Mecanismos del proceso de desertificación en el valle de Santa María, provincia de Tucumán (Argentina)

Collantes, Mirian M.; Leila M. González
Instituto de Geociencias y Medio Ambiente (INGEMA), Facultad de Ciencias Naturales e Inst. M. Lillo, Universidad Nacional de Tucumán (UNT). mcollantes@arnet.com.ar, leilamarina2003@yahoo.com.ar

➤ **Resumen** — La desertificación constituye el mayor desafío ambiental que enfrentan las regiones secas, principalmente con relación a su potencial productivo. Se define como "la degradación de las tierras en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, como resultado de diversos factores, incluyendo las variaciones climáticas y las actividades humanas" (UNCCD, 1994). En tal sentido, el valle de Santa María, ubicado en los cuadrantes suroccidental de la provincia de Salta, noroccidental de la provincia de Tucumán y nororiental de la provincia de Catamarca, presenta un severo cuadro de deterioro de las tierras, con un sistema antrópico-ambiental altamente degradado, destacándose entre los factores causales, la heterogeneidad del relieve, un clima árido-semiárido estacionalmente contrastado (con déficit hídrico permanente y un régimen de precipitaciones estacional), materiales superficiales altamente susceptibles a la remoción por el viento y el agua, pérdida o acentuada disminución de la cobertura vegetal (representada por dos ecosistemas de características áridas, correspondientes a las provincias fitogeográficas del Monte y la Prepuna), a causa del desmonte o actividades extractivas diversas, sobrepastoreo y manejo incorrecto del suelo y el agua a lo largo de varias centurias.

Teniendo en cuenta este contexto geoambiental y antropogénico, en este artículo se analiza la influencia de la variabilidad climática actual y pasada y de la cobertura vegetal, como factores de desertificación. Se estudian los procesos geomorfológicos vinculados al mecanismo de la desertificación, tales como erosión hídrica, salinización de suelos, erosión y sedimentación eólica, pedregosidad (pavimento), etc. y su influencia en la heterogeneidad espacial de la vegetación y los suelos.

Palabras clave: Desertificación, procesos geomorfológicos, vulnerabilidad ambiental, variabilidad climática.

➤ **Abstract** — "Mechanisms of the Desertification Process in the Santa María Valley, Tucumán Province (Argentina)". Desertification is the greatest environmental challenge facing dry regions, mainly in relation to their productive potential. It is defined as "land degradation in arid, semiarid and dry sub-humid zones as a result of various factors, including climatic variations and human activities" (UNCCD, 1994).

In this regard, the Santa Maria valley, located in the north-western quadrant of the province of Tucumán and north-eastern of Catamarca, presents a severe picture of land deterioration, with a highly degraded antropic-environmental system, the main causal factors being the heterogeneity of the relief, an arid-semiarid seasonal contrast (with permanent hidric deficit and seasonal rainfall), surface materials highly susceptible to removal by wind and water, loss or marked decrease in vegetation cover (represented by two ecosystems of arid characteristics, Monte and Prepuna), because of cutting or diverse extractive activities, overgrazing and improper management of soil and water, throughout several centuries.

Considering this geoenvironmental and anthropogenic context, this article analyzes the influence of current and past climate variability and cover of vegetation, as factors of desertification. We study the processes linked to the geomorphological mechanism of desertification, such as water erosion, salinization of soils, wind erosion and sedimentation, stoniness (pavement), etc. and its influence in the spatial heterogeneity of vegetation and soil.

Keywords: Desertification, geomorphological processes, environmental vulnerability, climatic variability.

Recibido: 23/03/12 – Aceptado: 04/05/12

INTRODUCCIÓN

El valle de Santa María presenta un severo cuadro de deterioro de las tierras, con un sistema antrópico-ambiental altamente degradado, destacándose entre los factores causales, un clima árido-semiárido estacionalmente contrastado, materiales superficiales altamente susceptibles a la remoción por el viento y el agua, pérdida o acentuada disminución de la cobertura vegetal autóctona a causa del desmonte o actividades extractivas diversas, sobrepastoreo y manejo incorrecto del suelo y el agua a lo largo de varias centurias (Collantes *et al*. 2007; Sayago, 1992). Además de la ocupación en épocas prehispánicas, con el arribo de la colonización, el valle fue sometido a una mayor presión, a partir de la implementación de nuevos modelos de explotación del ambiente y de innovaciones tecnológicas, a lo que se sumó el desconocimiento del funcionamiento de las variables ambientales de dicho ecosistema y una explotación permanente y continua de los recursos (Maggi y Navone, 2011).

Cabe destacar que las crónicas de los primeros españoles que ocuparon los valles áridos del noroeste, demuestran cómo fue el proceso de explotación y degradación de los recursos en la región (Niz, 2003).

Así, el valle se encuentra sometido a un acelerado proceso de desertificación, que en este trabajo se define como "la degradación de las tierras en zonas áridas, semiáridas y sub-húmedas secas, como resultado de diversos factores, incluyendo las variaciones climáticas y las actividades humanas", de acuerdo a la Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación. Este proceso ha sido descripto por las Naciones Unidas como uno de los aspectos del cambio climático global más importantes a los que se enfrentan estas regiones, principalmente con relación a su potencial productivo, incluyendo condicionantes humanos y ambientales (UNCCD, 1994). Naciones Unidas expresa además, que la degradación de las áreas secas amenaza las condiciones de vida de más de 900 millones de personas en más de 100 países; el proceso está afectando por arriba del 25% del área de la tierra y a un índice acelerado, a nivel global. Se asocia asimismo, a la pérdida general de productividad de los ecosistemas afectados, impactando en las actividades humanas, limitando la capacidad de sustentación, reduciendo la rentabilidad y deteriorando la calidad de vida de la población.

Por otra parte, si bien existe consenso en que las causas de la desertificación se deben a variaciones climáticas y a las actividades humanas, independientemente de ello, ésta es considerada como un riesgo geomorfológico distinto, debido a su impacto en el relieve y en los procesos geomorfológicos (Alcantara Ayala y Goudie, 2010).

Desde el punto de vista de los factores antropogénicos, los mecanismos adjudicados a la mala gestión por parte del hombre en el uso de los recursos naturales, que conducen a la desertificación, incluyen: a) la sobre explotación, en la que el suelo se agota por pérdida de nutrientes, reduciendo o eliminando la cobertura vegetal, lo que favorece la erosión, b) la tala excesiva de la vegetación autóctona, c) la aplicación de técnicas agrícolas o de labranza rudimentarias o poco adecuadas, d) el sobrepastoreo de animales domésticos, e) el mal manejo del agua, principalmente para irrigación, lo cual induce la salinización de los suelos, proceso que a su vez influye negativamente en su rendimiento e inhibe el desarrollo de la vegetación.

De acuerdo con Reynolds *et al*. (2007), los ecosistemas de las áreas secas (zonas áridas, semiáridas y subhúmedas) poseen un frágil equilibrio y son muy sensibles a la degradación; sus diversas variables ecológicas y sociales determinan la existencia de múltiples umbrales y un cambio en uno de ellos puede disparar cambios en los otros. Por lo tanto, es imprescindible el conocimiento de estas variables ambientales y sus respectivos umbrales a nivel local o regional, aspecto que normalmente no es tenido en cuenta; su conocimiento e interrelación permite definir "síndromes de degradación", que resultan de la combinación de variables específicas para cada región.

En regiones como el área de estudio, la variabilidad climática estacional y multianual actual y las oscilaciones ocurridas durante el Holoceno, sumadas a la presión antrópica durante varias centurias (vinculada fundamentalmente al uso excesivo de la tierra), ha generado una larga cadena de procesos de desertificación, que condujeron a la destrucción de la capacidad de regeneración de la cubierta vegetal necesaria o suficiente para proteger la superficie del suelo de la erosión, produciendo una "metamorfosis" en el primitivo paisaje, restringido en la actualidad a un estrato arbustivo esparcido y monótono, rodeado por suelos altamente degradados, con escasos árboles en áreas con alguna disponibilidad de humedad (Collantes *et al.* 2007; Collantes y Niz, 2009; Collantes *et al.* 2011).

En este contexto geoambiental y antropogénico, se desarrollan procesos geomorfológicos tales como erosión hídrica (laminar, surcos y cárcavas), erosión y sedimentación eólica, pedregosidad (pavimento), formación de badlands, formación o reactivación de dunas, salinización y encostramiento de suelos, remoción y transporte de sedimentos hacia los cauces. Su alta susceptibilidad a la erosión eólica (deflación) y el acelerado proceso de acumulación, principalmente durante la estación seca, permitieron el desarrollo de campos dunarios, en parte estabilizados y en parte activos, claramente visibles en ambas márgenes de la llanura de inundación del río Santa María. Por otra parte, la retroalimentación entre erosión hídrica y eólica ha potenciado el impacto de las precipitaciones sobre el paisaje, contribuyendo prácticamente a la desaparición del primitivo suelo, el cual sólo se conserva como un suelo enterrado remanente, en los pedestales que soportan la vegetación actual, espacialmente heterogénea.

Como un factor adicional aparece la perspectiva de los cambios climáticos globales, cuyos efectos sobre la dinámica hidrológica, edáfica y de la vegetación de los ecosistemas productivos regionales y la población, no pueden dejar de ser considerados. En tal sentido, surge entonces el interrogante sobre cuál será la respuesta del paisaje a dichos cambios, los cuales ya comenzaron a manifestarse. Así, la identificación de indicadores de procesos biofísicos es de gran importancia como paso previo para determinar umbrales de degradación y posibilidades de recuperación de las áreas desertificadas. Reynolds *et al.* (2005) expresan que las consecuencias biofísicas de la desertificación difieren en las diferentes regiones en función de: a) intensidad y número de factores causales involucrados, b) extensión del área afectada, c) dimensión temporal de la degradación. Expresan asimismo, que su estudio debe ser realizado desde una perspectiva espacio-temporal e interdisciplinaria, incluyendo aspectos climáticos, ecológicos, sociales y económicos, es decir, estudios que permitan establecer la relación entre sistemas biofísicos y socioeconómicos.

Se impone entonces el análisis dinámico e integrado de los factores causales y mecanismos generadores de los cambios ambientales producidos en el área propuesta para su estudio. A partir del concepto de que clima y relieve constituyen los factores independientes del paisaje del cual dependen los restantes factores, como escurrimiento superficial y subsuperficial, evolución del suelo, cobertura vegetal, etc. (Sayago, 1982), el presente estudio, tiene como objetivo analizar los mecanismos de la desertificación en el valle de Santa María (sector tucumano), ya sea que deriven de ésta o que contribuyan a su acentuación. Desde esta perspectiva, se tienen en cuenta aspectos vinculados a las características climáticas, el dinamismo de la cobertura vegetal y las consecuencias geomorfológicas del proceso de degradación del paisaje.

Características del área de estudio

El valle de Santa María se extiende desde el cuadrante suroccidental de la provincia de Salta, hasta el cuadrante nororiental de la provincia de Catamarca (Argentina) y forma parte del denominado "Valle Calchaquí". En este estudio, se pone énfasis en el sector del valle localizado en la provincia de Tucumán (Figura 1). Constituye una depresión tectóni-

ca ubicada en sentido norte-sur, limitado al este por las sierras de Aconquija y Cumbres Calchaquíes y al oeste por la Sierra Quilmes o del Cajón, con una altitud promedio de 1800 msnm. Posee un clima árido-semiárido, con déficit hídrico permanente y un régimen de precipitaciones altamente estacional, con aproximadamente entre 200 y 300 mm anuales. Las precipitaciones decrecen hacia el oeste (ladera oriental de la Sierra de Quilmes), hasta alcanzar 150 mm, registrándose el mayor porcentaje de lluvias entre octubre y abril, con un déficit hídrico elevado, de aproximadamente 500 mm anuales (Tineo, 2005).

Este régimen de precipitaciones altamente influidas por el anticiclón del atlántico, es uno de los determinantes de las características de la vegetación y el escurrimiento superficial y tiene un gran impacto en la erosión de suelos.

La vegetación está representada por la estepa arbustiva de las provincias fitogeográficas del Monte (fondo de valle y piedemontes) y de la Prepuna (laderas) (Perea, 1995, 1997). Así, pueden encontrarse: especies arbóreas, como algarrobos (*Prosopis alba* y *Prosopis nigra*), churquis, (*Acacia caven*) arcas (*Acacia visco*), chañares (*Geoffroea decorticans*); breas (*Cercidium praecox*). Arbustos como *Bulnesia sp.*; *Monthea aphylla*, jarillales de *Larrea cuneifolia* y *Larrea divaricata*. Cactáceas como los cardones (*Trichocereus atacamensis*); *Opuntia sulphuria.* Especies de zonas inundadas o ribereñas, como pajonales formados por totoras (*Typha latifolia*) y juncales (*Juncus sp.)*.

METODOLOGÍA

El estudio está basado en diferentes tipos de información colectada en el terreno y en

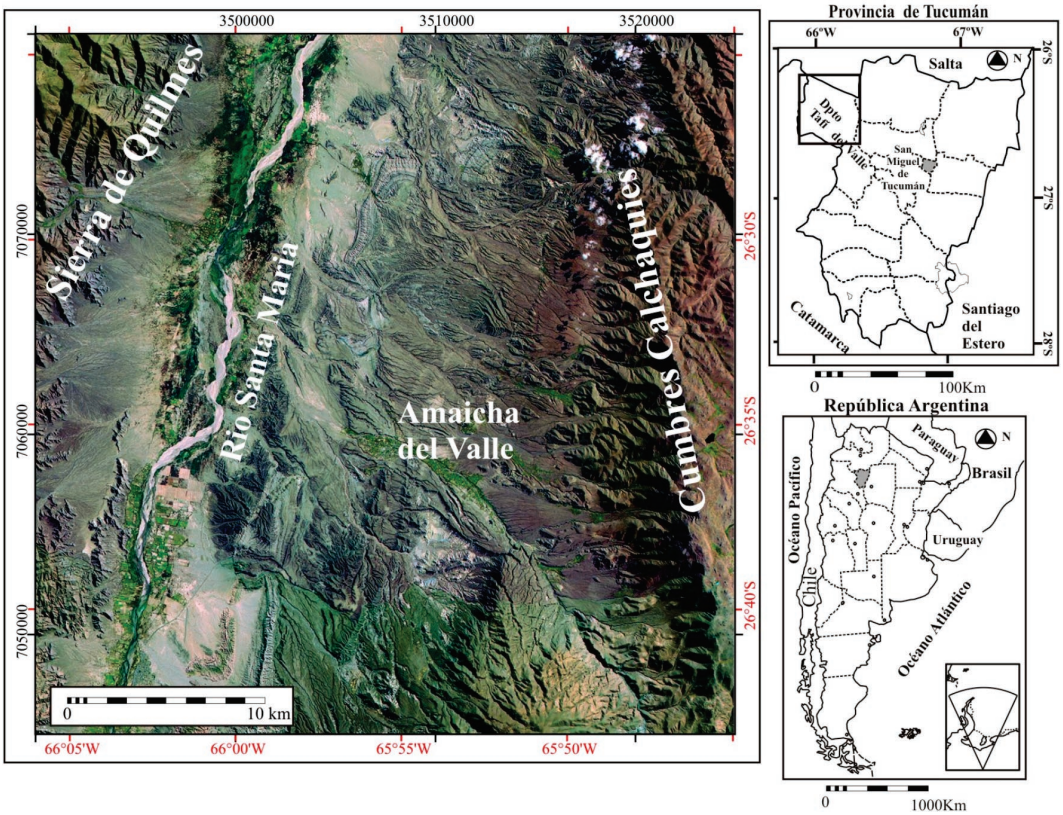


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

laboratorio. Para la evaluación de la variabilidad climática ocurrida durante el Holoceno, se tuvieron en cuenta estudios preexistentes efectuados sobre el "barniz de las rocas", más conocido como "barniz del desierto", realizados en el ámbito del valle de Santa María, dada su importancia como indicador de la variabilidad climática ocurrida en la región, principalmente durante el mencionado periodo (Collantes y Somonte, 2007; Somonte y Collantes, 2007; Somonte, 2009).

Con respecto a la variabilidad climática actual, se analizó la información aportada por Labraga y Villalba (2009) y Maggi y Navone (2011), ya que posee estrecha relación temática con este estudio. Es decir, se toma en consideración la información climática relevante para estudios geomorfológicos específicos, como es el proceso de desertificación. Por otra parte, como es sabido, es altamente dificultoso contar con registros meteorológicos continuos y actualizados de la región, razón por la cual se tuvo en cuenta además, la información climática del área de estudio aportada por Bianchi y Yañes (1992), Tineo *et al.* (1998) y Tineo (2005).

Por otra parte, las observaciones de campo efectuadas en diferentes periodos del año, permitieron identificar y analizar la dinámica de los procesos geomorfológicos predominantes, causantes y/o resultantes del proceso de desertificación.

Se obtuvieron datos de cobertura vegetal durante la estación húmeda y durante la estación seca (durante dos años consecutivos), a través de una toposecuencia que incluye las principales unidades de relieve: Ladera (alta y baja), Piedemonte superior, Piedemonte inferior y Valle fluvial (incluyendo Terrazas y Llanura de inundación). Para tales mediciones, se siguieron los criterios establecidos para el cálculo del factor "C" de la USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, Wischemeir y Smith, 1978).

Se efectuó el estudio de los pedestales, que soportan la vegetación arbustiva, teniendo en cuenta su importancia como indicadores de desertificación, tanto desde el punto de vista de su composición edáfica como de su distribución, patrones y/o relaciones espaciales, con el propósito de establecer preliminarmente si su distribución refleja oscilaciones climáticas, degradación provocada por la actividad humana o la influencia de procesos geomorfológicos. Cabe tener en cuenta lo expresado por Tongway *et al.* (2004), con relación a que la heterogeneidad espacial de la vegetación y de las condiciones ambientales, es una de las principales características de regiones áridas y semiáridas. Se tiene en cuenta además, una datación cronológica de los depósitos asociados a un pedestal, con el propósito de determinar la edad aproximada de éstos, como un indicador de los inicios del proceso de degradación de los suelos en el valle.

Las características edáficas también se reflejan a partir de datos de salinidad-sodicidad determinados en los perfiles (descripciones de suelos), estudiadas en las mencionadas unidades geomorfológicas (González *et al.* 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La variabilidad climática como factor de desertificación

En regiones como el área de estudio, en donde los procesos ambientales tienen un alto dinamismo, tanto desde el punto de vista espacial como temporal, interpretar la interrelación entre variabilidad climática actual y pasada y la evolución de la desertificación, permite entender con cierta aproximación, no solo su efecto sobre la dinámica de los procesos geomorfológicos, sino también sobre aquellos ecológicos e hidrológicos y además el impacto que podría tener el cambio climático, que ya ha comenzado a manifestarse.

La precipitación media anual para esta región es menor que 400 mm, altamente estacional; solo un 20 % ocurre durante el invierno. El ecosistema está adaptado a estas condiciones, principalmente la vegetación, la cual presenta en algunos sectores, cambios significativos entre una estación y otra, reflejándose esto no solo en las mediciones realizadas a campo, sino también en la fisonomía paisajística del lugar.

A pesar de la importancia de la vegetación y de las propiedades de los suelos, las precipitaciones tienen una influencia dominante en la generación de procesos erosivos, principalmente durante la estación húmeda. Si ocurre un aumento inusual de lluvias, la actividad de estos procesos es mayor aún, que frente a condiciones normales. Es decir, por ejemplo, el aumento de precipitaciones ocurridas en estos últimos años (Labraga y Villalba 2009), si bien puede favorecer en parte el desarrollo de la vegetación, produce un incremento de los procesos erosivos. Según Schlesinger *et al.* (1990), en ambientes desertificados es mayor el impacto sobre los procesos del ecosistema de los eventos episódicos, como lluvias o tormentas torrenciales y tormentas de polvo. Por ejemplo, aumentan los mecanismos de meteorización, el escurrimiento y el transporte de materiales en suspensión hacia los cauces de los ríos.

Es decir, el impacto de la variabilidad climática en el área estudiada está muy lejos de ser simple, porque éste no sólo depende de parámetros tales como precipitaciones y temperaturas, sino también de factores extrínsecos al clima, como son el tipo de manejo de las tierras, propiedades edáficas y variación espacial de los suelos, características topográficas, dinámica geomorfológica e historia ocupacional del valle.

Una herramienta que se ha utilizando en el área de estudio, para determinar las variaciones climáticas pasadas, es el barniz de las rocas (Collantes y Somonte, 2007; Somonte y Collantes, 2007; Somonte, 2009). Éste, también conocido como "barniz del desierto", es una película fina (pátina) de tonos oscuros que recubre las rocas/clastos expuestos en la superficie como resultado de procesos sedimentarios y geomorfológicos. Sus características químicas y morfológicas han permitido su utilización como indicador de eventos paleoclimáticos, paleoambientales y arqueológicos (Oberlander, 1994). Teniendo en cuenta las diferentes hipótesis existentes acerca de su génesis, Somonte y Collantes (2007), expresan que:

– se forma en diferentes ambientes morfoclimáticos, si bien es más frecuente bajo condiciones áridas y semiáridas;

– puede ser de diferentes tipos desde el punto de vista geoquímico;

– es el resultado de procesos físico-químicos acrecionales y de diferentes tipos de meteorización;

– su composición química no guarda relación alguna con el sustrato rocoso o material sobre el cual se desarrolla;

– su desarrollo requiere condiciones de estabilidad morfogenética y morfotectónica.

Teniendo en cuenta el resultado de dataciones por VML (varnish microlamination) efectuadas sobre muestras de clastos barnizados de la localidad de Amaicha del Valle, Somonte (2009) determina que la formación de la microestratigrafía de esta pátina (alternancia de capas oscuras ricas en Mn y Ba y capas anaranjadas y amarillas ricas en Si y Al), está fuertemente influenciada por variaciones climáticas regionales. En este contexto, el estudio del barniz permitió determinar con cierta precisión la variabilidad climática ocurrida en el área de estudio durante el Holoceno y principalmente en tiempos históricos, con miras a tratar de interpretar su influencia (o no) en los procesos de desertificación y por lo tanto, su impacto sobre el ecosistema. Tal como se observa en la Tabla 1, a través de esta técnica se detectaron ocho eventos húmedos durante el Holoceno, entre 7300 AP y 300 AP.

Teniendo en cuenta esta información, el último evento húmedo que habría dado lugar a la formación de microláminas de bar-

Tabla 1. Dataciones de los eventos húmedos de la microlaminación del barniz de las rocas de Amaicha del Valle (tomado de Somonte, 2009).

Eventos húmedos	Datación años AP
WH7+	6500-7300
WH6+	5900-6500
WH6	5900
WH5	4100
WH4	2800
WH3	1400
WH2	1100-900
WH1	650-300

niz, se produjo entre 650 AP y 300 AP. Dicho evento cobra gran importancia con relación a la variabilidad climática en el valle de Santa María, debido a que se corresponde con el desarrollo de un paleosuelo (A-C o A/AC-C), detectado en los estudios de suelos efectuados en "pedestales", que arrojó una edad de 435 ± 15 AP, obtenida mediante AMS (Acelerador de Partículas) (Collantes *et al.* 2011). Este paleosuelo constituye un indicador de un evento húmedo, que habría dado lugar a la formación de un suelo de moderado desarrollo que cubría gran parte del valle y que fue removido por procesos erosivos, quedando en la actualidad solo conservado en los pedestales.

El factor cobertura vegetal y los procesos de desertificación

La génesis y dinamismo de la heterogeneidad espacial de la cubierta vegetal en áreas desertificadas es aún motivo de controversia. Tongway *et al.* (2004) expresan que dicha heterogeneidad puede deberse a diferentes causas: fragmentación de una cubierta vegetal continua preexistente debido a actividades humanas, el resultado de oscilaciones climáticas ocurridas en el pasado (Holoceno principalmente), impacto de las precipitaciones o la acción de procesos geomorfológicos.

Como se dijo anteriormente, la vegetación en el valle de Santa María es una mezcla de parches de especies leñosas, arbóreas y arbustivas (más abundantes), con estratos herbáceos (predominando especies anuales especialmente en la estación húmeda). Con relación a este factor, Collantes *et al.* (2007) determinaron los siguientes indicadores bióticos de desertificación en el área de estudio: disminución de la cobertura vegetal, cambios en la composición de las especies, pérdida de biodiversidad, cambios en el patrón de distribución de los recursos vegetales, vegetación en pedestal, reducción de la capacidad de recuperación del ecosistema y stress fisiológico. Estos cambios en la vegetación no solo potencian la erosión de los suelos, sino que impactan en las propiedades edáficas necesarias para la producción de materia orgánica, a través de la descomposición de hojas, raíces, etc.; por otra parte, al modificarse el espesor del suelo (principalmente del horizonte superficial), cambia la porosidad y consecuentemente los procesos hidrológicos que favorecen el desarrollo de la vegetación (Mulligan 1998).

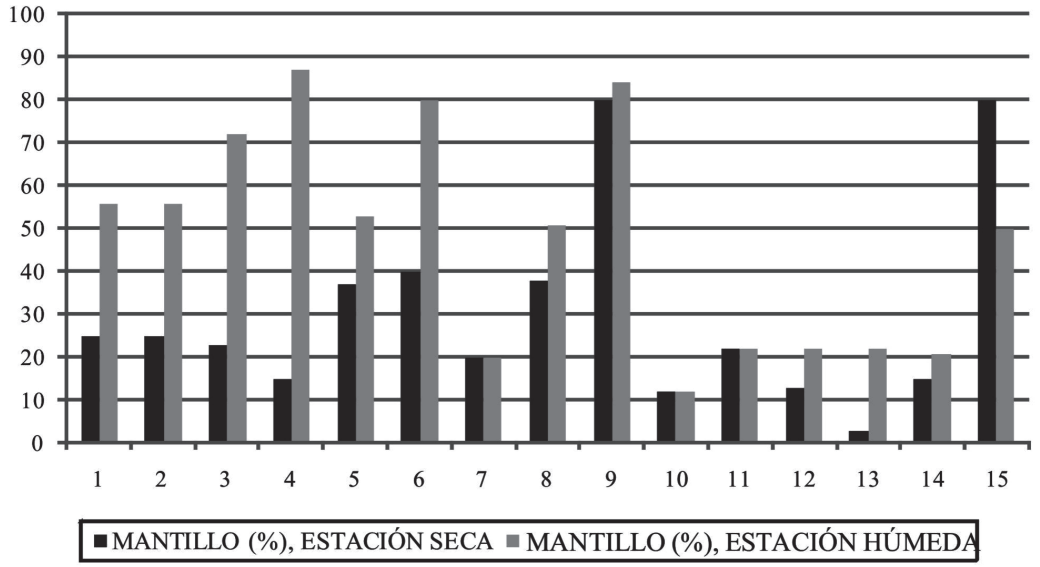
Entre los pedestales que contienen principalmente a la vegetación arbustiva, el horizonte "A" ha sido erosionado, mayormente por erosión hídrica (una combinación del impacto de la gota de lluvia y erosión laminar o mantiforme) y erosión eólica, originando en algunos casos vías de escurrimiento (surcos o cauces efímeros) y en otros una cobertura pedregosa de clastos o pavimento. Debido a que la infiltración es mayor en los pedestales que entre ellos, los flujos mantiformes (overland flow) son generados preferentemente entre éstos, concentrándose aguas abajo (siguiendo las pendientes) en surcos de escurrimiento bien definidos.

De acuerdo a las mediciones que se realizaron (cálculo del factor "C" y controles en el terreno), la superficie de los glacis, por ejemplo, presenta aproximadamente un 50% de cobertura vegetal, caracterizada por arbustos en pedestales (principalmente *Larrea sp.*). Éstos poseen un ancho promedio que puede variar entre 1,20 y 2,10 mts, con una separación entre ellos de entre 1,65 y 2,55 mts., aproximadamente. El suelo desnudo, ya sea entre los pedestales o no, presenta entre un 90-95% de cobertura de clastos.

Siguiendo los criterios para determinar el Factor "C" de la USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo), se efectuaron mediciones de cobertura de mantillo (mulch) y canopia en las unidades de relieve. Su estudio es importante, ya que la canopia y la cobertura vegetal en general, son responsables de la interceptación y el decrecimiento de la energía de impacto de la gota de la lluvia; mientras que el mantillo promueve la infiltración en el suelo y reduce la velocidad de los flujos laminares y su presión hidráulica, disminuyendo la erosión potencial.

Analizando la comparación entre el comportamiento de la vegetación, para ambas estaciones (Figura 2), seca y húmeda, la co-

bertura promedio de mantillo muestra diferencias significativas para el periodo considerado (dos años consecutivos). Aumenta considerablemente durante la estación húmeda (Figura 3b), prácticamente en todas las unidades de relieve, excepto en las áreas de piedemonte (apical y distal), lo cual favorece el desarrollo de procesos erosivos, principalmente por acción de la escorrentía. También, las mediciones reflejan un aumento de la cobertura de mantillo (mulch), siempre durante la estación húmeda, en las terrazas fluviales. Opuestamente, la cobertura de mantillo disminuye en la llanura de inundación, unidad



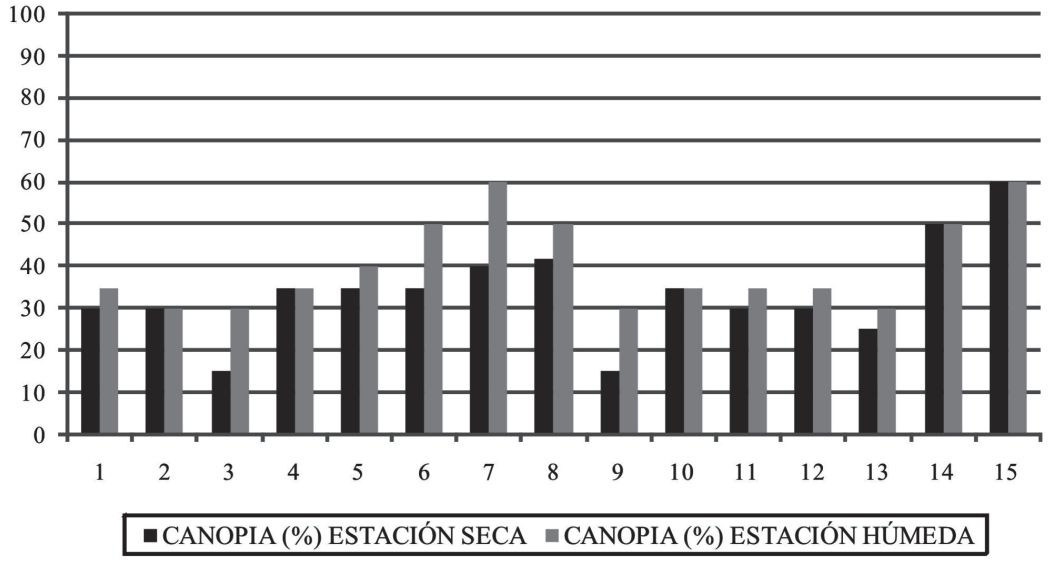


Figura 2: Relaciones de cobertura (mantillo y canopia), determinados para ambas estaciones, húmeda y seca: 1-2-3, Ladera alta; 4-5, Ladera baja; 6-7-8, Piedemonte apical; 9-10-11, Piedemonte distal; 12-13-14: terrazas (alta y baja); 15: llanura de inundación.

que es completamente cubierta por pastizales y vegetación típica de áreas anegadas. En la estación seca, en tanto, los procesos de evapotranspiración y, consecuentemente, la sequía de estos pastizales, unido a la depositación de sales en superficie, generan una cobertura de residuos compuesta por raíces y hojarasca en diferentes grados de descomposición. Como dato adicional, la presencia de residuos (mantillo) durante la estación seca, puede ser un indicador de la disponibilidad de materia orgánica superficial para la descomposición y reciclaje de nutrientes (Tongway *et al*. 2004).

El estudio de la canopia adquiere relevancia en regiones secas y principalmente en aquellas con algún grado de desertificación, por cuanto juega un rol importante en la regulación de los procesos hidrológicos y en los cambios en las propiedades de los suelos, disminuyendo la energía de la lluvia y por lo tanto su poder erosivo, los procesos de compactación y encostramiento del suelo. Vásquez Méndez *et al*. (2010), a través de estudios efectuados en regiones semiáridas, han demostrado que existe una relación inversa entre el aumento del escurrimiento y el área cubierta o protegida por canopia. Este resultado es indicativo de la importancia de la cobertura de canopia en la regulación de procesos de escurrimiento y en consecuencia, en la disminución de pérdida de suelo. Asimismo, Schlesinger *et al.* (1990) expresan que la canopia de los arbustos genera islas de fertilidad debajo de ella, las cuales se transforman en sitios favorables para su regeneración, proliferación y persistencia, limitando la posibilidad de recuperación de la vegetación primitiva (generalmente pastizales), que fuera suplantada por los arbustos.

En el área de estudio, los valores de canopia dentro de cada unidad de relieve (Figura 2) no presentan en general variaciones considerables entre una estación y otra. Solo se observa algún aumento, en las áreas pedemontanas y en las terrazas. No obstante, a pesar de que la canopia puede ser más alta durante la estación húmeda en algunos sectores (principalmente en las áreas con cobertura de arbustos, más que en aquellas con otro tipo de cobertura, como ser pastizales), su distribución irregular genera superficies desprovistas de cobertura, siendo estas áreas más susceptibles al impacto de la gota de lluvia, con un aumento de la erosión o remoción del suelo y el consecuente transporte de sedimentos.

Por otra parte, cuando hay dominancia de arbustos, se incrementa la heterogeneidad en las propiedades de los suelos, debido a que la infiltración efectiva de la lluvia está confinada a las áreas debajo de la canopia de éstos, mientras que en los espacios entre ellos, se generan flujos mantiformes, que contribuyen a la pérdida de suelos y de nutrientes.

Desertificación y procesos geomorfológicos

Erosión hídrica. — Como ya se expresara, las precipitaciones son uno de los determinantes de las características de la vegetación y el escurrimiento superficial y tienen un gran impacto, principalmente en la erosión de suelos. Sabemos que la erosión es una función de la erosividad de la lluvia (expresada por la intensidad y la energía de cada tormenta; Wischmeier y Smith, 1978) y de la erodabilidad de los suelos. En tal sentido, Reynolds *et al* (2005) expresan que muchas zonas secas tienen bajos contenidos de materia orgánica y una baja estabilidad estructural; tanto la labranza como el pastoreo de animales domésticos tienen impactos significativos en el corto plazo, de modo que estas regiones son muy sensibles a la degradación, con profundas implicaciones sociales y económicas.

En el área de estudio, los flujos hídricos tienen un patrón temporal restringido a la estación húmeda. Cuando la vegetación no se repone, durante la estación húmeda se desarrolla la erosión laminar o mantiforme (overland flow). Este proceso de escorrentía superficial transporta restos orgánicos, nutrientes disueltos y sedimentos, que van deteriorando la estabilidad estructural de los suelos y acrecentando su heterogeneidad espacial.

La presencia de un suelo remanente en los pedestales (paleosuelo), demuestra que la conversión de áreas cubiertas por árboles o

pastizales, en áreas con arbustos ha sido acompañada por desarrollo de surcos y cárcavas de erosión, formación de pavimento o pedregosidad y por lo tanto, por pérdida del horizonte productivo. Los materiales finos acumulados debajo de los arbustos podrían comportarse como islas de fertilidad caracterizadas por una mayor infiltración, concentración de materia orgánica (restos de plantas y excrementos) y alto nivel de nutrientes. Los arbustos son de fácil regeneración en los pedestales, pero es difícil el crecimiento de plantas entre ellos. En consecuencia hay un aumento de la heterogeneidad espacial en la provisión de humedad y en el recurso suelo lo cual es considerado como característico del proceso de desertificación en regiones áridas-semiáridas (Figura 3).

Abrahams *et al.* (1995) atribuyen los procesos de erosión de las áreas con vegetación arbustiva, en ambientes desertificados, a tres factores:

– aumento de flujos mantiformes y más rápidos que en áreas cubiertas por otros tipos de vegetación, como pastizales;

– escasa protección al impacto de la gota de lluvia en el suelo desnudo, entre los pedestales;

– los suelos de los arbustos son más susceptibles a la acción de heladas en la época invernal.

Como resultado de ello, el desarrollo de pedestales está siempre acompañado por la decapitación del horizonte "A", desarrollo de surcos y cárcavas de erosión y formación de pavimento, situación presente en el área de estudio.

Por otra parte, en aquellas áreas bajas en las cuales se produce la concentración de flujos hídricos durante la estación seca, al ser sometidas a una intensa evapotranspiración, se desarrollan encostramientos y grietas de desecación, principalmente en materiales de grano fino. Su formación aumenta la disponibilidad de material para la erosión hídrica y eólica.

Salinización.— La salinización o acumulación de sales en el suelo, ha sido descripta como el aspecto más crítico de la degradación de tierras secas, "el estado último del cual es difícil volver". Este proceso es especialmente serio en regiones áridas y semiáridas, en donde la evaporación potencial excede la cantidad de agua infiltrada, aportada por las lluvias, produciendo en consecuencia la acumulación de sales cerca de la superficie del suelo (Mainguet, 1999, citado por Alcantara Ayala y Goudie, 2010). En general, pueden haber dos clases de sales afectando los suelos de regiones secas:

– sales neutras, mayormente clorídicas y sulfatos (de sodio, magnesio o calcio), que inhiben el crecimiento de las plantas;

– sales alcalinas (de sodio y carbonato), que producen un deterioro de la estructura del suelo, debido a la dispersión de partículas de arcilla, cuyo efecto es la alcalinización o sodificación. Los suelos sódicos tienen una baja permeabilidad al agua y el aire, un pH alto, consecuentemente reducen la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Alcantara Ayala y Goudie, 2010).

De acuerdo con González *et al.* (2011), la unidad de relieve correspondiente al valle fluvial del río Santa María (terraza alta, terraza baja y llanura de inundación estacional), presenta graves problemas de salinidad-sodicidad que limitan su aptitud para la agricultura, especialmente en las terrazas alta y baja. La Terraza alta está caracterizada, desde el punto de vista edáfico, por un Torrifluvent, con baja salinidad en superficie 1.61dS/m que se eleva a 10.4dS/m a los 50 cm, mientras el pH baja de 8.96 en superficie a 7.75 en profundidad, el RAS (Relación de Absorción de Sodio) baja de 15.7 a 7.3, siempre con una fuerte presencia de Na.

En la Terraza baja no cultivada, que generalmente presenta anegamiento durante la estación húmeda, por sus características topográficas o por los desbordes de la llanura de inundación en años muy húmedos, la salinidad refleja la dinámica hidrogeomorfológica estacional. Ésta fluctúa entre 7.66 dS/m en superficie, pasando a 37.5 dS/ms a los 50 cm y 14,4 en profundidad. El RAS es de 14.8 en superficie, 37,5 en los horizontes subsuperficiales y 14.4 en profundidad, reflejando condiciones salino-sódicas. Se trata de

un Natrustol fuertemente degradado por deforestación y sobrepastoreo (Figura 4a).

En la Terraza baja cultivada, es evidente la influencia de la irrigación en sus características químicas ya que cuanto más cercano al periodo de regadío menores son la salinidad y la sodicidad, siempre con un pH de 9 o mayor. A pesar de sus limitaciones edáficas, ha sido regularmente cultivada bajo riego, siempre con resultados negativos.

La Llanura de inundación, durante la estación húmeda se anega lo cual determina una disminución de la salinidad aunque a medida que progresa la estación seca, esta aumenta por el ascenso capilar de las sales. Por caso, en un periodo de transición entre la estación húmeda y seca (Abril) el suelo presentó tenores de salinidad de 150dS/m en superficie, 90 dS/m a 40 cm y 29dS/m a 60 cm, siempre con valores de pH superiores a 9.5. Es decir, esta unidad refleja en su dinámica hidrogeomorfológica y edáfica la influencia de un clima árido estacionalmente contrastado (Figura 4b).

Pedregosidad (pavimento).— La pedregosidad es el resultado del impacto de la gota de lluvia y del movimiento de partículas por el agua (erosión areolar o mantiforme), debido a que los suelos son cada vez más someros y frágiles y a un intenso proceso de deflación. La deflación es el proceso geomorfológico

Figura 3. a) Arbusto con raíces expuestas en superficie debido a la intensa erosión hídrica (erosión laminar) y erosión eólica (deflación); b) Arbustos halófitos en pedestales y vegetación efímera indicando concentración de escorrentía durante la estación húmeda.

Figura 4. a) Suelos salinos de la Terraza alta con vegetación adaptada a estas condiciones; b) Concentración de sales en superficie en la llanura de inundación, al inicio de la estación seca.

por el cual el viento remueve partículas finas (arcillas, limos y arenas) de la superficie, produciendo pérdida de suelo, pérdida de nutrientes y materia orgánica, lo cual a su vez influye en el desarrollo de las comunidades vegetales. La efectividad de la erosión eólica por deflación depende de la escasez o espaciamiento de la vegetación, por lo tanto la destrucción de la cobertura vegetal y la presencia de materiales sueltos y secos en la superficie, inciden negativamente cuando aumenta la velocidad del viento, intensificando el proceso de deterioro. Como los suelos son cada vez más someros, hay cada vez más clastos en superficie por el movimiento de partículas finas.

El transporte de polvo ocurre cuando el viento excede un umbral crítico, produciendo deflación de suelos y hay evidencias de que las tormentas de polvo son más frecuentes como resultado de las actividades humanas en regiones semiáridas (Alcantara Ayala y Goudie, 2010). En general, en el área de estudio el pavimento conforma superficies con baja infiltración entre los parches de vegetación, si bien no tiene igual comportamiento en todas las áreas, dependiendo de la densidad espacial de los clastos y morfología, textura y condiciones de humedad de los suelos asociados. El comportamiento y distribución de la vegetación en los pavimentos también depende de los factores mencionados (Figura 5).

Por otra parte, debido a la susceptibilidad a la erosión eólica que presenta el valle, el proceso de deflación en el área estudiada conlleva la movilidad de arenas y limos, principalmente durante la estación seca, los cuales se acumulan en algunos casos a expensas de la vegetación, generando "nebkhas" (también llamadas "dunas fitogenéticas" o "dunas de arbustos"). Estas dunas son producto del entrampamiento o estabilización de la arena y/o limos eólicos alrededor de las plantas y de la erosión de las superficies carentes de cobertura vegetal. Además, estos tipos de dunas están asociadas a las condiciones climáticas y de cobertura vegetal actual y su tamaño puede variar en función de la altura de los arbustos que sirven de obstáculo y pueden cambiar de forma y tamaño estacionalmente.

También se ha observado, en algunos casos, acumulaciones eólicas de bajo espesor o sobre depositación de arenas y limos, por arriba del paleosuelo detectado en los pedestales.

Cabe aclarar que si bien pueden observarse campos dunarios, en general estabilizados, en ambas márgenes del río Santa María, los mismos no responden a las condiciones climáticas y/o la acción de procesos morfodinámicos actuales. De acuerdo con Sayago *et al.* (2005) y Sayago *et al.* (2010), durante el último milenio la región árida de Catamarca y Tucumán fue afectada por la

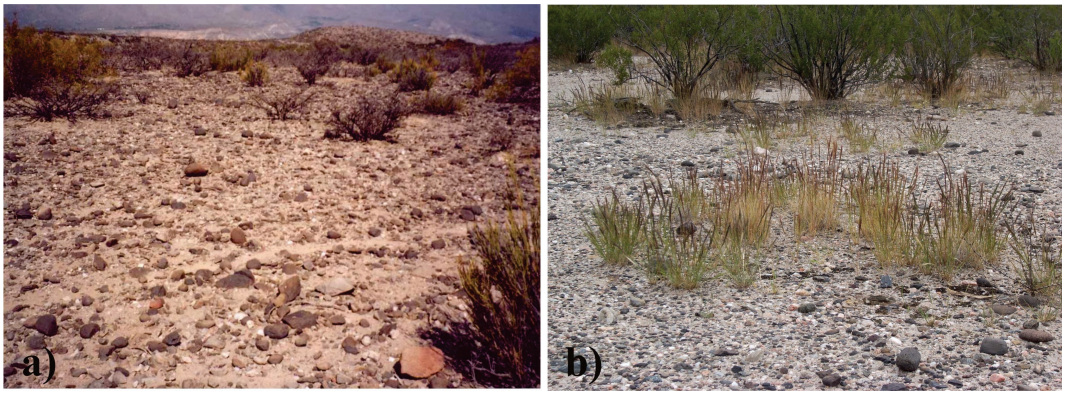


Figura 5. a) Formación de pavimento (pedregosidad), en la superficie del glacis superior (piedemonte apical), con desarrollo de barniz en los clastos; b) formación de pavimento con desarrollo de gramíneas durante la estación húmeda, en el glacis inferior (piedemonte distal).

alternancia de periodos de intensa sequía y otros definidamente húmedos. Así, los campos dunarios existentes en los valles preandinos de Catamarca y Tucumán se habrían desarrollado entre 1000 y 1300 AP, coincidente con el llamado Periodo Medieval Cálido Europeo, periodo durante el cual la región sufrió una extremada sequía, de acuerdo a los autores mencionados.

CONCLUSIONES

La desertificación o degradación de las tierras en el área estudiada es un riesgo geomorfológico que tiene un severo impacto en el ambiente a nivel regional. Está motivada principalmente por la variabilidad climática (alta estacionalidad) y las actividades humanas. Estos factores influyen en la distribución y características de la cobertura vegetal y en el desarrollo de varias formas de desastres geomorfológicos: erosión hídrica, acumulación eólica, deflación, salinización, etc.

Durante los pasados 100 años, el bosque ha sido reemplazado por arbustos en el área de estudio y en muchos sectores del noroeste argentino. Esta transformación ha producido una intensa erosión hídrica, por disminución de la resistencia del suelo y de la capacidad de infiltración, aumentando la heterogeneidad espacial de la cobertura vegetal y de la susceptibilidad del suelo a las heladas. El desarrollo de la vegetación arbustiva, principalmente en pedestales, produjo un incremento del escurrimiento y de la erosión, resultando en la desaparición del horizonte "A", formación de pavimento en áreas entre arbustos y pedestales, encostramientos y desarrollo de surcos de erosión y cauces efímeros. Estos cambios en el paisaje (o en la superficie del terreno) han influido además, en la heterogeneidad espacial del recurso suelo, lo cual es considerado como una característica de los procesos de desertificación de regiones áridas-semiáridas.

La presencia de un paleosuelo asociado a los "pedestales", además de ser una evidencia de un evento húmedo que habría dado lugar a la formación de un suelo que cubría gran parte del valle, demuestra también la intensidad del proceso erosivo, iniciado con el arribo de los españoles a la región. En tal sentido, la edad del paleosuelo (435 ± 15 AP) permitió confirmar que su remoción se produjo con posterioridad a la llegada de Diego de Almagro en 1546.

Con relación al dinamismo de la vegetación, los valores en el porcentaje de la cobertura de mantillo y canopia en los periodos de mayor y menor precipitación anual, demuestran que las unidades correspondientes a las laderas alta y baja, presentan una buena recuperación de la cobertura de mantillo en la estación húmeda, especialmente en la ladera baja. En otras unidades de la toposecuencia, como el piedemonte apical, la terraza alta y la llanura de inundación, la información obtenida denota situaciones intermedias, observándose en la primera una buena recuperación de cobertura de mantillo y canopia en la estación húmeda, mientras que en las terrazas (alta y baja) y la llanura de inundación, ésta es menor. En el piedemonte distal, en tanto, la vegetación ha perdido su capacidad de recuperación, registrándose aproximadamente la misma cobertura de mantillo y canopia en ambas estaciones, seca y húmeda.

No obstante, cabe tener en cuenta que las fluctuaciones multianuales del clima podrían modificar algunos valores de recuperación de cobertura vegetal, aunque la pérdida de suelo por erosión no lograría atenuarse en el corto tiempo.

Como ya se expresara, la desertificación es un proceso lento y acumulativo de degradación de las tierras en respuesta a influencias climáticas y antropogénicas. En tal sentido, cabe tener en cuenta el llamado de atención efectuado por Stafford Smith y Reynolds (2002), quienes sostienen que debido a que este proceso sigue siendo un concepto mal entendido, no ha sido asimilado en la imaginación del público occidental al mismo nivel de importancia que tiene el cambio climático o la tala de los árboles tropicales, por lo cual su estudio y comprensión constituyen un enorme desafío.

Finalmente, como lo expresan Reynolds

et al. (2007), las zonas secas (áridas, semiáridas y subhúmedas secas) son más vulnerables a los cambios climáticos, por eso es necesario la elaboración de modelos predictivos locales sobre el impacto que éstos tendrán, teniendo en cuentas el conocimiento local tradicional y el aportado por los técnicos, quienes deberán tener en cuenta cambios biofísicos y socioeconómicos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el marco del Proyecto CIUNT 26/G440-1, "Factores causales y consecuencias biofísicas de la desertificación en el valle de Santa María, provincias de Tucumán y Catamarca, Argentina" y del Proyecto FONCyT 1207, "La prevención y mitigación del impacto del cambio climático en las áreas rurales y urbanas de la provincia de Tucumán (Argentina)".

BIBLIOGRAFÍA

Abrahams, A. D., Parson, A. J. y Wainwrigh, J. 1995. Effects of vegetation change on interrill runoff and erosion, Walnuy Gulch, southern Arizona. Geomorphology 13: 37-48. Elsevier, London.

Alcantara Ayala, I. y Goudie, A. 2010. Geomorphological hazard and disaster prevention. Cambridge University Press, 282 p. Cambridge.

Bianchi, A. R. y Yañez, C. E. 1992. Las precipitaciones en el noroeste argentino. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria Salta, 383 p. Salta.

Collantes, M. M. y Niz, A. 2009. Evolución histórica de la desertificación en la región árida-semiárida del noroeste argentino: antropogénesis *versus* cambio climático. 53º Congreso Internacional de Americanistas, ISBN 9-786070-004841. México.

Collantes, M. M. y Somonte, C. 2007. El barniz del desierto y los procesos de reclamación en espacios persistentes: propuesta metodológica, Serie Monográfica y Didáctica (Public. Facultad de Cs. Naturales e I.M.L. UNT), Vol. 46: 29. ISSN 0327-5868. Tucumán.

Collantes, M. M., González, L. M. y Jerez, S. 2011. Interrelación entre desertificación, vulnerabilidad ambiental y cambio climático en el valle de Santa María, Provincias de Tucumán y Catamarca, Argentina. XIV Congreso Latinoamericano de Geología y VIII Congreso Colombiano de Geología, Memorias, J. Gómez (Ed.), p. 162. Medellín.

Collantes, M. M., Sirombra, M., Sayago, J. M. y Sosa, C. 2007. Factores causales e indicadores biofísicos de la desertificación en el valle de Santa María, provincias de Tucumán y Catamarca. Serie Monográfica y Didáctica (Public. Facultad de Cs. Naturales e I.M.L. UNT), Vol. 46: 136, ISSN 0327-5868. Tucumán.

González, L. M., Sayago, J. M., Pérez, H., Collantes, M. M. y Jerez, S. 2011. Relación geomorfología, salinidad edáfica y ocupación de las tierras en el valle fluvial de Santa María (provincias de Catamarca y Tucumán). 2ª Reunión de la red Argentina de Salinidad, Serie Resúmenes, p. 36. S. M. de Tucumán, 2011.

Labraga, J. C. y Villalba, R. 2009. Climate in the Monte Desert: past trends, present conditions and future projections. Journal of Arid Environments 73: 154-163. Elsevier Ltd., London.

Maggi, A. E. y Navone, S M. 2011. Sitio piloto en la región valles áridos. En: Evaluación de la desertificación en Argentina; Resultados del Proyecto LADA/FAO, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (Ed.), Gráfica Latina, 469 p. Buenos Aires.

Mulligan, M. 1998. Modelling the geomophological impact of climatic variability and extreme events in a semi-arid environment. Geomorphology 24: 59-78.

Niz, A. 2003. Geomorfología del sector meridional del Dpto. Tinogasta, Provincia de Catamarca, Argentina. Tesis Doctoral Inédita, Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, UNCA, 333 p. S.F. del V. de Catamarca.

Oberlander, T.M. 1994. Rock varnish in desert. In: Geomorphology of desert environments, A.D. Abrahams and A.J. Parsons (Eds.), Chapman & Hall, 671 p. Cambridge.

Perea, M. C. 1995. Mapa de vegetación del Valle de Santa María, sector oriental (Tucumán, Argentina). Lilloa, 38 (2): 121-131.

Perea, M. C. 1997. Diversidad específica y funcional (síndromes adaptativos) en comunidades semidesérticas del noroeste argentino. Tesis de M.Sc en Ecología Tropical, Universidad de los Andes, 260 p. Venezuela.

Reynolds J. F., Maestre, F. T., Huber-Sannwald, E., HerricK, J. y Kemp. P. R. 2005. Aspectos socioeconómicos y biofísicos de la desertificación. Ecosistemas, 2005/3: 1-19.

Reynolds J. F., Stafford Smith, D. M., Lambin, E. F., Turner, B. L., Mortimore, M., Batterbury, S. P. J., Downinig, T. E., Dowlatabadi, H., Fernandez, R. J., Herrick, J. E., Huber-Sannwald, E., Jiang, H.m Leemans, R., Lynam, T., Maestre, F., Ayarza, M. y Walker, B. 2007. Global desertification: building a science for dryland development. Science 316: 847-851.

Sayago, J. M. 1982. Las unidades geomorfológicas como base para la evaluación integrada del paisaje natural. Acta Geológica Lilloana, XVI-1: 169-180.

Sayago, J. M. 1992. El deterioro del ambiente en el noroeste argentino. Estudios Geográficos, Tomo LIII, 208: 543-567. Salamanca.

Sayago, J. M., Niz, A. y Collantes, M. M. 2005. Past human impacts and landscape response in the dry region of northwest Argentina. 2nd Southern Deserts Conference; Human-Environment Interactions in Southern Hemisphere Deserts; Past, Present and Future. Abstracts, p. 39. Arica, Chile.

Sayago, J. M., Collantes, M.M.., Neder, L. y Busnelli, J. 2010. Cambio climático y amenazas geoambientales en el área metropolitana de San Miguel de Tucumán (Argentina). Revista de la Asosiación Geológica Argentina 66 (4): 546-556.

Schlesinger, W. H., Reynolds, J. F., Cunningham, G. L., Huenneke, L. F., Jarrell, W. M., Virginia, R. A. y Whitford, W. G. 1990. Biological feedbacks in global desertification. Science, 247: 1043-1048.

Somonte, C. 2009. Tecnología lítica en espacios persistentes de Amaicha del Valle (Tucumán). Tesis Doctoral Inédita, 411 p., Universidad de Buenos Aires.

Somonte, C. y Collantes, M. M. 2007. Barniz de las rocas y espacios persistentes: su abordaje desde los procesos de reclamación artefactual lítica en Amaicha del Valle (Tucumán). Mundo de Antes, Nº 5 – 2007, pp. 119-137, Instituto de Arqueología y Museo, Universidad Nacional de Tucumán (UNT).

Stafford Smith, D. M. y Reynolds, J. F. 2002. Desertification: a new paradigm for an old problem. In: Global desertification: do humans cause deserts?, J.F. Reynolds and D.M. Stafford Smith (Eds.), Dahlem Workshop Report 88, Dahlem University Press, pp. 403-424. Berlin.

Tineo, A. 2005. Estudios hidrogeológicos del valle del río Santa María, Provincia de Catamarca. Serie Correlación Geológica 20, 2005, 220 p, Instituto Superior de Correlación Geológica, CONICET, San Miguel de Tucumán.

Tineo, A., Falcón, C. M., García, J. W., D'Urso, C. H., Galindo, G. y Rodríguez, G. V. 1998. Hidrogeología. En: Geología de Tucumán, M. Gianfrancisco, M.E. Puchulo, J. Durango de Cabrera y G.F. Aceñolaza (Eds.), Public. Esp. Colegio Graduados en Cs. Geológicas: 259-274. Tucumán.

Tongway, D. J., Cortina, J. y Maestre, F. T. 2004. Heterogeneidad espacial y gestión de medios semiáridos. Ecosistemas, Año XIII, 1/2004 (URL: http//www.aeet.org/ecosistemas/041/revision5. htm).

UNCCD 1994. United Nations Convention to Combat Desertification, Intergovernmental Negotiating Committee For e Convention to Combat Desertification, Elaboration of an International Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa. U.N. Doc A/AC. 241/27, 33 I.L.M. 1328. United Nations, USA.

Vásquez Méndez, R., Ventura Ramos, E., Oleschko, K., Hernández Sandoval, L., Parrot, J. F. y Nearing, M. A. 2010. Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico. Catena, 80: 162-169. Elsevier.

Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses –guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook 537, 43 p. Estados Unidos.