorfológica y amenaza asociada

A partir de la información de geomorfología y su correlación con los índices morfométricos aplicados, se identificaron las condiciones de amenaza natural para el ambiente del desierto costero en paisaje de planicies costeras. De acuerdo a los procedimientos SIG aplicados, uno de los aspectos importantes a resaltar es el Modelo Digital de Terreno (DEM) del área costera en que se aprecian claramente las formas de las terrazas y de las cuencas y la red de drenaje intermitente asociado (fig. 8). El DEM y los índices morfométricos derivados se han utilizado como indicadores relativos de la amenaza natural. El DEM muestra la energía relativa disponible para los procesos de erosión, transporte y depositación, especialmente donde los gradientes de elevación son altos, tales como en los bordes de las terrazas, donde los procesos tienden a ser más intensivos.

De esta manera el índice *Stream Power Index* (SPI), describe los efectos de los procesos de erosión fluvial lineal, tales como cárcavas, quebradas y erosión lateral de lechos (fig. 9). En el área estudiada, el paisaje del desierto costero da cuenta que los sistemas de drenaje heredados presentan las condiciones morfológicas apropiadas para alcanzar altos niveles de acción fluvial. Destaca la relación

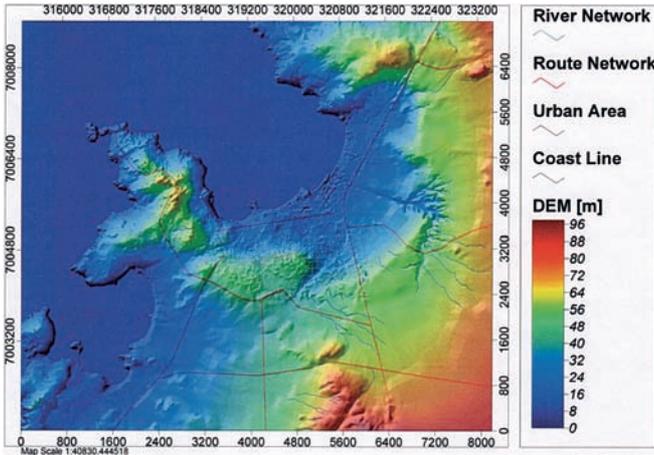


FIG. 8 - Modelo Digital de Terreno de la bahía de Caldera.

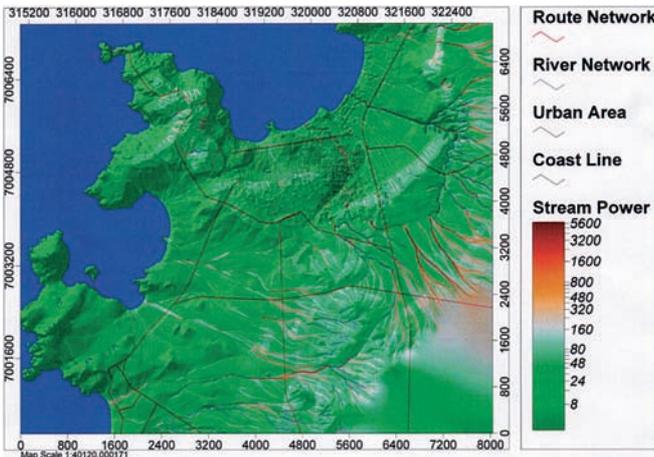


FIG. 9 - Índice de Energía del Flujo.

existente entre las áreas aportantes de las laderas del bloque cordillerano costero y cómo éstos cambian y se acomodan a la topografía de las terrazas fluviales. A partir del *Stream Power Index* depende principalmente del área específica de la cuenca y de las laderas escarpadas con alto potencial de erosión lineal, se han coloreado en tonalidades anaranjadas a rojas. Una parte de la Quebrada Blanca en la ciudad de Caldera no muestra sectores con alto riesgo debido a la erosión laminar. Gran parte de la actividad geomorfológica que puede ser derivada desde el *SPI*, se concentra a lo largo de los bordes de las terrazas donde los gradientes son altos y una cierta cuenca crítica que es una aproximación del volumen de agua disponible.

El índice *Topographic Wetness Index* (TWI), se aplicó bajo la hipótesis de la existencia de un substrato uniforme, en litología y profundidad, en donde la topografía es el factor dominante. Este índice proporciona la información sobre la acumulación de agua y la saturación del suelo y el substrato, siendo en consecuencia un importante indicador de los procesos de escorrenría superficial e inundacio-

nes. Analizando el modelo de la figura 10, es posible apreciar las áreas potencialmente susceptibles de acumular agua, siendo los sistemas de quebradas los acumuladores, y también los difusores. Este índice complementado con el *SPI* dan cuenta de las condiciones de amenaza asociadas al agua, por escurrimiento y acumulación, sobresaliendo la importancia que tienen tanto las áreas de las cabeceras de las laderas como de las cabeceras de los sistemas de cárcavas. Otro aspecto relevante de la amenaza y del riesgo, es el drenaje de los cursos de agua en el área urbana de la ciudad de Caldera.

La figura 10 revela que no solamente la Quebrada Blanca acumula agua en relación con la alta humedad del substrato, si no que también dentro de la ciudad de Caldera existen algunas zonas que muestran altos valores de saturación ($TWI > 14$) y por lo tanto, serían áreas con alto potencial de escurrimiento. En contraste, las áreas escarpadas de los sistemas remanentes de terrazas, siguen siendo bastante secos. Consecuentemente las áreas en azul al interior de la ciudad de Caldera corresponden a sectores con los más altos riesgos de inundación

El índice de capacidad de transporte (TCI) caracteriza las zonas afectadas por la erosión laminar, transporte de sedimentos y procesos de depositación. Los patrones observados en la figura 11 son esclarecedores de los sectores en los que se produce erosión, difusión y acumulación, destacando sobremanera la función dinámica que tienen los escarpes de las terrazas y las cárcavas y sistemas de cárcavas como aportadoras de masa a los sistemas de drenaje. Las superficies de las terrazas son prácticamente inactivas, salvo cuando están incididas por quebradas, independientemente de la dimensión de las mismas. En términos de amenaza, ésta no es directa, en el área urbana, pero sí es importante en términos de los siguientes aspectos: la complementariedad de los tres indicadores anteriores; la capacidad de aporte y extracción de masa, y, las condiciones de topografía y red de drenaje favorables para el transporte. El sistema de aporte de masa, y transporte de masa y agua afectaría directamente a la ciudad de Caldera.

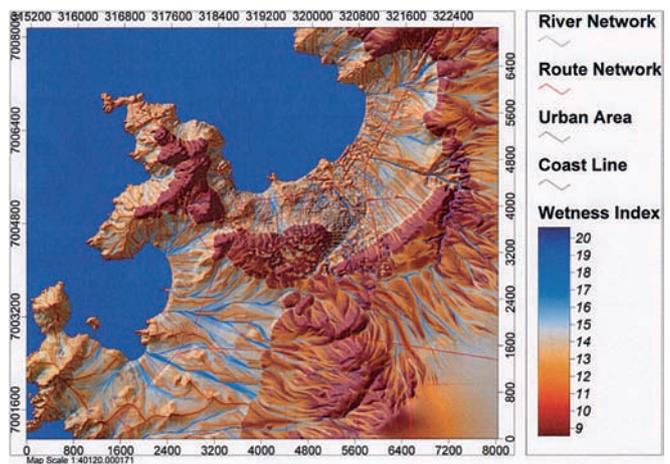


FIG. 10 - Índice de humedad topográfica.

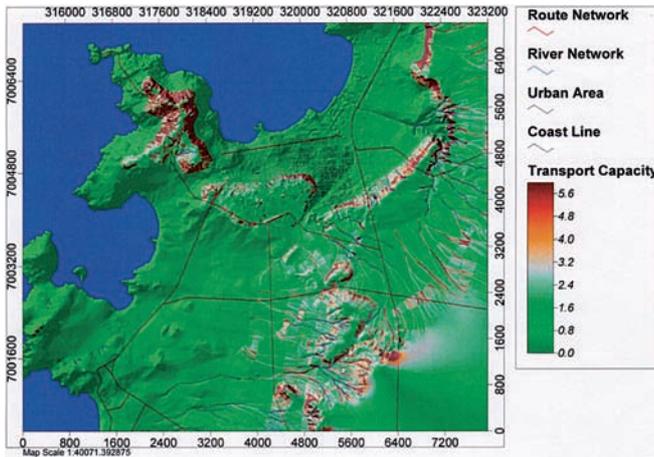


FIG. 11 - Índice de Capacidad de Transporte.

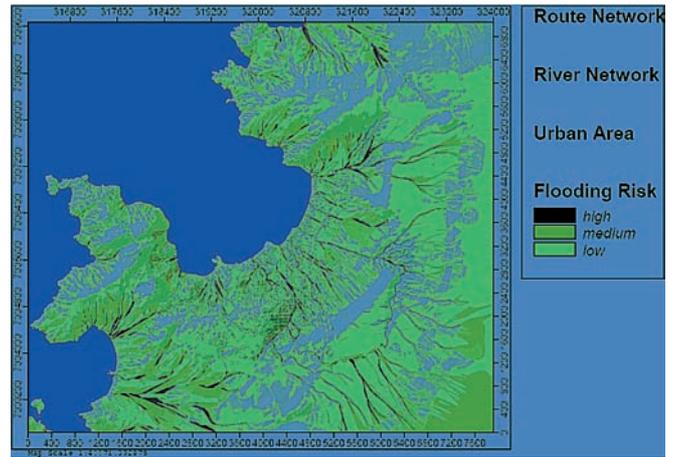


FIG. 12b - Riesgo de inundaciones.

Combinando los índices que indican áreas con mayor riesgo para la población y la infraestructura en Caldera, se puede establecer lo siguiente:

- 1) Áreas con un alto SPI y TWI, en donde es esperable el transporte de una gran cantidad de sedimentos (por sobre los flujos híper concentrados).
- 2) Áreas con TWI alto, pero bajo SPI y TCI serían áreas principalmente afectadas por inundaciones relacionadas con una baja producción de sedimentos y transporte.
- 3) Áreas con alto TCI serán propensas a procesos superficiales de erosión laminar. Las unidades principalmente afectadas corresponden a las laderas de las terrazas marinas. Estas son muy vulnerables debido a la presencia de material sedimentario superficial (Ej. para la infraestructura de comunicaciones, como las carreteras).

Para demostrar el nivel de amenaza, las primeras dos combinaciones de índices han sido reclasificada en tres clases: i) bajo, ii) medio, iii) alto (figuras 12a y 12b). La re-

clasificación fue hecha según las observaciones de campo, como la altura de los bancos y lechos, y las marcas de inundaciones anteriores. La geometría urbana de la ciudad de Caldera se acomoda a la topografía existente, que junto con la trama vial impermeabilizada constituyen un escenario propicio para el desplazamiento de flujos origen pluvial (fig. 13). Por otro lado, los antecedentes aportados por la modelización son coherentes con la geomorfología dinámica de las áreas cubiertas, de tal manera que los escarpes de las terrazas, contribuyen a la incisión y al aumento de la velocidad del flujo. Si bien hay una cobertura eólica arenosa altamente permeable, hay que considerar que esta puede estar sometida a una humedad atmosférica de hasta un 74% debido a la *camanchaca* y que se puede establecer que bajo condiciones de humedad atmosférica alta, baja la condición de infiltración del manto arenoso y se favorece el escurrimiento superficial, la excavación de los lechos y el desborde de flujos torrenciales.

En el caso de Quebrada Blanca, el drenaje como flujo torrencial conformando flujos de detritos, genera impactos al interior del lecho, erosión lateral, remoción de las terrazas T° y T', y fluye como un flujo torrencial hasta la ruta 5 donde además del terraplén de aproximadamente 1m de altura, el drenaje es de diámetro insuficiente. Las áreas afectadas en este caso corresponden al sector urbano y de expansión destinado a uso industrial (fig. 14).

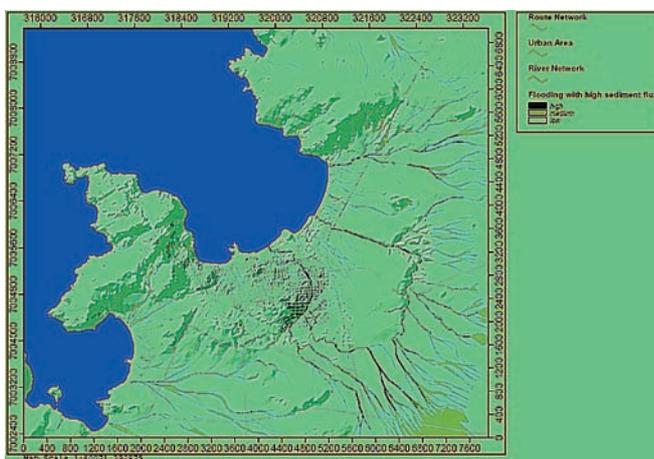
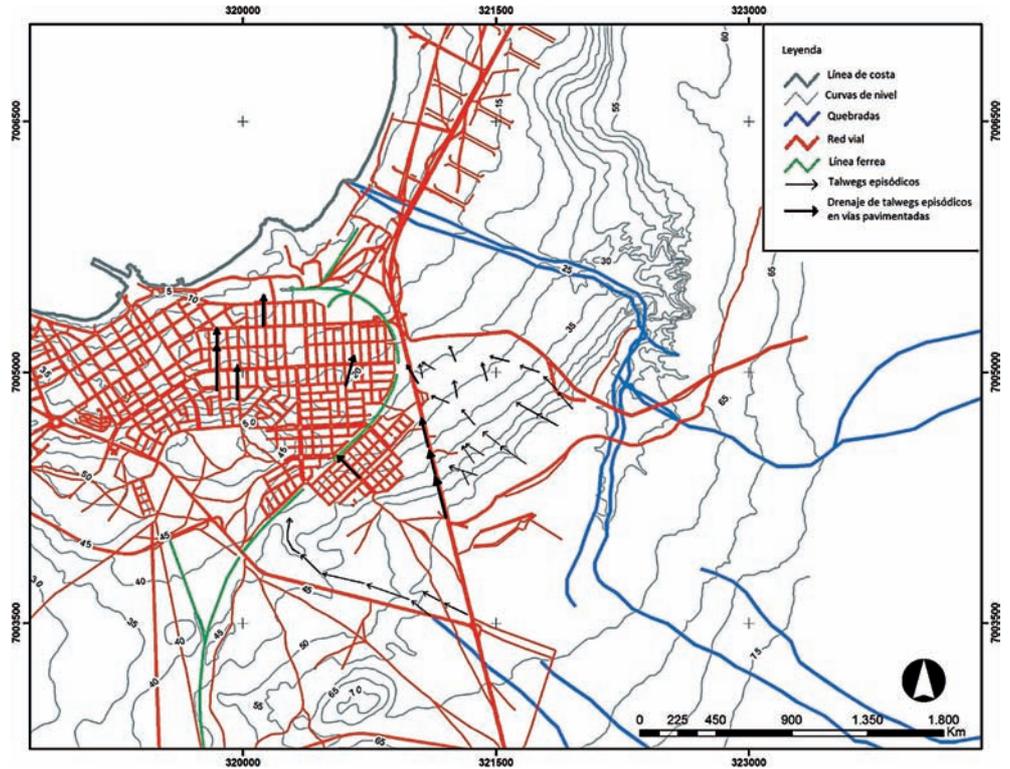


FIG. 12a - Nivel de amenazas de inundaciones con alto flujo de sedimentos.

DISCUSIÓN

Uno de los hechos importantes para comprender la dinámica de las formas estudiadas, tiene que ver con la geología y la geomorfología, descritas por Castro & alii, (2009), Arriagada (2009), Quezada & alii (2007), Paskoff (2003) y Godoy & alii (2003), que dan cuenta de un paisaje de terrazas marinas de edad pleistocénica, con un manto arenoso de carácter eólico, más o menos espeso, y de generación actual. El paisaje escalonado de las terrazas marinas conformadas de rodados y coquinas cementadas e impermeables, consti-

FIG. 13 - Condición de amenaza en Caldera. Mapa elaborado en base a planimetría del Plan Regulador Comunal Caldera (2010). Las flechas indican la dirección de flujos en el entorno de la ciudad y en las áreas urbanas pavimentadas.



tuyen también la conjunción de condiciones necesarias para la actividad aluvional de carácter pluvial de micro cuencas y quebradas torrenciales descritos en este trabajo.

Otra consideración de importancia es el dominio morfoclimático del desierto costero de Atacama, considerado como de hiper aridez (Dunai & *alii*, 2005), pero que sin embargo presenta condiciones climático-atmosféricas-oceanográficas que propician variaciones estacionales de la temperatura superficial del mar, influidas por los fenómenos de El Niño y La Niña (Farias & Castro, 2008; Vargas & *alii*, 2000), y la consecuente variabilidad de surgencias

en la zona de Caldera. Los bajos montos anuales de precipitaciones, del orden de 10mm, se ven fuertemente incrementados durante El Niño. De lo anterior se puede derivar que las condiciones climático-atmosféricas-oceanográficas señaladas, constituyen un escenario propicio para la permanencia de las neblinas costeras y de eventos pluviométricos ocasionales debidos a la humedad del aire, además de los períodos El Niño.

En tales escenarios, la micro cuenca descrita es un sistema dinámico y altamente efectivo a lluvias esporádicas locales o a El Niño. Quebrada Blanca es una micro cuenca cuyas formas, dan cuenta de la acción pluvial, de mayor envergadura pues hay indicios de acción fluvial en las T° y T', que son las terrazas de origen y funcionamiento actual (Tricart 1960). No así la pequeña quebrada urbana de la zona sur, que puede funcionar rápidamente ante precipitaciones esporádicas, generando flujos de detritos e inundaciones locales, que además se desplazan hacia las partes bajas de la ciudad siguiendo la topografía escalonada de las terrazas, cuyo sustrato impermeable cobra especial importancia.

De acuerdo a los índices topográficos aplicados, la relación sintética entre geodinámica y amenaza natural se expresa en la tabla 1.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos dan cuenta de un sistema costero caracterizado por las formas relictas profundamente disectadas en los tiempos actuales. Las formas de erosión y



FIG. 14. - Caldera: drenaje de Quebrada Blanca en Ruta Internacional 5, con su exutorio represado y sin trabajos de mantenimiento.

TABLA 1 - Relación entre parámetros morfométricos, condición geodinámica y amenaza natural asociada

Índices morfométricos	Condición geodinámica / Amenaza
Índice de Energía del Flujo <i>Stream Power Index (SPI)</i>	El índice SPI es el producto del área específica de la cuenca y la gradiente. Las cuencas son un <i>proxi</i> del volumen de agua mientras que las laderas (gradiente) determinan la velocidad de la escorrentía. En este sentido, el SPI es un índice de la energía disponible para la erosión y el transporte de sedimentos acumulados frecuentemente en flujos turbulentos. Aplicado al área de estudio, se traduce en una amenaza alta en las zonas de laderas y talwegs, y muy bajo en las superficies terrazas marinas.
Capacidad de Transporte <i>Transport Capacity Index (TCI)</i>	Es un índice que caracteriza la capacidad de transporte y se usa como indicador de procesos de erosión laminar (areal). Corresponde a una combinación del área específica de la cuenca y el seno de la pendiente (gradiente) La ecuación corresponde al factor LS de la USLE (Wishmeier <i>et al.</i> , 1974). Se usa para indicar áreas de erosión y de alto potencial de transporte de sedimentos. Aplicado a Caldera, destaca la condición dinámica de las áreas de mayor pendiente, que son los escarpes de las terrazas marinas. Existe en consecuencia una alta condición de erosión areal y de acuerdo a geomorfología de las subcuencas, se puede establecer una condición de amenaza alta.
Índice de Humedad Topográfica <i>Topographic Wetness Index (TWI)</i>	El TWI es el logaritmo natural del radio de la cuenca específica y la pendiente. Este índice expresa el potencial de escurrimiento superficial debido a la saturación (exceso de saturación o escorrentía Dunne). Las zonas húmedas producen generalmente escorrentía por saturación más alta que las áreas secas. Sin embargo, altos valores de TWI en laderas indica un potencial de <i>land slides</i> debido al mayor peso del substrato. Para este estudio el indicador fue usado para señalar las áreas con humedad y por lo tanto con condiciones de saturación potencial y escorrentía por exceso de saturación. Aplicado al área de estudio se aprecian las condiciones de amenaza localizadas a lo largo de los cursos de agua en Caldera. El índice indica zonas con probable escurrimiento superficial. La condición de amenaza es alta, más aún si se superponen los resultados del <i>Stream Power Index</i> .

las formas fluviales encontradas en las cuencas de las quebradas urbanas, dan cuenta de un paisaje muy dinámico y con una respuesta favorable de balance de disección positivo, asociado a la ocurrencia de eventos pluviométricos episódicos y El Niño. El paisaje de Caldera es de características hidro-geo-dinámicas, a pesar de estar inserto en el borde del desierto más árido del mundo: Se concluye en consecuencia lo siguiente:

- i) En el entorno adyacente a la ciudad de Caldera existen micro cuencas, modeladas en paisajes heredados, que presentan una dinámica actual de carácter torrencial, y que drenan las áreas de expansión urbana.
- ii) Existe una condición dinámica de carácter torrencial que ha condicionado el desarrollo de micro cuencas con cabeceras conformadas por sistemas de cárcavas,

junto a los escarpes de las terrazas marinas. El carácter torrencial queda evidenciado por el tipo de cárcava existente, a las que se asocian remociones en masa. La presencia de conos aluviales y de bancos incididos, son también evidencias de ello.

Desde el punto de vista evolutivo de las formas, los escarpes favorecen la generación y funcionamiento de cárcavas, las que se desarrollan a remontante, y a medida que son erosionadas tienden a confluír en sus partes basales, conformando cabeceras de micro cuencas. De esto se deduce que pueden desarrollarse más de estas formas bajas las actuales condiciones ambientales.

En las condiciones de litología otorgadas por las terrazas marinas de los Estratos de Caldera (coquinas impermeables) la dinámica de micro cuencas y quebradas intermitentes activadas por las particularidades climáticas y del fenómeno ENSO, la ciudad de Caldera y su área de expansión urbana se encuentran asentadas en áreas de amenaza natural a procesos de arroyada, inundaciones y flujos, no obstante localizarse en el desierto costero de Atacama.

REFERENCIAS

- ARAYA-VERGARA J.F. (1998) - *Clasificación morfológica de cárcavas de erosión*. In: *Geomorfología. Fundamentación basada en los Progresos de la Disciplina*. Departamento de Geografía, Universidad de Chile. Material Docente. Inédito.
- ARAYA-VERGARA J.F. (2008) - *Toward a morphotectonic model of the South-American coasts*. Revista Brasileira de Geografía (sometida).
- ARRIAGADA J. (2009) - *Geomorfología estuarial comparada en la zona semiárida de Chile. Casos de Copiapó y Choapa*. Tesis para optar al grado de Magister en Geografía, mención Recursos Territoriales. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile, Santiago. Inédito.
- CARDONA O.D. (2009) - *Teoría del Riesgos y Desastres*. En: *Gestión Integral de Riesgos y Desastres. Curso de Educación Superior*. Universidad Internacional de Florida. Inédito.
- CASTRO C., MARQUARDT C. & ZÚÑIGA A. (2010) - *Peligros naturales en geositos de interés patrimonial en la costa sur de Atacama*. Revista de Geografía Norte Grande, 45, 21-39.
- CASTRO C.P., SOTO M.V., FERNÁNDEZ R., MÁRKER M. & RODOLFI G. (2009) - *Impacto en la geodinámica actual del valle de Nantoco, cuenca del río Copiapó, asociado a la reconversión productiva*. Revista de Geografía Norte Grande, 2009, 42, 81-99.
- DANGEL F. (2009) - *Physisch-geographische Risikobewertung und Vulnerabilitätsanalyse im Einzugsgebiet des Río Copiapó*. Unpublished Diploma-Thesis, University of Tübingen.
- DUNAI T., GONZÁLEZ G. & JUEZ-LARRÉ J. (2005) - *Oligocene-Miocene age of aridity in the Atacama Desert revealed by dating erosion sensitive landforms*. Geology, 33(4), 321-324.
- FARIAS M., VARGAS G., TASSARA A., CARRETIER S., BAIZE S., MELNICK D. & BATAILLE K. (2010) - *Land-Level Changes Produced by the Mw 8.8 2010 Chilean Earthquake*. www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1192094/DC1.
- FALVEY M. & GARREAU R. (2009) - *Regional cooling of geophysical research a warming World: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical Routh America (1979-2006)*. Journal of Geophysical Research, 114, D04102.

- FARIAS M. & CASTRO C. (2008) - *Variabilidad de la temperatura superficial del mar, identificación de surgencias costeras y su relevancia en un área costera protegida del desierto de Atacama, Chile*. Revista de Geografía Norte Grande, 41, 49-61.
- GARREAUX R., ACEITUNO P., MUÑOZ R., ROJAS M. & MONTECINOS A. (2008) - *El clima de Chile está cambiando*. Comunicación del Proyecto ACT-19. Variabilidad climática en Chile: evaluación, interpretación y proyecciones. Departamento de Geografía, Universidad de Chile, Santiago.
- GODOY E., MARQUARDT C. & BLANCO C. (2003) - *Carta Geológica de Chile. Carta Caldera. Región de Atacama*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Geología Básica, 76, 1-38.
- HAUSER A. (1997) - *Aluviones del 18 de junio de 1991 en Antofagasta*. Sernameomin, Boletín 49, Santiago.
- HELMHOLTZ ASSOCIATION (2007) - *Risk Habitat Megacity*. In: *Proyecto Risk Habitat Megacity. ¿Sostenibilidad en Riesgo?* A Helmholtz Research Initiative, 2007-2013. Research Plan I. march 2007. Inédito.
- HOOKE J. (2003) - *River Leander behavior and instability: a framework for analysis*. Royal Geographical Society (with The Institute of British Geographers), 28, 238-253.
- HUTCHINSON M.F. (1989) - *A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits*. Journal Hydrology, 106, 211-232.
- JULIÁ C., MONTECINOS S. & MALDONADO A. (2008) - *Carctarpsíticas climáticas de la Región de Atacama*. In: *Libro Rojo de la Fauna Nativa y de los Sitios Prioritarios para su conservación: Región de Atacama*. F.A. Squeo, G. Arancio & J.R. Gutierrez (eds), Ediciones Universidad de La Serena, Chile, 3, 25-42.
- KLEINHANS M., SCHURMAN F., BAKX W. & MARKIES H. (2009) - *Meandering channel dynamics in highly cohesive sediment on an intertidal mud flat in the Westerschelde estuary, the Netherlands*. Geomorphology, 105, 261-276.
- MÄRKER M., MORETTI S. & RODOLFI G. (2001) - *Assessment of water erosion processes and dynamics in semi-arid regions of Southern Africa (kwazulu/Natal, RSA, and Swaziland) using the Erosion Response Units concept (ERU)*. Geografía Física e Dinámica Cuaternaria, 24, 71-83.
- MÄRKER M., CASTRO C.P., PELACANI S. & SOTO M.V. (2008) - *Assesment of degradation susceptibility in the Chacabuco province of central using a morphometric based response units approach*. Geografía Física e Dinámica Cuaternaria. 31, 47-53.
- MÄRKER M., PELACANI S. & SCHRÖDER B. (2011) - *A functional entity approach to predict soil erosion processes in a small Plio-Pleistocene Mediterranean catchment in Northern Chianti, Italy*. Geomorphology, 125, 530-540.
- MARQUARDT C., LAVENU A., PORTLIEB L., GODOY E. & COMTE D. (2004) - *Coastal neotectonics in southern central Andes: uplift and deformation of marine terraces in norther Chile (27° S)*. Tectonophysics, 394, 193-219.
- PASKOFF R., CUITIÑO L. & MANRÍQUEZ H. (2003) - *Origen de las arenas dunares de la región de Copiapó, desierto de Atacama, Chile*. Revista Geológica de Chile, 30(2), 355-361.
- PLANCHON O. & DARBOUX F. (2001) - *A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models*, Catena, 46, 159-176.
- QUEZADA J., GONZÁLEZ G., DUNAI T., JENSEN A. & JUEZ-LARRÉ J. (2007) - *Alzamiento litoral pleistocénico del norte de Chile. Edades 21NE de la terraza costera más alta del área de Caldera-Bahía Inglesa*. Revista Geológica de Chile, 34(1), 81-96.
- SCHUMM S.A. & LYCHTY R.W. (1965) - *Time, space, and causality in geomorphology*. American Journal of Science, 263, 110-119.
- SCHUMM S.A. (1977) - *The fluvial system*. John Wiley & Son, New York.
- SOTO M.V. (1991) - *Caractizacão morfosedimentológica do micro leque deltaico da Baía Esperanca, Península Fildes, Ilha Rei Jorge, Sbetland do Sul. Antártica*. Tesis para optar al grado de Magister en Geociencias, mención Geología Marina. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil. Inédito.
- SOTO M.V., CASTRO C.P., RODOLFI G., MÄRKER M., FERNANDEZ R., PADILLA R. & RUGIERO V (2007) - *Carta geomorfológica de la sección central y occidental de la Región Metropolitana de Santiago*. Informaciones Geográficas, 39, 91-104.
- SUMMERFIELD M. (2005) - *A tale of two scales, or the two geomorphologies*. Royal Geographical Society (with The Institute of British Geographers). 30, 402-415.
- TARBOTON D.G. (1997) - *A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid Digital Elevation Models*. Water Resources Research 33, 309-319.
- TRICART J. (1960) - *Los tipos de lechos fluviales*. Revista Geográfica Universidad de Los Andes, Mérida, 2, 5-6.
- VARGAS G., ORTLIEB L. & RUTLAND J. (2000) - *Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur*. Revista Geologica de Chile, 27(2), 385-394.
- VICUÑA S., GARREAU R. & MCPHEE J. (2010) - *Climate changes impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile*. Climatic Change. DOI 10.1007/s10584-010-9888-4.
- WILSON J.P. & GALLANT J.C. (2000) - *Digital terrain analysis*. In: J.P. Wilson & J.C. Gallant (Eds.), «Terrain Analysis. Principles and Applications». Wiley, New York.
- ZEVENBERGEN L.W. & HORNE C.R. (1987) - *Quantitative Analysis of Land Surface Topography*. Earth Surface Processes Landforms, 12, 47-56.

(Ms. received 30 July 2011; accepted 30 March 2012)