

**UAB**

Universitat Autònoma de Barcelona

**BIOGEOGRAFÍA Y PATRONES ACTUALES DE  
COMPOSICIÓN Y DISTRIBUCIÓN DEL PATRÓN LEOPARDO  
(LEOPARD BUSH) AL NORTE DE SUR AMÉRICA.**



**TESIS DOCTORAL**

**JOSE EDUARDO FUENTES DELGADO**

# PARTE V

---



*Playa de Punta Gallinas*

## CAPÍTULO 5 (DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES)

---

## V DISCUSION Y CONCLUSIONES

---

### 5.1 DISCUSIÓN

Esta investigación tuvo como propósito identificar como se forma el patrón Leopardo en la Guajira Colombiana, este se analizó partiendo de los datos disponibles y la información recolectada en campo con miras a entender como diversos procesos se interrelacionan haciendo énfasis especialmente en el análisis espacial con información satelital, análisis de suelos, de vegetación y de parámetros ambientales; se debe tener en cuenta que la información recolectada en campo fue durante un periodo específico, siendo necesarios mayores muestreos de campo en diferentes épocas del año para acabar de perfeccionar el modelo y lograr una mejor representación de la realidad.

#### HIPOTESIS

*La distribución y composición del patrón Leopardo en la península de la Guajira es originada por la interacción entre los aspectos antrópicos y los aspectos ambientales tales como el viento, el agua y la geomorfología; siendo esta interacción la que produce en ciertas partes del paisaje la acumulación de nutrientes en el suelo donde se desarrollan las formaciones vegetales.*

De los resultados obtenidos en esta investigación, se puede deducir que los procesos que llevaron a los resultados fueron acordes con la hipótesis planteada al corresponder con la idea de que en el paisaje existían ciertos lugares que permitían un desarrollo especial de la vegetación. Este fue uno de los primeros resultados encontrados en las unidades de paisaje luego del proceso de síntesis de factores bióticos y abióticos, las cuales mostraron que características relevantes como el material parental, la geomorfología y los suelos desarrollaban un ambiente particular en donde se ubicaba la vegetación. En este ambiente particular se encontraron unidades de paisaje que conformaban las áreas donde se encuentra ubicado el patrón Leopardo en la zona de estudio. Este resultado es correspondiente al primer objetivo planteado, el cual buscaba determinar unidades de paisaje a partir de la caracterización de la geomorfología, el suelo y la vegetación. Otros de los resultados obtenidos y que se encuentran acordes con la idea general de la hipótesis fueron los aspectos antrópicos, el viento y el agua, los cuales tienen importante influencia sobre el patrón, el factor humano se reveló en el área a través del impacto que sus actividades directas tienen en el paisaje. Estas actividades son la creación de caminos e infraestructura, el aumento en la población humana y animal, así como, la ganadería de ungulados que afectan el paisaje directamente en las coberturas vegetales y en el incremento de los suelos desnudos por las consecuencias que tiene la huella humana y animal. El factor viento fue evidente en la etapa de campo al ver la influencia que los fuertes vientos en conjunto con la rugosidad tenían sobre los demás aspectos como la vegetación y el suelo, en los cuales se generaban efectos de acumulación de partículas y por el otro lado la eliminación de estas principalmente en las zonas no cubiertas por la vegetación. También se comprobó la influencia del agua a través de la humedad presente en el suelo al realizar la medición de este parámetro y al analizar su distribución topográfica por medio del modelo de humedad, revelando que la vegetación se encuentra relacionada espacialmente con los lugares donde topográficamente existe mayor infiltración, así como, en las pruebas de campo se corroboró la idea presente en la bibliografía por diversos autores de que los lugares vegetados aumentan la infiltración por efecto de las raíces. Este resultado es correspondiente al segundo objetivo planteado, el cual buscaba conocer los factores determinantes vinculados a los patrones actuales de distribución espacial de la vegetación Leopardo.

En el análisis de la cobertura vegetal se aplicaron diversos índices que en conjunto mostraron como evolucionaron las métricas dentro de la vegetación, estos resultados revelaron que en la zona de estudio la mayoría del área se encontraba cubierta por suelos desnudos y en menor medida de arbustales, en dicha categoría la fragmentación de la vegetación se incrementó con el pasar de los años, aumentó el número de fragmentos y se redujo la distancia y el tamaño entre los parches de vegetación. La cobertura vegetal a su vez se encontraba compuesta por dos asociaciones de la vegetación: una conformada por especies leñosas y otra conformada con especies herbáceas las cuales desarrollaban islas de fertilidad y se encontraban espaciadas entre los 2 y 3 metros. Fue un resultado acorde a la hipótesis en cuanto a las formaciones vegetales y correspondientes al tercer objetivo planteado, el cual buscaba determinar la distancia y la composición típica entre los grupos y parches de vegetación en el entorno geográfico de la Guajira. El análisis de los nutrientes presentes en el suelo, también estuvo acorde con la hipótesis siendo el resultado final que mostró como varían los valores de N, P, K en los suelos desnudos y en las islas de fertilidad conformadas por la vegetación en interacción con los otros factores antes expuestos. Este resultado es correspondiente con el cuarto objetivo planteado, el cual buscaba conocer la dinámica de los macro nutrientes del suelo en el entorno de los parches y espacios entre la vegetación. En el desarrollo del patrón estudiado intervienen diversos factores los cuales se presentaron dentro de los resultados y objetivos antes expuestos, estas características del entorno fueron interrelacionadas en el esquema final que analiza y sintetiza la formación del patrón Leopardo. Este resultado es correspondiente con el quinto y último objetivo planteado, el cual buscaba determinar la relación entre las variables antrópicas, biofísicas, climáticas y edáficas vinculadas a la distribución espacial de la vegetación Leopardo.

Los resultados son claramente extrapolables a otros lugares teniendo en cuenta que en el trabajo se logró demostrar que existe una amplia variedad de sitios alrededor del mundo donde se presenta el patrón Leopardo, principalmente porque estos lugares muestran condiciones ambientales muy parecidas. Un ejemplo fueron los datos recabados en España donde se encontró que el patrón existe pero no se pudo analizar en profundidad, sin embargo, se logró definir que existen formaciones vegetales parecidas que presentan el fenómeno de convergencia evolutiva, lo que probablemente suceda en los otros lugares alrededor del mundo en los que el modelo indica presencia del patrón.

La presión del pastoreo de ungulados fue un resultado que se mencionó en la literatura. El pastoreo y pisoteo intenso del ganado en las regiones semiáridas, concentrado alrededor de lugares de riego, a menudo conduce a una reducción de la cubierta vegetal y a la compactación del suelo. (Elwell 1976; Kelly 1976; Breman 1983; Stroosnijder 1996; Aguiar 1999). En otros estudios se refieren a este resultado de maneras similares. El pastoreo excesivo puede alterar las relaciones in situ planta-suelo y crear heterogeneidad espacial (Schlesinger et al. 1990, 1998). Kellner y Bosch (1992) sugirieron que los patrones de vegetación en praderas semiáridas se crearon mediante el pastoreo selectivo por los herbívoros. En los estudios del patrón Tigre en Australia, mencionan la relación con la formación de patrones con las bandas de vegetación. Las bandas evolucionan a medida que se adelgaza una cobertura vegetal densa por deterioro climático o por la presión del pastoreo (Dunkerley, 1995). La extensa eliminación de la vegetación ha sido observada en el oeste de Nueva Gales del Sur (Australia) durante los años secos, bajo la presión combinada de las acciones, de conejos y cabras. Después de la estabilización del modelo, la presión de pastoreo se eliminó y se observó tendencias en la recuperación de la Franja (Dunkerley, 1997). Estos estudios reconocen que el pastoreo y por lo tanto el uso antrópico puede modificar los patrones de vegetación. Uno de los resultados que también es consecuente con otros autores es la mayor humedad en las zonas donde está presente la vegetación. En estas zonas se produce la redistribución espacial de la humedad del suelo, de los materiales erosionables y nutrientes. La variación espacial resultante puede

estructurarse en ciertas escalas, por lo que la vegetación en parches concentra nutrientes y agua en el suelo, pero son eliminados en los parches de suelo desnudo o compactado (Schlesinger et al. 1990; Wilson 1992; Ludwig & Tongway 1995; Valentin, 1999; Aguiar, 1999; Tongway 2001; Ursino, 2005; Saco, 2007). Respecto a la influencia del viento y la diseminación de las semillas en la formación del patrón Leopardo, Aguiar (1999) especifica algo que se corroboró en la Guajira: el agua es el principal agente de la redistribución de la vegetación Tigre, mientras que el viento y los animales son la principal causa de la redistribución de la vegetación de Leopardo. Por otra parte, en los patrones de Tigre, el agua es el principal impulsor de la dispersión de semillas secundarias, mientras que en los patrones de Leopardo, el viento y los animales son los principales agentes de dispersión.

Los resultados mostraron características diferenciales en el patrón Leopardo presente en la Guajira. La zona se ubica en un promedio anual con un máximo de precipitación de 100 mm en los 27 años de análisis, este es el primer aspecto diferencial entre el patrón Leopardo y el patrón Tigre debido a que este último según la bibliografía (Valentin 1999 y Tongway 2001) puede encontrarse en rangos de precipitación desde los 300mm a los 800mm quedando claro que la relación entre los patrones en bandas y rayas son diferenciables de primera mano por medio de la precipitación promedio tendiendo a ser inferior a los 300 mm en el patrón Leopardo. Uno de los aspectos de los cuales no se encontró pruebas fue de que la vegetación que se ubica en los lugares donde se forman patrones, sea temporal o periódica como afirma Deblabue (2012), la presencia de gramíneas en la zona se encuentra restringida a una pequeña franja donde se localizan asociaciones de plantas herbáceas pero estas no presentan temporalidad en el análisis en campo y con las imágenes de satélite no se encontró pruebas de ello, el nivel inicial de la vegetación siempre es el mismo solo disminuyendo a aumentando según los efectos de agentes externos (antrópicos y climáticos). En el estudio del patrón Leopardo los análisis sobre la vegetación mostraron que la vegetación se componía de herbáceas, arbustales y cactáceas, estas últimas son uno de los resultados más significativos debido a que este sería el primer reporte donde los cactus forman parte del patrón Leopardo, a diferencia de otros lugares donde se reportan arbustos, herbáceas y árboles como conformadores del patrón.

Los resultados ayudaron a comprender la formación del patrón Leopardo pero en cuanto a las islas de fertilidad los procesos específicos que controlan la interacción y la fijación de los nutrientes en el suelo se desconocen. No sé ha estudiado cómo actúan las bacterias (bacterias extremófilas) y otros microorganismos en la fijación de los nutrientes dentro de las islas de fertilidad. Lo que en el futuro podría brindar nuevas perspectivas de investigación de suelos en términos de su contribución a los servicios del ecosistema. Así como, en los estudios de bacterias del suelo resistentes a los antibióticos que ya se llevan a cabo para la creación de nuevos medicamentos (Ling et al, 2015) luego del agotamiento de los microorganismos cultivables en laboratorio, los microorganismos cuyo crecimiento no se puede propiciar en condiciones controladas es el 99% de todos los existentes.

Otro aspecto muy importante a profundizar es la relación de cambio global que existe entre la disminución de la vegetación y los efectos climáticos como el ENSO (fenómeno del niño), principalmente por el aumento en la demanda de recursos en las zonas áridas desde la perspectiva antrópica en la época de sequía. En la cobertura del año 2007 se pudo apreciar un fuerte descenso en la vegetación y un aumento de la fragmentación, este año coincidió también con uno de los fenómenos del Niño más fuertes registrados, pero al no tener información de coberturas para otros años donde se registrara fenómeno del Niño no se pudo concluir con un cierto grado de confianza si existió una relación directa o no en la reducción de la vegetación por este fenómeno.

## 5,2 CONCLUSIONES

El patrón Leopardo al ser el menos estudiado tiene pocas referencias o estudios específicos que muestren las relaciones directas entre las variables que lo conforman, esto se debe a que la mayoría de trabajos se han concentrado en el patrón Tigre y en los últimos años la tendencia en los estudios de dinámica de patrones en zonas áridas ha sido más desarrollada en el ámbito de la modelación numérica y en esta nueva etapa también se ha realizado un mayor énfasis en modelar el patrón Tigre, lo que ha relegado los estudios de campo y análisis específicos a un nivel secundario, esto ha conllevado a que los factores y los procesos de interacción sobre el patrón más desconocido sean considerados los mismos, algo que se evidencia también en los modelos matemáticos. El modelamiento de distribución potencial de la vegetación a nivel global basado en muestras reales y no en modelamiento numérico mostró una amplia distribución de patrones, pero a su vez dejó claro nuevamente, que son pocos los estudios científicos que se concentran en analizar nuevas áreas, quizá porque los sitios donde se presentan son lugares de difícil acceso en zonas empobrecidas y en países remotos. Esta falta de estudios es evidente al comparar el número de estudios del patrón Tigre y el patrón Leopardo.

### 5.2.1 Conclusiones del objetivo general

En relación al objetivo general de este trabajo se concluye que el entendimiento de cómo se forman los patrones Leopardo en la península de la Guajira es un aporte a los procesos de recuperación de zonas áridas degradadas y de tierras erosionadas en las cuales se puede aplicar la estructura de islas de fertilidad o de recursos para incrementar la productividad y mantener la protección del suelo. También se puede utilizar como un indicador de cambio global al evidenciar la degradación y la transformación acelerada de los ecosistemas en zonas áridas, teniendo en cuenta que estas áreas son mucho más sensibles a las variaciones climáticas.

### 5.2.2 Conclusiones de los objetivos específicos

Respecto al primer objetivo específico. el paisaje es la manifestación territorial en el cual se pueden sintetizar las relaciones que se generan en un lugar concreto, sobre el área las unidades de paisaje fisiográfico lograron aglutinar características como el clima, el material parental, la geomorfología, los suelos y la vegetación mostrando como esas relaciones definen rasgos únicos en cada unidad, se encontraron 3 unidades de paisaje que reunieron todas las condiciones necesarias para dar soporte al desarrollo de los patrones Leopardo.

Respecto al segundo objetivo específico. En el proceso de tratar de entender conceptualmente un sistema dinámico como el patrón Leopardo y abstraerlo de la realidad en un modelo que contenga todas las partes, se llegó a la conclusión de que en el patrón Leopardo interactuaban varios factores de manera simbiótica entre los cuales dominan y regulan el desarrollo del patrón factores bióticos (vegetación), abióticos (suelos, temperatura y precipitación, vientos, topografía, humedad del suelo) y antrópicos (animales, construcciones y población), estos aspectos fueron analizados en campo de manera integral tratando de aislar las cualidades más relevantes para el desarrollo del patrón, siendo en grado de importancia el viento, los animales y los suelos en conjunto con las plantas los aspectos más influyentes sin dejar de lado los otros factores que también contribuyen a la arquitectura del patrón.

Respecto al tercer objetivo específico. En los estudios de dinámica de parches en zonas áridas y en especial en los patrones Leopardo la distancia en la que los parches de vegetación se

suelen encontrar determina el grado de fragmentación o de permeabilidad del paisaje, en este caso, la distancia final entre los parches de vegetación fue de 3 metros en promedio, indicando que la vegetación tiende a ser fragmentada en pequeñas partes, lo que se verificó al analizar en conjunto los valores de número de parches y tamaños de estos, indicando que son más pequeños y en mayor cantidad, esto mostró que el patrón tiene un nivel de influencia externa muy alto que se ve reflejado de primera mano por las métricas de fragmentación. La composición de la vegetación dentro de estos parches mostró la tendencia a la dominancia de los arbustos como la *Castela erecta* y la *Prosopis juliflora*, presentes en la mayoría de parches y con gran dominancia en el patrón y sobre las asociaciones de la vegetación en la zona de estudio.

Respecto al cuarto objetivo específico. Al realizar las pruebas de campo sobre los suelos, fue posible ver las interacciones de las plantas con el viento, el resultado de esta interacción mostró la influencia que las corrientes de aire locales tienen en los parches, en donde se evidenció las estrategias que la vegetación adoptaba formando islas de fertilidad para lograr una mejora del ecosistema circundante. Dentro de esta relación vegetación – viento, la acumulación de sedimentos marca un cambio diferencial en la disponibilidad de nutrientes sobre los suelos en los que se ubica cada planta o comunidad de especies. En campo se pudo probar esta diferencia al comparar la medición de los nutrientes presentes en los suelos circundantes a la vegetación y los espacios no vegetados, arrojando mayores valores significativos en la mayoría de lugares vegetados que en los no vegetados. Esto demostró que la heterogeneidad del paisaje y por tanto del patrón es debida a esta variación de nutrientes formando espacios alternados de disponibilidad de recursos.

Respecto al quinto objetivo específico. Se llega a la conclusión de que los resultados están en línea con la hipótesis inicialmente planteada, se pudo demostrar la interacción de diversos aspectos y como la formación del patrón Leopardo es el resultado de la interacción de seis factores básicos que los conforman (Figura 156). Primero se desarrollan unas características geomorfológicas, edafológicas y climáticas específicas que limitan las formas de vida vegetales (paisajes) que se pueden desarrollar, al limitarse el desarrollo vegetativo a solo ciertas especies resistentes a condiciones extremas, estas conforman asociaciones y a su vez generan estrategias para optimizar los recursos disponibles, la principal estrategia es aprovechar el viento en el área para fijar nutrientes en la tierra por medio de la retención de sedimentos lo que conlleva a la modificación de la humedad y la disponibilidad de nutrientes en el suelo, finalmente, este equilibrio es perturbado por las actividades humanas a través de la ganadería de ungulados y de las actividades antrópicas, generando la heterogeneidad de suelos y de vegetación cuya interacción genera el patrón.

## 5.3 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agnew, C., & Anderson, W. (1992). *Water in the arid realm*. London: Routledge.
- Aguiar, M. n. R., & Sala, O. E. (1999). Patch structure, dynamics and implications for the functioning of arid ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 14(7), 273-277.
- Alisos., F. ( 2011 ). Caracterización cultural de la etnia wayuu y su enfoque hacia la baja Guajira. In A. p. l. s. F. Alisos (Ed.). Bogotá D.C.
- Almorox, J. (2003). *Climatología aplicada al medio ambiente y agricultura*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Allaby, M., & Garratt, R. (2008). *Deserts*: Infobase Publishing.
- Arendt, J., & Reznick, D. (2008). Convergence and parallelism reconsidered: what have we learned about the genetics of adaptation? *Trends in Ecology & Evolution*, 23(1), 26-32.
- Armitage, F. (1987). *Irrigated forestry in arid and semi-arid lands-A synthesis*. Ottawa,: A synthesis.
- Arnold, G., Arnold, M., & Dudzinsky, M. (1978). Ethology of free-ranging domestic animals.
- Assessment, M. E. (2005). *Ecosystems and human well-being: desertification synthesis*: World Resources Institute.
- Baek, H., Jung, D. I., & Wang, Z.-w. (2013). Pattern formation in a semi-ratio-dependent predator-prey system with diffusion. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2013.
- Barbier, N., Couteron, P., Lefever, R., Deblauwe, V., & Lejeune, O. (2008). Spatial decoupling of facilitation and competition at the origin of gapped vegetation patterns. *Ecology*, 89(6), 1521-1531.
- Barbier, N., Couteron, P., Lejoly, J., Deblauwe, V., & Lejeune, O. (2006). Self-organized vegetation patterning as a fingerprint of climate and human impact on semi-arid ecosystems. *Journal of Ecology*, 94(3), 537-547. doi: 10.1111/j.1365-2745.2006.01126.x
- Barrera, E. M. (1990). La rebelión guajira de 1769. Algunas constantes de la cultura Wayuu y razones de supervivencia. *Credencial Historia*, 6.
- Bashan, Y., & de-Bashan, L. E. (2010). Microbial populations of arid lands and their potential for restoration of deserts *Soil biology and agriculture in the tropics* (pp. 109-137): Springer.
- Bestelmeyer, B., Trujillo, D., Tugel, A., & Havstad, K. (2006). A multi-scale classification of vegetation dynamics in arid lands: What is the right scale for models, monitoring, and restoration? *Journal of Arid Environments*, 65(2), 296-318.
- Bisigato, A. J., Villagra, P. E., Ares, J. O., & Rossi, B. E. (2009). Vegetation heterogeneity in Monte Desert ecosystems: A multi-scale approach linking patterns and processes. *Journal of Arid Environments*, 73(2), 182-191. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.09.001>
- Blyth, E., & Harding, R. (1995). Application of aggregation models to surface heat flux from the Sahelian tiger bush. *Agricultural and Forest Meteorology*, 72(3), 213-235.
- Boaler, S., & Hodge, C. (1962). Vegetation stripes in Somaliland. *The Journal of Ecology*, 465-474.
- Boaler, S., & Hodge, C. (1964). Observations on vegetation arcs in the northern region, Somali Republic. *The Journal of Ecology*, 511-544.
- Borgogno, F., D'Odorico, P., Laio, F., & Ridolfi, L. (2009). Mathematical models of vegetation pattern formation in ecohydrology. *Reviews of geophysics*, 47(1), RG1005.
- Borthagaray, A. I., Fuentes, M. A., & Marquet, P. A. (2010). Vegetation pattern formation in a fog-dependent ecosystem. *Journal of theoretical biology*, 265(1), 18-26.
- Breman, H., & De Wit, C. (1983). *Rangeland productivity and exploitation in the Sahel*.
- Buol, S. W., Hole, F. D., McCracken, R. J., & Southard, R. J. (1997). *Soil genesis and classification*: Iowa State University Press.

- Burquez A, Q. M. (1994). *Islands of diversity ironwood ecology and the richness of perennials in a Sonoran Desert biological preserve*. Washington, DC,: Conservation International.
- Caldwell, M., DePuit, E., Fernandez, O., Wiebe, H., Camp, L., Holthausen, R., & Neuber, H. (1975). Gas exchange, translocation, root growth and soil respiration of Great Basin plants.
- Cavallinia, R., Mancinia, F., & Zannia, M. (2004). *Orthorectification of HR satellite images with space derived DSM*. Paper presented at the Proceedings of the XXth Congress International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS).
- Cleveland, C. C., Townsend, A. R., Schimel, D. S., Fisher, H., Howarth, R. W., Hedin, L. O., . . . Elseroad, A. (1999). Global patterns of terrestrial biological nitrogen (N<sub>2</sub>) fixation in natural ecosystems. *Global biogeochemical cycles*, 13(2), 623-645.
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35-46.
- Cornet, A., Delhoume, J.-P., & Montana, C. (1988). Dynamics of striped vegetation patterns and water balance in the Chihuahuan Desert.
- Couteron, P., & Lejeune, O. (2001). Periodic spotted patterns in semi-arid vegetation explained by a propagation-inhibition model. *Journal of Ecology*, 89(4), 616-628.
- Cross, A. F., & Schlesinger, W. H. (2001). Biological and geochemical controls on phosphorus fractions in semiarid soils. *Biogeochemistry*, 52(2), 155-172.
- Chaiya, I., Wollkind, D. J., Cangelosi, R. A., Kealy-Dichone, B. J., & Rattanukul, C. (2015). Vegetative Rhombic Pattern Formation Driven by Root Suction for an Interaction-Diffusion Plant-Ground Water Model System in an Arid Flat Environment. *American Journal of Plant Sciences*, 6(08), 1278.
- Cheng, Y., Stieglitz, M., Engel, V., & Turk, G. (2009). *Parallel Vegetation Stripe Formation Through Hydrologic Interactions*. Paper presented at the AGU Fall Meeting Abstracts.
- Chuvieco, E., & Salas, J. (1996). Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(3), 333-345.
- D., L. L. (2004). Guía Metodológica para la Delimitación del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas Secas de América Latina y el Caribe: Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y El Caribe – CAZALAC – UNESCO
- d'Herbès, J.-M., Valentin, C., Tongway, D. J., & Leprun, J.-C. (2001). Banded vegetation patterns and related structures *Banded vegetation patterning in arid and semiarid environments* (pp. 1-19): Springer.
- Day, A. D., & Ludeke, K. L. (1993). *Plant nutrients in desert environments*. Heidelberg: Springer
- De Martonne, E. (1926). *Aréisme et indice aridite*. Paris.
- De Pauw, E., Göbel, W., & Adam, H. (2000). Agrometeorological aspects of agriculture and forestry in the arid zones. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(1), 43-58.
- Deblauwe, V., Barbier, N., Couteron, P., Lejeune, O., & Bogaert, J. (2008). The global biogeography of semi-arid periodic vegetation patterns. *Global Ecology and Biogeography*, 17(6), 715-723. doi: 10.1111/j.1466-8238.2008.00413.x
- Deblauwe, V., Couteron, P., Bogaert, J., & Barbier, N. (2012). Determinants and dynamics of banded vegetation pattern migration in arid climates. *Ecological monographs*, 82(1), 3-21.
- Deblauwe, V., Couteron, P., Lejeune, O., Bogaert, J., & Barbier, N. (2011). Environmental modulation of self-organized periodic vegetation patterns in Sudan. *Ecography*, 34(6), 990-1001.
- Dunkerley, D. (1997). Banded vegetation: survival under drought and grazing pressure based on a simple cellular automaton model. *Journal of Arid Environments*, 35(3), 419-428.

- Dunkerley, D., & Brown, K. (1995). Runoff and runoff areas in a patterned chenopod shrubland, arid western New South Wales, Australia: characteristics and origin. *Journal of Arid Environments*, 30(1), 41-55.
- Dunkerley, D., & Brown, K. (2002). Oblique vegetation banding in the Australian arid zone: implications for theories of pattern evolution and maintenance. *Journal of Arid Environments*, 51(2), 163-181.
- Ecosistemas, C. M. d. M. A. D. G. d. (2001). *Política nacional ambiental para el desarrollo sostenible de los espacios oceánicos y las zonas costeras e insulares de Colombia*: Ministerio del Medio Ambiente.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43-57.
- Elwell, H., & Stocking, M. (1976). Vegetal cover to estimate soil erosion hazard in Rhodesia. *Geoderma*, 15(1), 61-70.
- EPM, E. P. d. M.-. (2010). *Jepirachi: una experiencia con la comunidad indígena Wayuu de la Alta Guajira colombiana*. Medellín.
- Escos, J., & Alados, C. (1993). Immobilization of Spanish ibex [*Capra pyrenaica*] with etorphine plus acepromazine. *Mammalia (France)*.
- Evans, I. S. (1972). *General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics*: Harper & Row.
- Farnsworth, R., Romney, E., & Wallace, A. (1976). Implications of symbiotic nitrogen fixation by desert plants. *The Great Basin Naturalist*, 65-80.
- Ffolliott, P., Dawson, J., Fisher, J., Moshe, I., Fulbright, T., Al Musa, A., . . . Verburg, P. (2003). *Dryland environments*. Paper presented at the Proceedings of the IALC conference & workshop, assessing capabilities of soil and water resources in drylands: the role of information retrieval and dissemination technologies.
- FIP. (2011). *La Guajira en su laberinto, transformaciones y desafíos de la violencia* (Vol. 12). Bogota.
- Franklin, J. (2010). *Mapping Species Distributions*: Cambridge University Press.
- Fridland, V. M. (1974). Structure of the soil mantle. *Geoderma*, 12(1), 35-41. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061\(74\)90036-6](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061(74)90036-6)
- García-Moya, E., & McKell, C. M. (1970). Contribution of shrubs to the nitrogen economy of a desert-wash plant community. *Ecology*, 81-88.
- Garner W, S. Y. (1989). A proposed mechanism for the formation of 'Fertile Islands' in the desert ecosystem. *Arid Environ*, 16, 257-262.
- Gilad, E., von Hardenberg, J., Provenzale, A., Shachak, M., & Meron, E. (2004). Ecosystem engineers: from pattern formation to habitat creation. *Physical Review Letters*, 93(9), 098105.
- Gile, L. H. (1961). A classification of Ca horizons in soils of a desert region, Dona Ana County, New Mexico. *Soil Science Society of America Journal*, 25(1), 52-61.
- Gómez, J., Etchevers, J., Monterroso, A., Gay, C., Campo, J., & Martínez, M. (2008). Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera*, 21(1), 35-56.
- González-Rebollar, J., & Chueca, A. (2010). C4 y CAM. Características generales y uso en programas de desarrollo de tierras áridas y semiáridas. Homenaje al Dr. Julio López Gorgé.
- Greig-Smith, P. (1979). Pattern in Vegetation. *Journal of Ecology*, 67(3), 755-779. doi: 10.2307/2259213
- Greig-Smith, P., & Chadwick, M. (1965). Data on Pattern Within Plant Communities: III. Acacia-Capparis Semi-Desert Scrub in the Sudan. *The Journal of Ecology*, 465-474.
- Guillaume, K., Abbadie, L., Mariotti, A., & Nacro, H. (1999). Soil organic matter dynamics in tiger bush (Niamey, Niger). Preliminary results. *Acta Oecologica*, 20(3), 185-195.

- Guisan, A., Weiss, S. B., & Weiss, A. D. (1999). GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology*, 143(1), 107-122.
- Guo, T., Tan, Q., & Xiong, J. (2011). Analysis of spatial patterns in a vegetation model. *Applied Mathematics and Computation*, 217(21), 8303-8310.
- Hemming, C. (1965). Vegetation arcs in Somaliland. *The Journal of Ecology*, 57-67.
- Hemminga, M. A., & Nieuwenhuize, J. (1990). Seagrass wrack-induced dune formation on a tropical coast (Banc d'Arguin, Mauritania). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 31(4), 499-502. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0272-7714\(90\)90040-X](http://dx.doi.org/10.1016/0272-7714(90)90040-X)
- Hengl, T., & Reuter, H. I. (2009). *Geomorphometry: concepts, software, applications* (Vol. 33): Elsevier.
- Hernández-Camacho, J., Hurtado, A., Ortiz, R., & Walschburger, T. (1992). Unidades biogeográficas de Colombia. *La diversidad biológica de Iberoamérica I. Acta Zoológica Mexicana*, 55-151.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978. doi: 10.1002/joc.1276
- HilleRisLambers, R., Rietkerk, M., van den Bosch, F., Prins, H. H., & de Kroon, H. (2001). Vegetation pattern formation in semi-arid grazing systems. *Ecology*, 82(1), 50-61.
- Hole, F. D., & Campbell, J. B. (1985). *Soil landscape analysis*: Government Institutes.
- IDEAM. (2005). Atlas Climático de Colombia. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Imeson, A., & Prinsen, H. (2004). Vegetation patterns as biological indicators for identifying runoff and sediment source and sink areas for semi-arid landscapes in Spain. *Agriculture, ecosystems & environment*, 104(2), 333-342.
- Issa, O. M., Trichet, J., Défarge, C., Couté, A., & Valentin, C. (1999). Morphology and microstructure of microbotic soil crusts on a tiger bush sequence (Niger, Sahel). *Catena*, 37(1), 175-196.
- Jarvis, A., Reuter, H., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4. Available from the CGIAR-SXI SRTM 90m database: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Jenness, J. (2006). Topographic Position Index (tpi\_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.3a. *Jenness Enterprises*.
- Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2001). The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, 53(1), 51-77.
- Jones, K. B., Heggem, D. T., Wade, T. G., Neale, A. C., Ebert, D. W., Nash, M. S., . . . Selle, A. R. (2000). Assessing landscape condition relative to water resources in the western United States: a strategic approach *Monitoring Ecological Condition in the Western United States* (pp. 227-245): Springer.
- Juergens, N., Oldeland, J., Hachfeld, B., Erb, E., & Schultz, C. (2012). Ecology and spatial patterns of large-scale vegetation units within the central Namib Desert. *Journal of Arid Environments*, 93(0), 59-79. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.09.009>
- Kefi, S., Rietkerk, M., & Katul, G. G. (2008). Vegetation pattern shift as a result of rising atmospheric CO<sub>2</sub> in arid ecosystems. *Theoretical population biology*, 74(4), 332-344.
- Kellner, K., & Bosch, O. (1992). Influence of patch formation in determining the stocking rate for southern African grasslands. *Journal of Arid Environments*, 22(1), 99-105.
- Kelly, R., & Walker, B. (1976). The effects of different forms of land use on the ecology of a semi-arid region in south-eastern Rhodesia. *The Journal of Ecology*, 553-576.
- Kolb, E. (1971). *Fisiología Veterinaria*. Zaragoza: Acribia.
- Lajtha, K., & Schlesinger, W. H. (1988). The effect of CaCO<sub>3</sub> on the uptake of phosphorous by two desert shrub species, *Larrea tridentata* (DC.) Cov. and *Parthenium incanum* HBK. *Botanical Gazette*, 328-334.

- Lange, J., Leibundgut, C., & Simmers, I. (2003). Surface runoff and sediment dynamics in arid and semi-arid regions. *Understanding Water in a Dry Environment: Hydrological Processes in Arid and Semi-arid Zones*, 115-150.
- Lefever, R., & Lejeune, O. (1997). On the origin of tiger bush. *Bulletin of Mathematical biology*, 59(2), 263-294.
- Lefever, R., & Turner, J. W. (2012). A quantitative theory of vegetation patterns based on plant structure and the non-local F-KPP equation. *Comptes Rendus Mécanique*, 340(11-12), 818-828. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.crme.2012.10.030>
- Lejeune, O., Couteron, P., & Lefever, R. (1999). Short range co-operativity competing with long range inhibition explains vegetation patterns. *Acta Oecologica*, 20(3), 171-183.
- Leopold, L. B., Wolman, M.G., Miller, J.P.,. (1995). *Fluvial Processes in Geomorphology*. New York,: Dover.
- Leprun, J. C. (1999). The influences of ecological factors on tiger bush and dotted bush patterns along a gradient from Mali to northern Burkina Faso. *Catena*, 37(1), 25-44.
- Lettau, H. (1969). Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description. *Journal of Applied Meteorology*, 8(5), 828-832.
- Levy, P., Moncrieff, J., Massheder, J., Jarvis, P., Scott, S., & Brouwer, J. (1997). CO<sub>2</sub> fluxes at leaf and canopy scale in millet, fallow and tiger bush vegetation at the HAPEX-Sahel southern super-site. *Journal of Hydrology*, 188, 612-632.
- Li, Z., Zhu, C., & Gold, C. (2005). *Digital terrain modeling: principles and methodology*: CRC press.
- Linder, W. (2009). *Digital photogrammetry*: Springer.
- Liu, Q.-X., Jin, Z., & Li, B.-L. (2008). Numerical investigation of spatial pattern in a vegetation model with feedback function. *Journal of theoretical biology*, 254(2), 350-360.
- Lobo, J. M., Jiménez-Valverde, A., & Real, R. (2008). AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography*, 17(2), 145-151.
- Mabbutt, J. (1987). Implementation of the plan of action to combat desertification: Progress since UNCOD. *Land Use Policy*, 4(4), 371-388.
- MacArthur, R. H. (1967). *The theory of island biogeography* (Vol. 1): Princeton University Press.
- Macfadyen, W. (1950). Vegetation patterns in the semi-desert plains of British Somaliland. *The Geographical Journal*, 116(4/6), 199-211.
- Maestre, F. T., & Cortina, J. (2004). Insights into ecosystem composition and function in a sequence of degraded semiarid steppes. *Restoration Ecology*, 12(4), 494-502.
- Maliva, R. G., & Missimer, T. M. (2012). *Arid lands water evaluation and management*: Springer Science & Business Media.
- Manor, A., & Shnerb, N. M. (2008). Facilitation, competition, and vegetation patchiness: from scale free distribution to patterns. *Journal of theoretical biology*, 253(4), 838-842.
- Marín, L. (1992). *Geomorfología y aspectos erosivos del litoral Caribe colombiano. Sector Castilletes – Riohacha*. . Cali: INGEOMINAS.
- Mark, D. M., & Smith, B. (2004). A science of topography: From qualitative ontology to digital representations. *Geographic Information Science and Mountain Geomorphology*, 75-100.
- Marschner, P., & Rengel, Z. (2007). *Nutrient cycling in terrestrial ecosystems* (Vol. 10): Springer Science & Business Media.
- McDonald, A. K., Kinucan, R. J., & Loomis, L. E. (2009). Ecohydrological interactions within banded vegetation in the northeastern Chihuahuan Desert, USA. *Ecohydrology*, 2(1), 66-71.
- McGarigal, K., & Cushman, S. A. (2002). Comparative evaluation of experimental approaches to the study of habitat fragmentation effects. *Ecological applications*, 12(2), 335-345.

- McGrath, G. S., Paik, K., & Hinz, C. (2012). Microtopography alters self-organized vegetation patterns in water-limited ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 117(G3).
- Meigs, P. (1953). *World Distribution of Arid and Semi-arid Hot Climates*. Paris: UNESCO.
- Menaut, J.-C., Walker, B., Tongway, D. J., Valentin, C., & Seghieri, J. (2001). *Banded vegetation patterning in arid and semiarid environments: ecological processes and consequences for management* (Vol. 149): Springer Science & Business Media.
- Meron, E. (2012). Pattern-formation approach to modelling spatially extended ecosystems. *Ecological modelling*, 234, 70-82.
- Meron, E., Gilad, E., von Hardenberg, J., Shachak, M., & Zarmi, Y. (2004). Vegetation patterns along a rainfall gradient. *Chaos, Solitons & Fractals*, 19(2), 367-376.
- Montana, C. (1992). The colonization of bare areas in two-phase mosaics of an arid ecosystem. *Journal of Ecology*, 315-327.
- Montana, C., Lopez-Portillo, J., & Mauchamp, A. (1990). The response of two woody species to the conditions created by a shifting ecotone in an arid ecosystem. *The Journal of Ecology*, 789-798.
- Moreno, F., Hendy, A., Quiroz, L., Hoyos, N., Jones, D., Zapata, V., . . . Cárdenas, A. (2015). Revised stratigraphy of Neogene strata in the Cocinetas basin, La Guajira, Colombia. *Swiss Journal of Palaeontology*, 134(1), 5-43.
- Mur Amada, J. (2010). Curso de energía eólica. *Máster europeo en energías renovables y eficiencia energética.[en línea], Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Zaragoza,[Consultado: 19 de mayo de 2012], Disponible en: www. windygrid.org/manualEolico. pdf.*
- Nabhan GP, S. H. (1994). *Boundary effects on endangered cacti and their nurse plants in and near a Sonoran desert biosphere reserve*. Washington, DC: Conservation International.
- Nachtergaele, F., & Batjes, N. (2012). *Harmonized world soil database*: FAO.
- Okin, G. S., Murray, B., & Schlesinger, W. H. (2001). Desertification in an arid shrubland in the southwestern United States *Land Degradation* (pp. 53-70): Springer.
- Paron, P. (2007). Geomorphological variations, Chapter: Preliminary results about mapping and geomorphological correlation of tiger bush (*Brussa tigrée*) in Somalia, from a remote sensing and GIS analysis perspective. In K. I. Goudie A.S. (Ed.), (pp. 59-86): : Nakladatelství p3k.
- Penman, H. L. (1948). *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Paper presented at the Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.
- Pennock, D. (2003). Terrain attributes, landform segmentation, and soil redistribution. *Soil and Tillage Research*, 69(1), 15-26.
- Phillips, S. (2005). A brief tutorial on Maxent. *AT&T Research*.  
<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/tutorial/tutorial-in-spanish.doc>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3), 231-259.
- Pike, R. J. (1995). Geomorphometry—progress, practice, and prospect. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 221–238.
- Pike, R. J. (2000). Geomorphometry-diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography*, 24(1), 1-20.
- Plissock, P., & Fuentes-Castillo, T. (2011a). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de geografía Norte Grande*, 61-79.

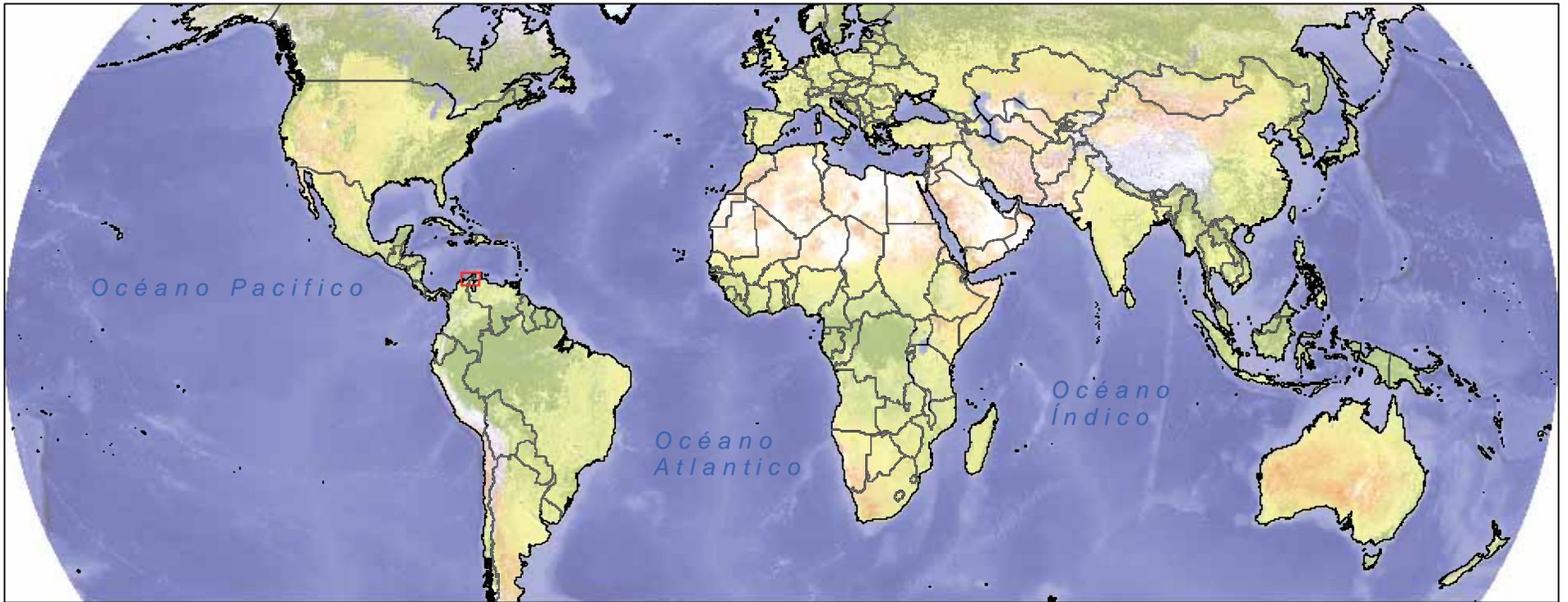
- Polo Acuña, J. (2011). *Territorios indígenas y estatales en la península de La Guajira (1830-1850)*. *Historia social del Caribe colombiano. Territorios, indígenas, trabajadores, cultura, memoria e historia*. Medellín: La Carreta Editores.
- PROGRAMME, U. N. E. (1992). *World Atlas of Desertification* (A. E. Ed.).
- Puigdefabregas, J., del Barrio, G., Boer, M. M., Gutierrez, L., & Sole, A. (1998). Differential responses of hillslope and channel elements to rainfall events in a semi-arid area. *Geomorphology*, 23(2), 337-351.
- Rasemann, S., Schmidt, J., Schrott, L., & Dikau, R. (2004). Geomorphometry in mountain terrain. *GIS & Mountain Geomorphology*. Springer, Berlin, 101-145.
- Redell P, D. H., Dommergues YR. (1991). Use of actinorhizal plants in arid and semiarid environments. In S. J (Ed.), *Semiarid Lands and Deserts: Soil Resource and Reclamation* (pp. 469): Dekker.
- Rhoads, B. L., & Thorn, C. E. (1996). *The scientific nature of geomorphology: proceedings of the 27th Binghamton Symposium in Geomorphology, held 27-29 September, 1996* (Vol. 27): Bruce Rhoads.
- Rietkerk, M., Dekker, S. C., de Ruiter, P. C., & van de Koppel, J. (2004). Self-organized patchiness and catastrophic shifts in ecosystems. *Science*, 305(5692), 1926-1929.
- Rietkerk, M., Ketner, P., Burger, J., Hoorens, B., & Olf, H. (2000). Multiscale soil and vegetation patchiness along a gradient of herbivore impact in a semi-arid grazing system in West Africa. *Plant Ecology*, 148(2), 207-224.
- Rietkerk, M., & Van de Koppel, J. (2008). Regular pattern formation in real ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(3), 169-175.
- Saco, P., Willgoose, G., & Hancock, G. (2007). Eco-geomorphology of banded vegetation patterns in arid and semi-arid regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(6), 1717-1730.
- Sala, O. E., & Aguiar, M. R. (1996). Origin, maintenance, and ecosystem effect of vegetation patches in arid lands. *Rangelands in a sustainable biosphere*, 2, 29-32.
- Sarmiento, G. (1975). The dry plant formations of South America and their floristic connections. *Journal of Biogeography*, 233-251.
- Schlesinger, W., & Pilmanis, A. (1998). Plant-soil Interactions in Deserts. *Biogeochemistry*, 42(1-2), 169-187. doi: 10.1023/A:1005939924434
- Schlesinger, W. H., Abrahams, A. D., Parsons, A. J., & Wainwright, J. (1999). Nutrient losses in runoff from grassland and shrubland habitats in Southern New Mexico: I. Rainfall simulation experiments. *Biogeochemistry*, 45(1), 21-34.
- Schlesinger, W. H., & Pilmanis, A. M. (1998). Plant-soil interactions in deserts *Plant-induced soil changes: Processes and feedbacks* (pp. 169-187): Springer.
- Schlesinger, W. H., Reynolds, J. F., Cunningham, G. L., Huenneke, L., Jarrell, W., Virginia, R., & Whitford, W. (1990). Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 247(4946), 1043-1048.
- Schlesinger, W. H., Ward, T., & Anderson, J. (2000). Nutrient losses in runoff from grassland and shrubland habitats in southern New Mexico: II. Field plots. *Biogeochemistry*, 49(1), 69-86.
- Schmidt, J., Dikau, R., (1999). *Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models — semantics, methods, future needs*. Schweizbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Shary, P. A., Sharaya, L. S., & Mitusov, A. V. (2002). Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 107(1), 1-32.
- Sherratt, J. A., & Lord, G. J. (2007). Nonlinear dynamics and pattern bifurcations in a model for vegetation stripes in semi-arid environments. *Theoretical population biology*, 71(1), 1-11.

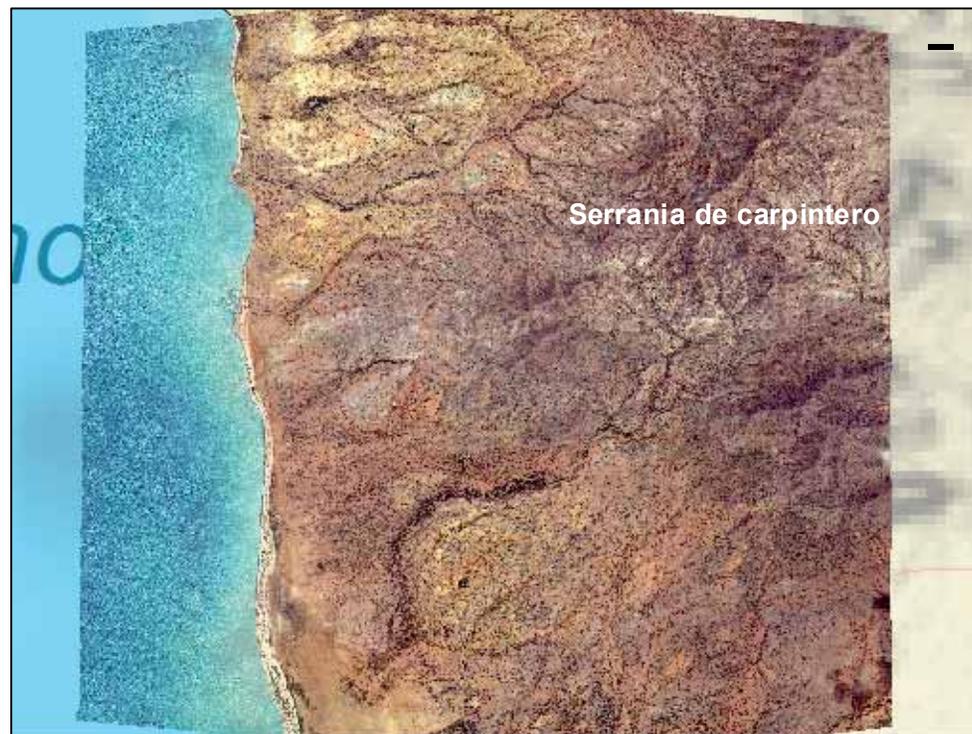
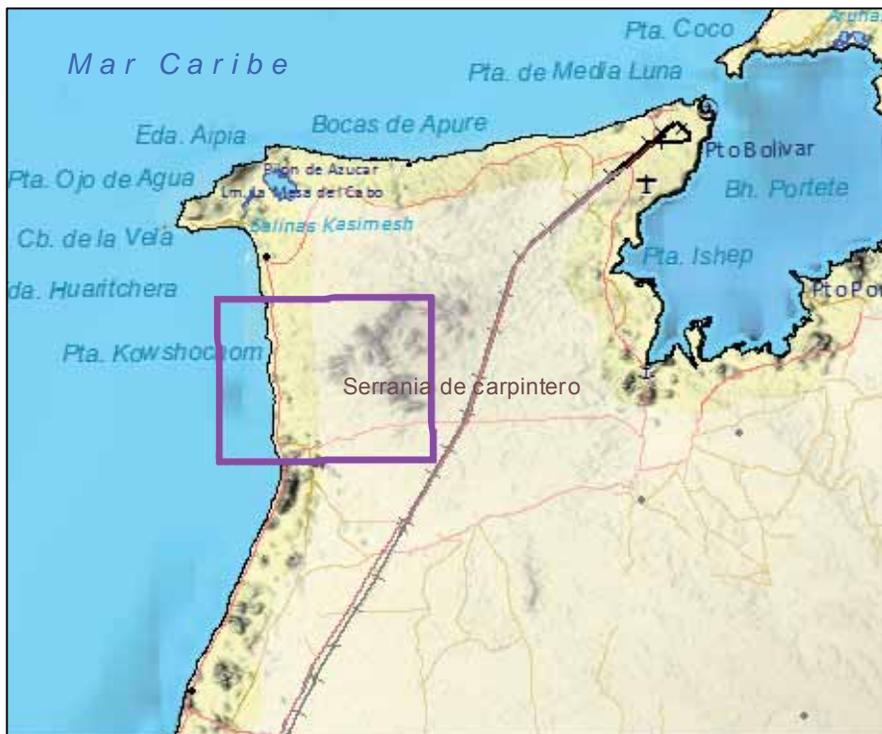
- Short, A. D. (2010). Sediment Transport around Australia—Sources, Mechanisms, Rates, and Barrier Forms. *Journal of Coastal Research*, 395-402. doi: 10.2112/08-1120.1
- Slatyer, R. O. (1959). *Methodology of a water balance study conducted on a desert woodland (acacia aneura f. muell.) community in central Australia*. Paper presented at the Symposium on Plant-Water Relationships in Arid and Semi-arid Conditions, Madrid.
- Smiley, T. L., & Zumberge, J. H. (1971). Polar deserts. *Science*, 174((4004)), 79–80.
- Sole, A., Calvo, A., Cerda, A., La, R., Pini, R., & Barbero, J. (1997). Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related processes in badlands from Tabernas (SE Spain). *Catena*, 31(1), 23-38.
- Soriano, A., Sala, O. E., & Perelman, S. B. (1994). Patch structure and dynamics in a Patagonian arid steppe. *Vegetatio*, 111(2), 127-135.
- Speight, J. G. (1977). *Parametric description of land form* (Vol. 32). Melbourne,.
- Stadler, S. J. (2005). Aridity indexes. In J. E. Oliver (Ed.), *Encyclopedia of world climatology* (pp. 89–94). Heidelberg: Springer.
- Stockwell, D. (1999). The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, 13(2), 143-158. doi: 10.1080/136588199241391
- Stockwell, D. R. B., & Noble, I. R. (1992). Induction of sets of rules from animal distribution data: A robust and informative method of data analysis. *Mathematics and Computers in Simulation*, 33(5–6), 385-390. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0378-4754\(92\)90126-2](http://dx.doi.org/10.1016/0378-4754(92)90126-2)
- Stroosnijder, L. (1996). Modelling the effect of grazing on infiltration, runoff and primary production in the Sahel. *Ecological modelling*, 92(1), 79-88.
- Suzan, H., Nabhan, G. P., & Patten, D. T. (1994). Nurse plant and floral biology of a rare night-blooming cactus, *Peniocereus striatus* (Brandege) F. Buxbaum. *Conservation Biology*, 8(2), 461-470.
- Suzán, H., Nabhan, G. P., & Patten, D. T. (1996). The importance of *Olneya tesota* as a nurse plant in the Sonoran Desert. *Journal of Vegetation Science*, 7(5), 635-644.
- Taxonomy, S. (20014). Keys to Soil Taxonomy. *US Department. of Agriculture and Natural Resources Conservation Service, SW, USDA, Washington, DC, 20250-29410*.
- Thompson, R. D. (1975). The climatology of arid world. *University of Reading Department of Geography Paper 35*, 39.
- Thorn, C. E. (1988). *An Introduction to Theoretical Geomorphology*. Boston: Unwin Hyman.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.
- Tobler, W. (1976). Analytical cartography. *The American Cartographer*, 3(1), 21-31.
- Tobler, W. (2000). The development of analytical cartography: A personal note. *Cartography and Geographic Information Science*, 27(3), 189-194.
- Tongway, D. J., & Ludwig, J. A. (1990). Vegetation and soil patterning in semi-arid mulga lands of Eastern Australia. *Australian Journal of Ecology*, 15(1), 23-34. doi: 10.1111/j.1442-9993.1990.tb01017.x
- Toutin, T. e. Y. C. (1989). La multi-stereoscopie pour les corrections des images SPOT HRV. *Canadian Journal or Remote Sensing*, 15 (2), 110-119.
- Tricart, J. (1982). *La eco-geografía y la ordenación del medio natural*: Barcelona, ES: Edit. Anagrama.
- Troeh FR, T. L. (1993). *Soils and soil fertility*. New York: Oxford University Press.
- United Nations Educational, S. a. C. O. U. (1979). *Map of the world distribution of arid regions*. Paris: UNESCO.
- Ursino, N. (2005). The influence of soil properties on the formation of unstable vegetation patterns on hillsides of semiarid catchments. *Advances in water resources*, 28(9), 956-963.

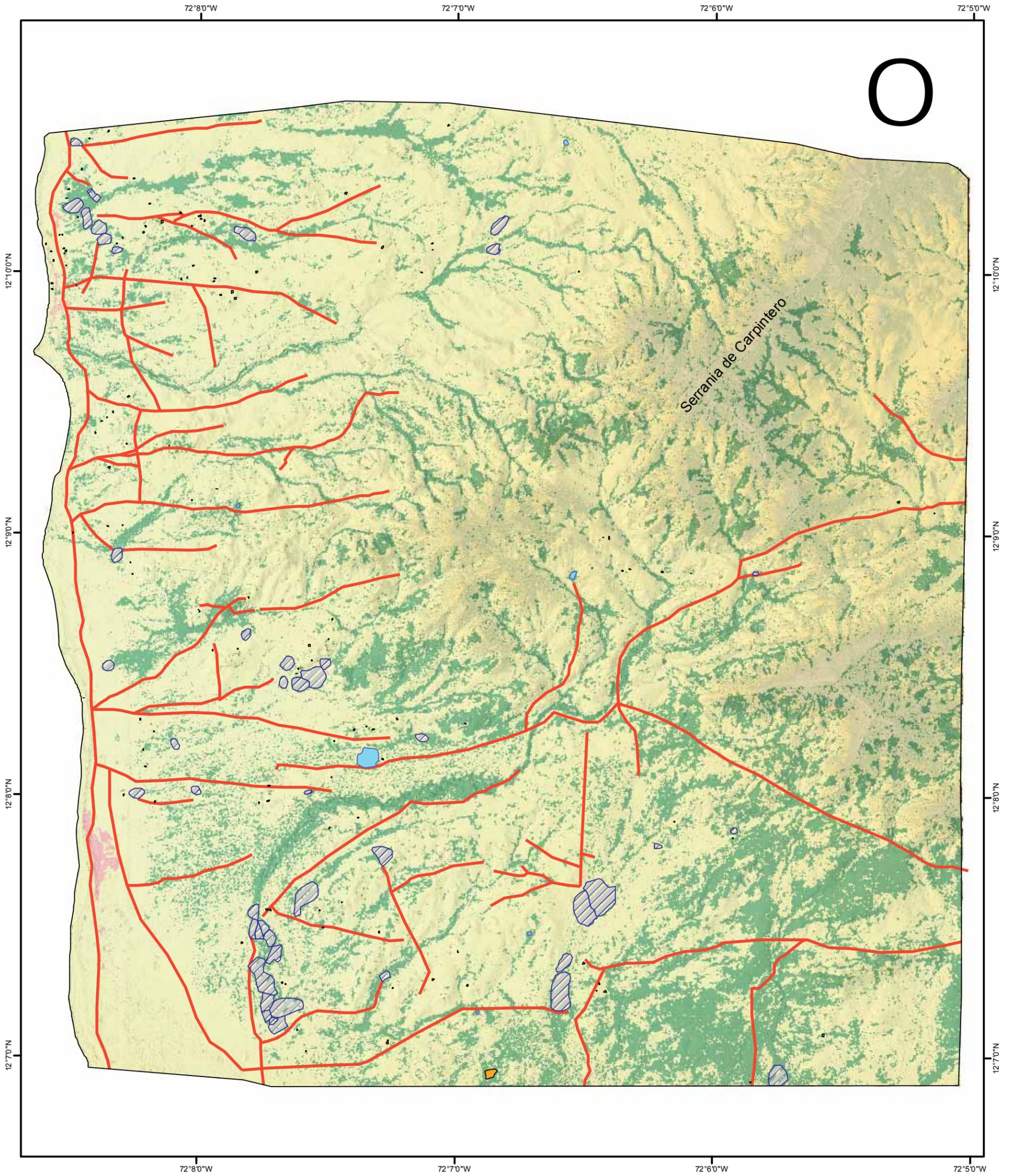
- Ursino, N., & Contarini, S. (2006). Stability of banded vegetation patterns under seasonal rainfall and limited soil moisture storage capacity. *Advances in water resources*, 29(10), 1556-1564.
- Valentin, C., & d'Herbès, J.-M. (1999). Niger tiger bush as a natural water harvesting system. *Catena*, 37(1), 231-256.
- Vargas Rojas, R., Arias Jiménez, A., Straaten, P. v., Lavelle, P., Zonn, S., Ibish, P., . . . Vessel, A. (2009). *Guía para la descripción de suelos*: FAO, Roma (Italia).
- Villota, H. (1992). El sistema CIAF de clasificación fisiográfica del terreno. *Revista CIAF*, 13, 55-70.
- Von Hardenberg, J., Meron, E., Shachak, M., & Zarmi, Y. (2001). Diversity of vegetation patterns and desertification. *Physical Review Letters*, 87(19), 198101.
- Walton, K. (1969). *The arid zones*: Transaction Publishers.
- Wallace, J., & Holwill, C. (1997). Soil evaporation from tiger-bush in south-west Niger. *Journal of Hydrology*, 188, 426-442.
- Warren, A. (1973). Some vegetation patterns in the Republic of the Sudan - a discussion. *Geoderma*, 9(1), 75-78. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061\(73\)90041-4](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061(73)90041-4)
- Watt, A. S. (1947). Pattern and Process in the Plant Community. *Journal of Ecology*, 35(1/2), 1-22. doi: 10.2307/2256497
- Weiss, A. (2001). Topographic Position and Landforms Analysis. *ESRI User Conference 2001*.
- West P, N. G., Suzan H, Monti L. (2000). *Ironwood diversity study*. Tucson.
- White, D. C., & Lewis, M. M. (2011). A new approach to monitoring spatial distribution and dynamics of wetlands and associated flows of Australian Great Artesian Basin springs using QuickBird satellite imagery. *Journal of Hydrology*, 408(1-2), 140-152. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.032>
- White, L. (1969). Vegetation arcs in Jordan. *The Journal of Ecology*, 461-464.
- White, L. (1970). Brousse tigrée patterns in southern Niger. *The Journal of Ecology*, 549-553.
- Whitford, W. G. (2002). *Ecology of desert systems*: Academic Press.
- Wickens, G., & Collier, F. (1971). Some vegetation patterns in the Republic of the Sudan. *Geoderma*, 6(1), 43-59.
- Wickens, G. E., & Collier, F. W. (1971). Some vegetation patterns in the Republic of the Sudan. *Geoderma*, 6(1), 43-59. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061\(71\)90050-4](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7061(71)90050-4)
- Wiernga, J. (1993). Representative roughness parameters for homogeneous terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 63(4), 323-363. doi: 10.1007/bf00705357
- Wilson, J. P., Gallant, J.C. (2000). *Terrain analysis: principles and applications*: John Wiley & Sons.
- Worrall, G. (1959). The Butana grass patterns. *Journal of Soil Science*, 10(1), 34-53.
- Worrall, G. (1960). Patchiness in vegetation in the northern Sudan. *The Journal of Ecology*, 107-115.
- Yair, A. (1990). Runoff generation in a sandy area—the Nizzana sands, Western Negev, Israel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15(7), 597-609.
- Yetemen, O., Istanbuluoglu, E., & Vivoni, E. R. (2010). The implications of geology, soils, and vegetation on landscape morphology: Inferences from semi-arid basins with complex vegetation patterns in Central New Mexico, USA. *Geomorphology*, 116(3-4), 246-263. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.11.026>
- Zapata, V. (2010). *Estratigrafía de las unidades sedimentarias del Paleogeno superior y neogeno en la Alta guajira. Colombia*. (Master), Universidad Nacional de Colombia.
- Zinck, J. (1988). Physiography and soils. *ITC Lecture Notes SOL*, 41, 1988.
- Zinck, J. (2012). Geopedología *Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. ITC. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente, The Netherlands.

# ANEXOS

---







- |   |              |   |                 |
|---|--------------|---|-----------------|
|  | Corral 65    |  | Arbustal        |
|  | Rancheria 65 |  | Suelo desnudo   |
|  | jaguey 65    |  | Vegetación baja |
|  | Carminos 65  |   |                 |

**COBERTURA Y CAPAS DE  
USO DEL SUELO PARA 1965**

Elaborado: Jose Eduardo Fuentes D  
Fuente Base: Eros B DSM, DTM, Base Cartográfica IGAC  
Proyección Magna Srgas Este  
Fuente Temática: Campo 2014, 2012

0 0,15 0,3 0,6  
km  
1:27.000

72°80'W

72°70'W

72°60'W

72°50'W

12°10'00"N

12°90'00"N

12°80'00"N

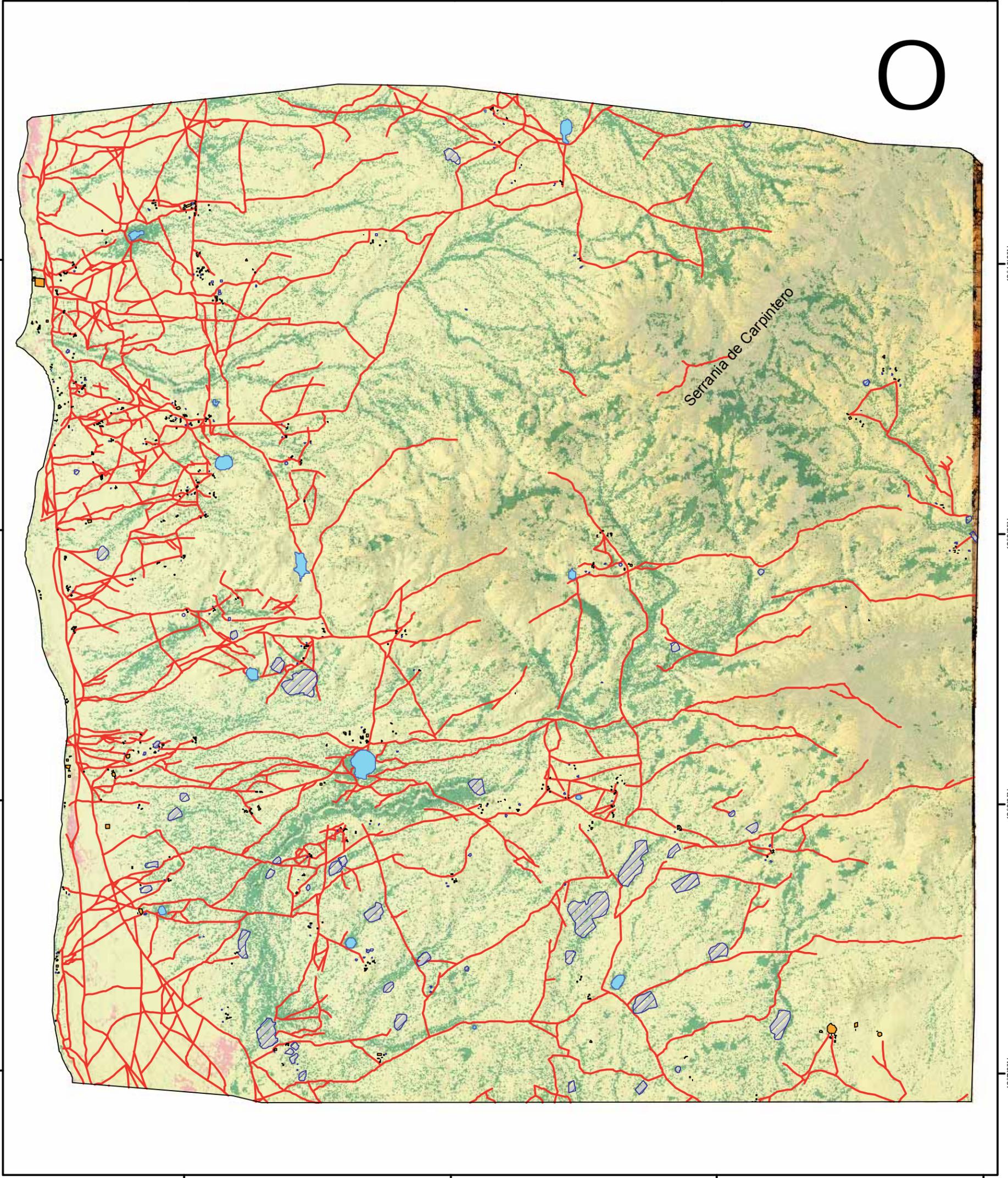
12°70'00"N

12°10'00"N

12°90'00"N

12°80'00"N

12°70'00"N

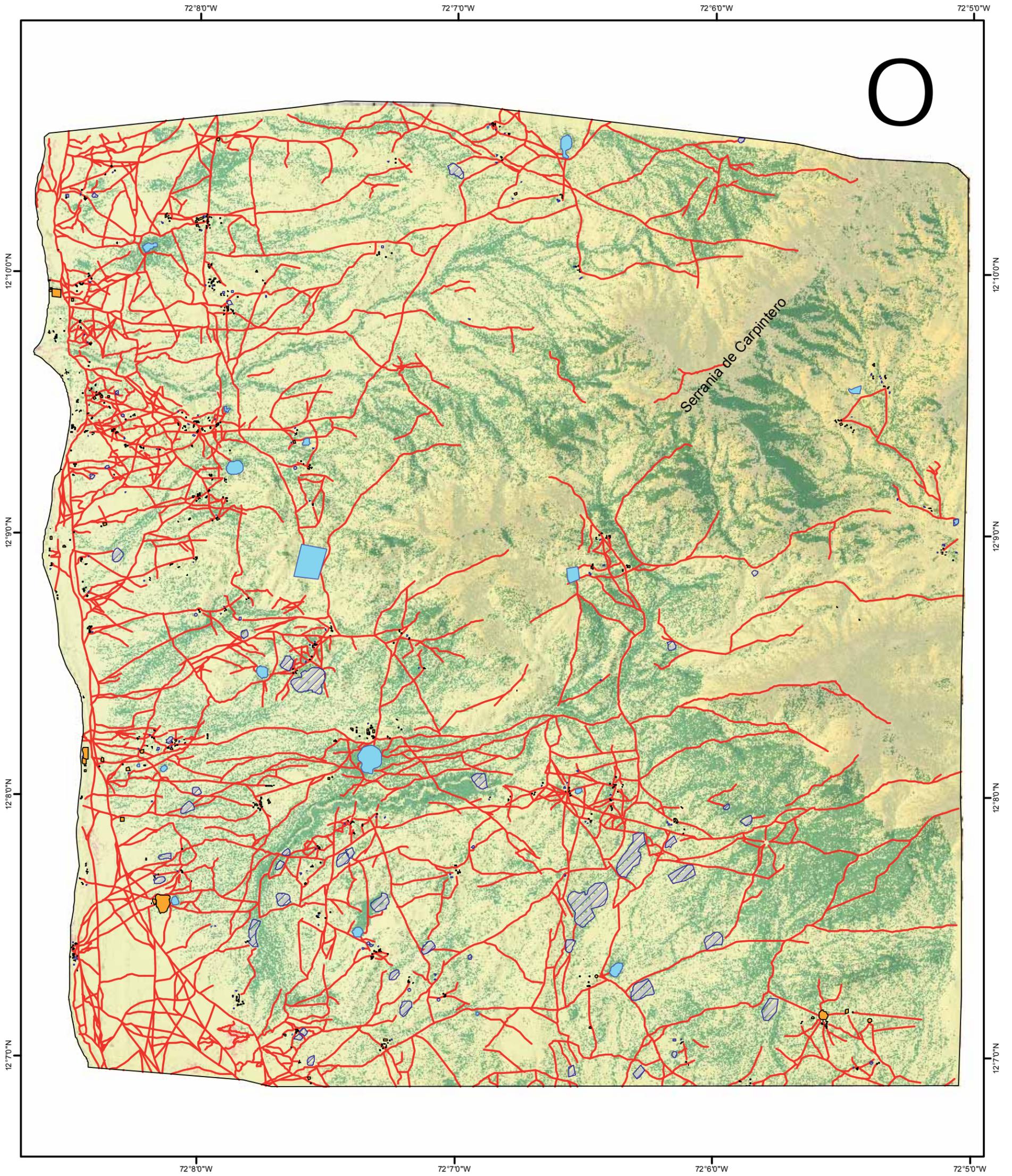


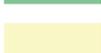
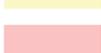
-  Corral 07
-  Rancheria 07
-  jaguey 07
-  Carminos 07
-  Arbustal
-  Suelo desnudo
-  Vegetacion baja

### COBERTURA Y CAPAS DE USO DEL SUELO PARA 2007

Elaborado: Jose Eduardo Fuentes D  
Fuente Base: Eros B DSM, DTM, Base Cartográfica IGAC  
Proyección Magna Srgas Este  
Fuente Temática: Campo 2014, 2012

0 0,15 0,3 0,6 km  
1:27.000

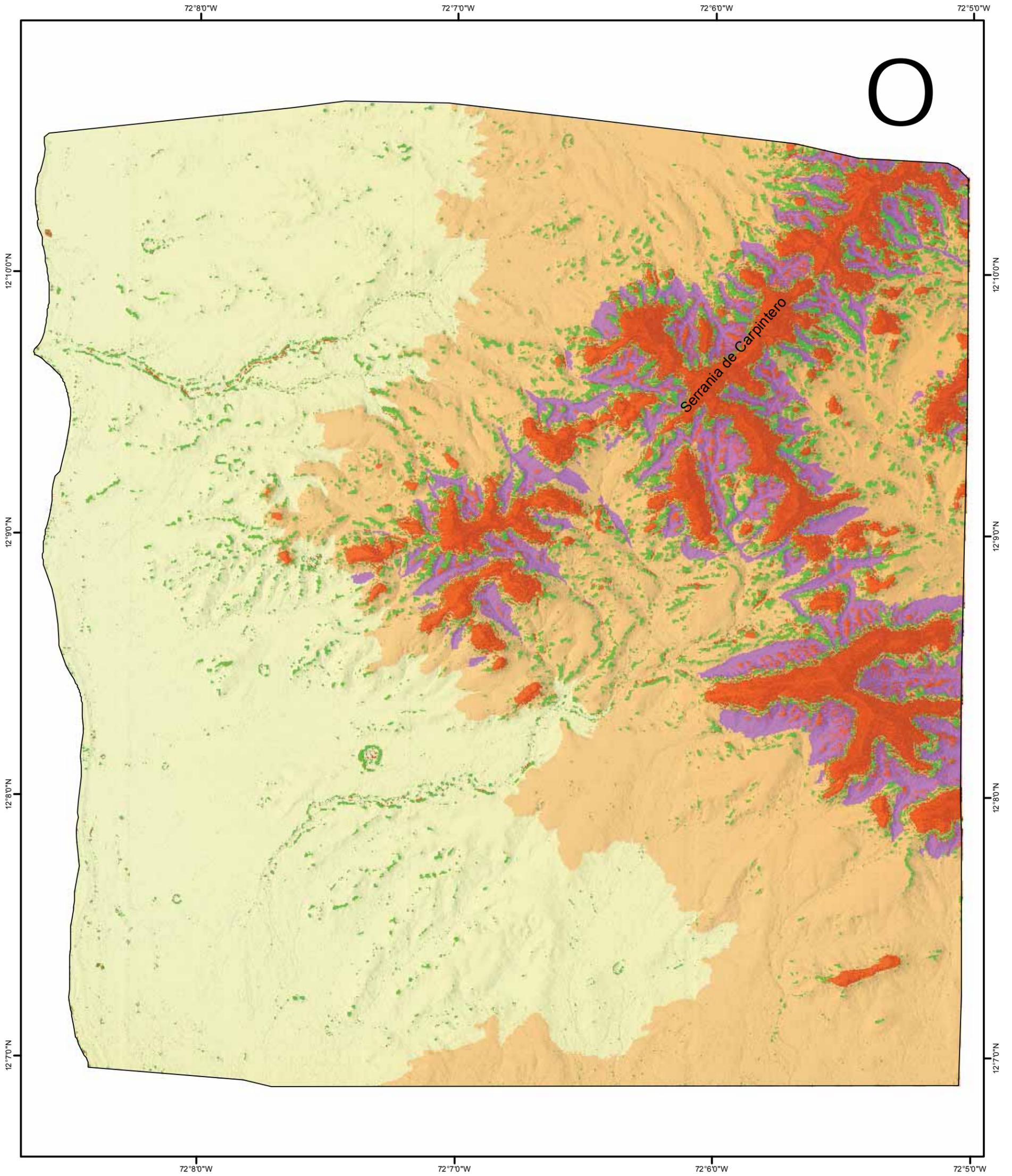


- |   |              |   |                 |
|---|--------------|---|-----------------|
|  | Corral 13    |  | Arbustal        |
|  | Rancheria 13 |  | Suelo desnudo   |
|  | jaguey 13    |  | Vegetación baja |
|  | Carminos 13  |   |                 |

**COBERTURA Y CAPAS DE  
USO DEL SUELO PARA 2013**

Elaborado: Jose Eduardo Fuentes D  
Fuente Base: Eros B DSM, DTM, Base Cartográfica IGAC  
Proyección Magna Srgas Este  
Fuente Temática: Campo 2014, 2012

0 0,15 0,3 0,6  
km  
1:27.000

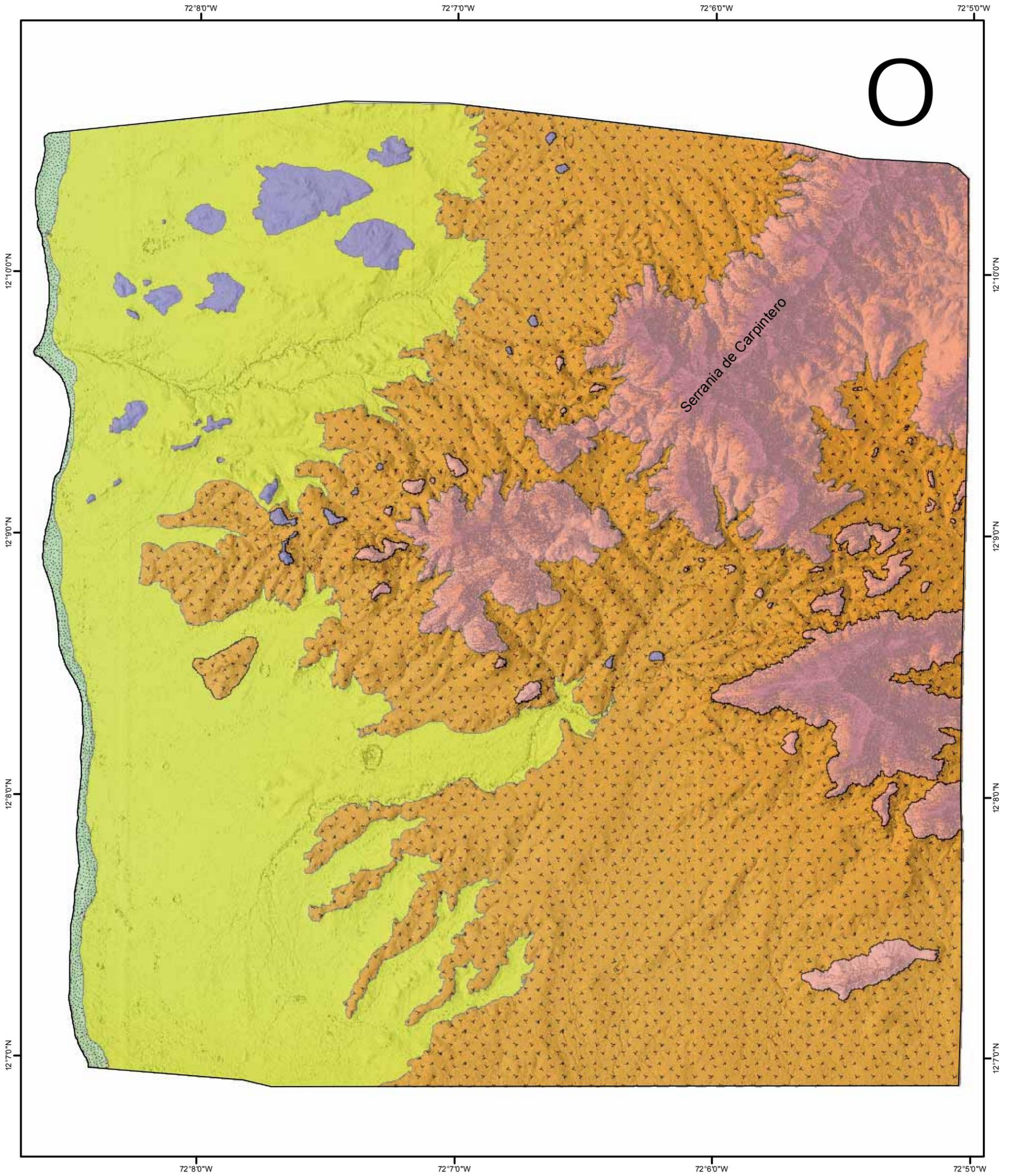


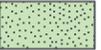
- |   |                |   |            |
|---|----------------|---|------------|
|  | Pendiente alta |  | Pendiente  |
|  | Depresion      |  | Monticulos |
|  | Zona Plana     |   |            |

**MAPA Topographic Position Index (TPI)**

Elaborado: Jose Eduardo Fuentes D  
 Fuente Base: Eros B DSM, DTM, Base Cartográfica IGAC  
 Proyección Magna Srgas Este  
 Fuente Temática: Campo 2014, 2012

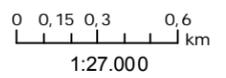
0 0,15 0,3 0,6  
 km  
 1:27.000

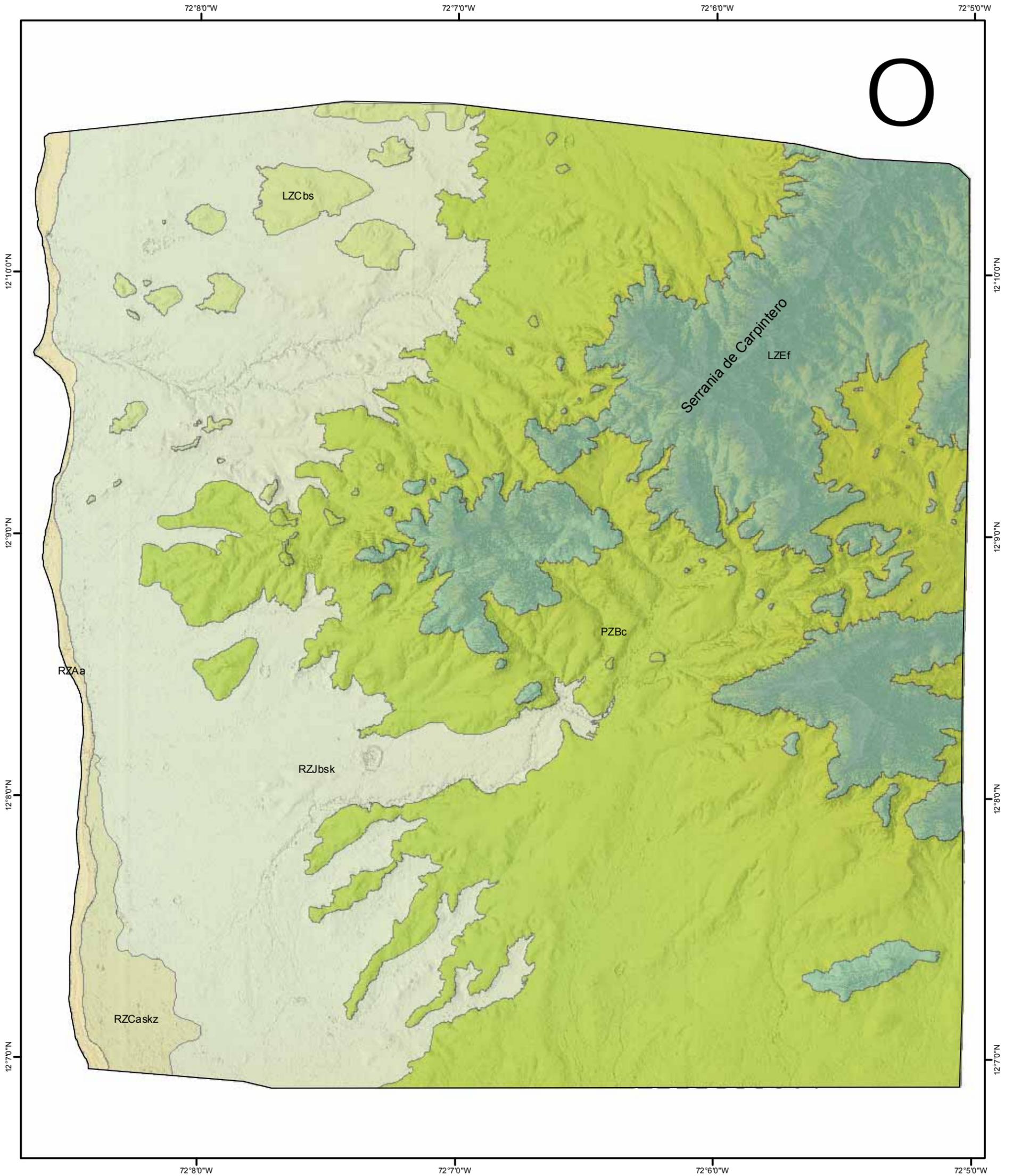


- |   |                       |   |        |
|---|-----------------------|---|--------|
|  | Glacis                |  | Playa  |
|  | Llanura costera       |  | Sierra |
|  | Monticulos (lomerios) |   |        |

**MAPA GEOMORFOLOGICO**

Elaborado: Jose Eduardo Fuentes D  
 Fuente Base: Eros B DSM, DTM, Base Cartográfica IGAC  
 Proyección Magna Srgas Este  
 Fuente Temática: Campo 2014, 2012



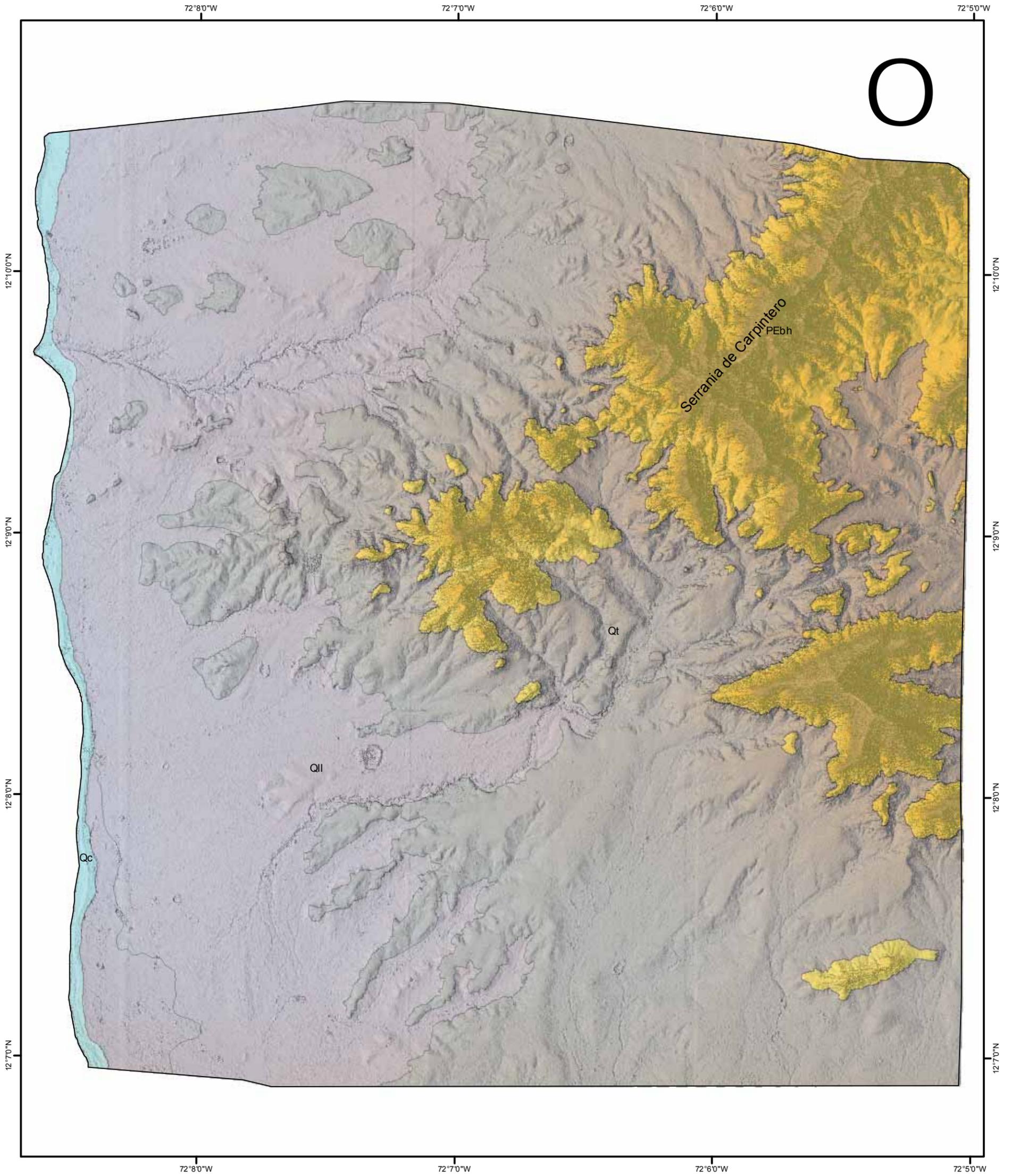


- LZCbs, Sodic Haplocambids
- LZEf, Lithic Torriorthents
- PZBc, Typic Haplocalcids
- RZAa, Typic Torripsamments
- RZCaskz, Typic Aquisalids
- RZJbsk, Typic Haplocambids

**MAPA AJUSTADO DE SUELOS**

Elaborado: Jose Eduardo Fuentes D  
 Fuente Base: Eros B DSM, DTM, Base Cartográfica IGAC  
 Proyección Magna Srgas Este  
 Fuente Temática: Campo 2014, 2012

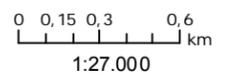
0 0,15 0,3 0,6  
 km  
 1:27.000

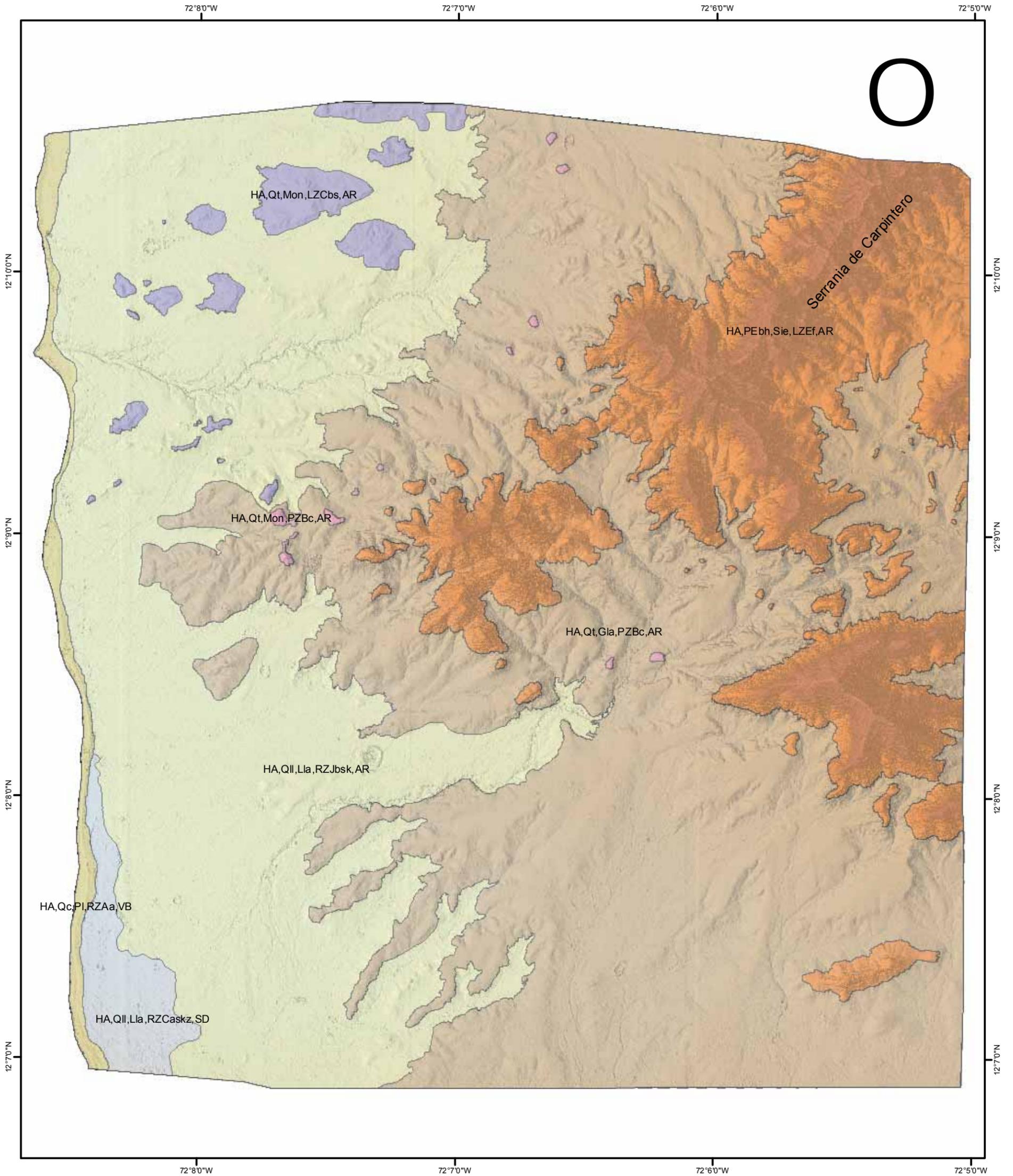


- PEbh, Grupo Bahia Honda
- Qc, Depositos costeros de playón y barra
- QII, Depositos de llanuras aluviales
- Qt, Terrazas Aluviales Deposito de Grava

**MAPA AJUSTADO DE GEOLOGIA**

Elaborado: Jose Eduardo Fuentes D  
 Fuente Base: Eros B DSM, DTM, Base Cartográfica IGAC  
 Proyección Magna Srgas Este  
 Fuente Temática: Campo 2014, 2012

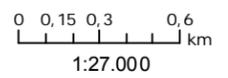


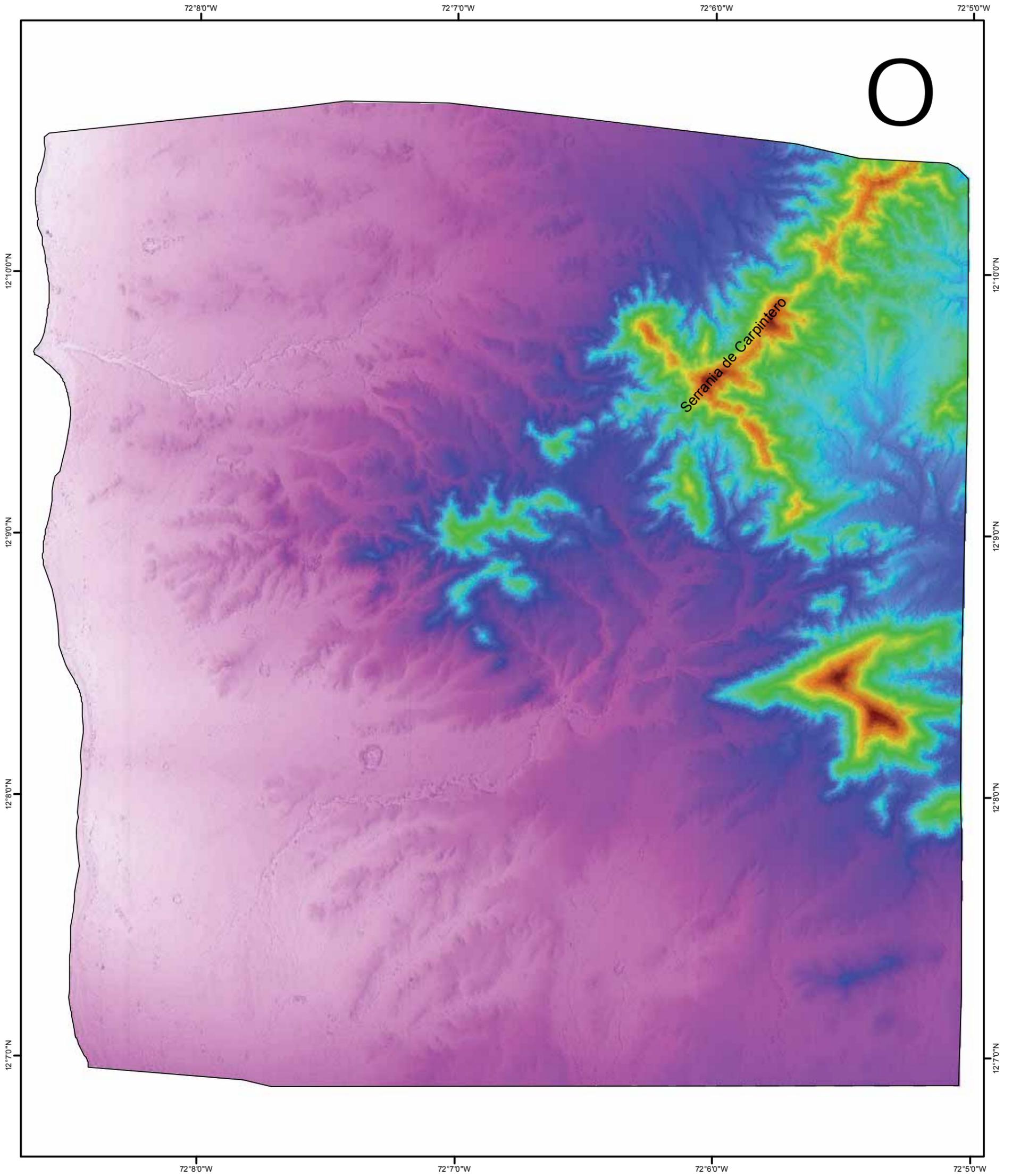


- |   |  |
|---|--|
|  HA,PEbh,Sie,LZEf,AR   |  HA,Qt,Gla,PZBc,AR  |
|  HA,Qc,PI,RZAa,VB      |  HA,Qt,Mon,LZCbs,AR |
|  HA,QII,Lla,RZCaskz,SD |  HA,Qt,Mon,PZBc,AR  |
|  HA,QII,Lla,RZJbsk,AR  |  |

**MAPA UNIDADES DE PAISAJE**

Elaborado: Jose Eduardo Fuentes D  
 Fuente Base: Eros B DSM, DTM, Base Cartográfica IGAC  
 Proyección Magna Srgas Este  
 Fuente Temática: Campo 2014, 2012



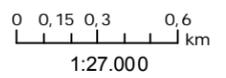


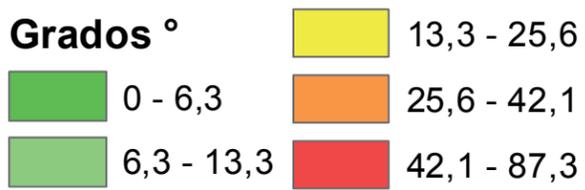
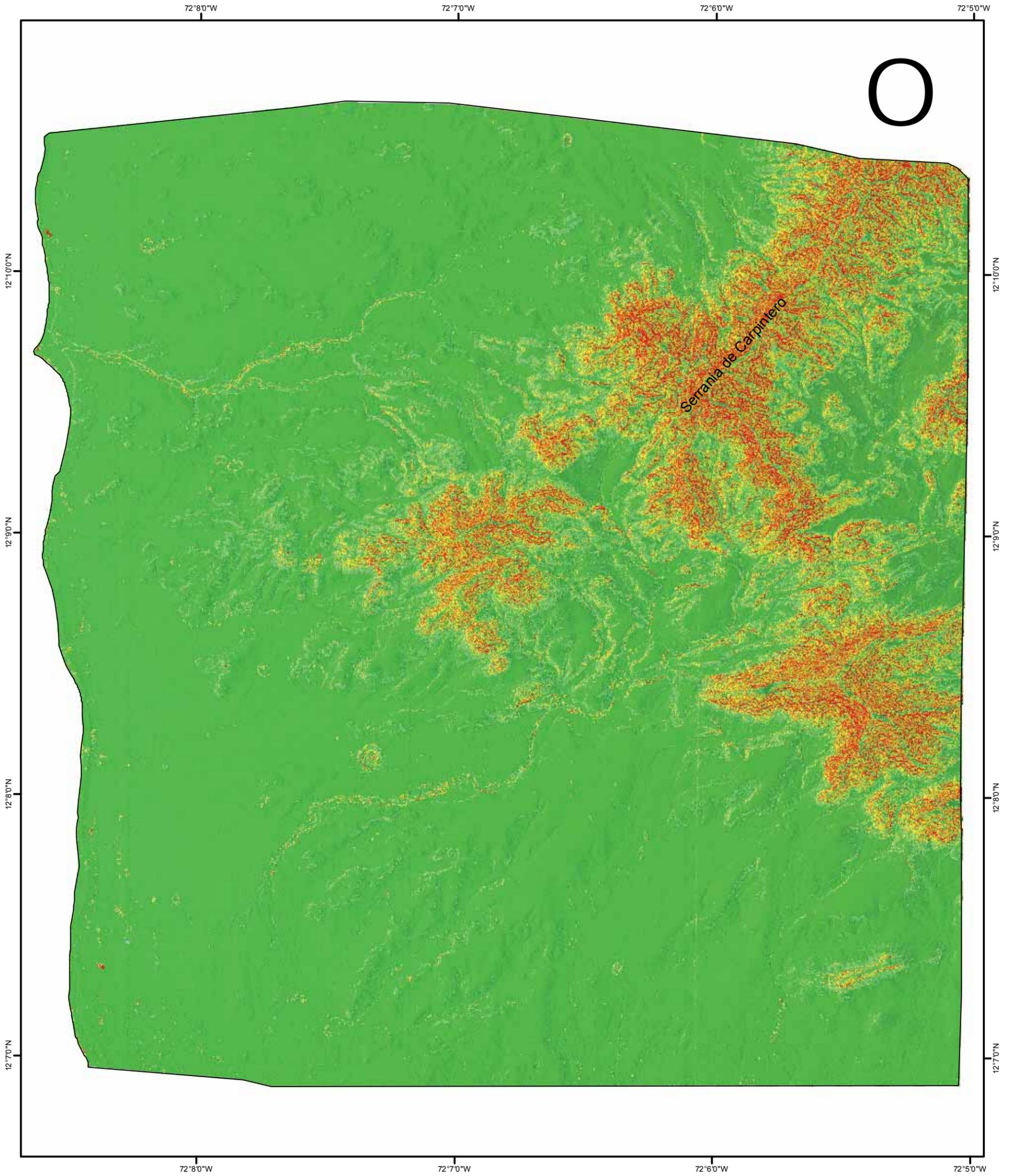
Serranía de Carpintero



**MODELO DE ELEVACION**

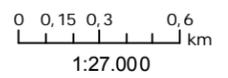
Elaborado: Jose Eduardo Fuentes D  
 Fuente Base: Eros B DSM, DTM, Base Cartográfica IGAC  
 Proyección Magna S'rgas Este  
 Fuente Temática: Campo 2014, 2012





**MODELO DE PENDIENTES**

Elaborado: Jose Eduardo Fuentes D  
 Fuente Base: Eros B DSM, DTM, Base Cartográfica IGAC  
 Proyección Magna Srgas Este  
 Fuente Temática: Campo 2014, 2012



72°80'W

72°70'W

72°60'W

72°50'W



12°10'00"N

12°10'00"N

12°90'00"N

12°90'00"N

12°80'00"N

12°80'00"N

12°70'00"N

12°70'00"N

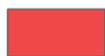
72°80'W

72°70'W

72°60'W

72°50'W

Serranía de Carpintero



Bajo



Moderado



Alto

### ÍNDICE DE HUMEDAD TOPOGRÁFICA

Elaborado: Jose Eduardo Fuentes D  
Fuente Base: Eros B DSM, DTM, Base Cartográfica IGAC  
Proyección Magna S'rgas Este  
Fuente Temática: Campo 2014, 2012

0 0,15 0,3 0,6 km

1:27.000

72°80'W

72°70'W

72°60'W

72°50'W



12°10'0"N

12°10'0"N

12°90'0"N

12°90'0"N

12°80'0"N

12°80'0"N

12°70'0"N

12°70'0"N

72°80'W

72°70'W

72°60'W

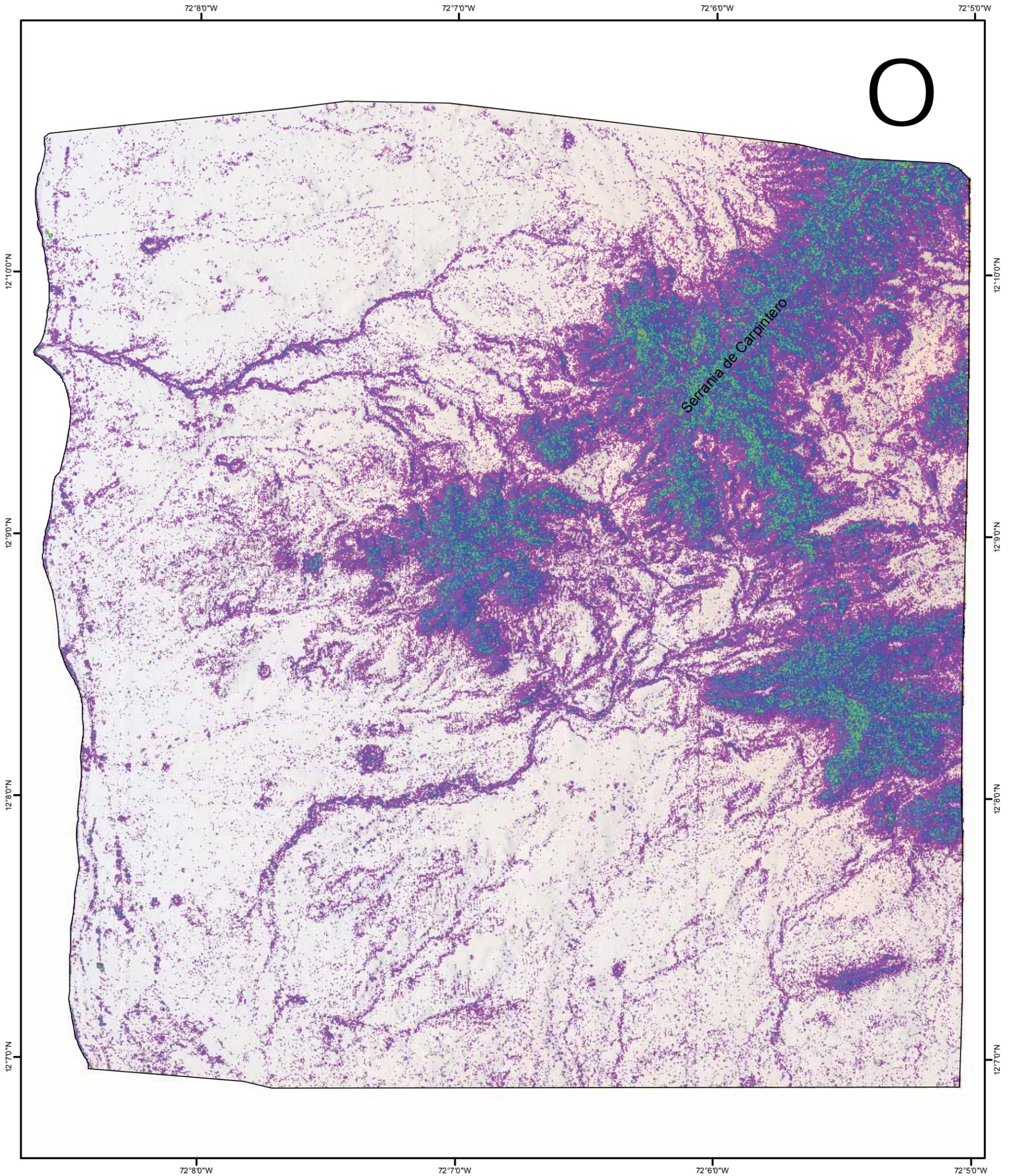
72°50'W

-  Carminos 65
-  Carminos 07
-  Carminos 13

### MAPA DE CAMINOS MULTITEMPORAL

Elaborado: Jose Eduardo Fuentes D  
Fuente Base: Eros B DSM, DTM, Base Cartográfica IGAC  
Proyección Magna Srgas Este  
Fuente Temática: Campo 2014, 2012

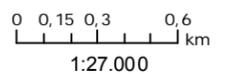
0 0,15 0,3 0,6 km  
1:27.000



- |   |                  |   |            |
|---|------------------|---|------------|
|  | Mar              |  | Rugoso     |
|  | Liso             |  | Muy rugoso |
|  | Abierto          |  | Cerrado    |
|  | Abierto - Rugoso |   |            |

**ÍNDICE DE RUGOSIDAD DEL TERRENO**

Elaborado: Jose Eduardo Fuentes D  
 Fuente Base: Eros B DSM, DTM, Base Cartográfica IGAC  
 Proyección Magna Srgas Este  
 Fuente Temática: Campo 2014, 2012



# DISTRIBUCIÓN DEL PATRÓN ESPACIAL TIPO LEOPARDO EN REGIONES ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS DEL MUNDO

José Fuentes Delgado<sup>1</sup>

Diego Varga Linde<sup>2,3</sup>

Martí Boada Junca<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geografía. Universidad Autónoma de Barcelona

<sup>2</sup>Departamento de Geografía. Universidad de Girona

<sup>3</sup>Instituto de Ciencia y Tecnología Ambiental. Universidad Autónoma de Barcelona  
mcfuentes2@hotmail.com, diego.varga@udg.edu, diego.varga@uab.cat, marti.boada@uab.cat

## RESUMEN

Este artículo analiza la generación de un mapa de distribución potencial del patrón espacial leopardo y del entorno asociado a su desarrollo en las zonas áridas y semiáridas. A partir de Información bibliográfica alrededor del mundo y de datos de campo obtenidos en Colombia y España, para ello se caracterizan los factores utilizando predictores ambientales globales en conjunto con un modelo de máxima entropía. En el modelo de distribución, las condiciones ambientales indican que la aridez y la variabilidad topográfica, son factores de peso que tiene una gran valor en las estadísticas que definen los patrones, revelando una extensa distribución de ambientes distintivos nuevos al alrededor del mundo, así como el fenómeno asociado de convergencia evolutiva y de algunos géneros vegetales predominantes en varios continentes a los que se puede asociar este patrón.

**Palabras clave:** Patrón leopardo, Maxent, Convergencia evolutiva, Zonas áridas.

## ABSTRACT

This paper analyzes the creation of the potential distribution map of the spatial leopard pattern and the environment in relationship to its development in arid and semiarid areas.

---

Fecha de recepción: mayo 2014.

Fecha de aceptación: abril 2015.

The information was based on bibliographic information from places around the world and field data obtained in Colombia and Spain. The factors are characterized using global environmental predictors in conjunction with a maximum entropy model. In the model of distribution, the environmental conditions indicate that the aridity and topographic variability are significant factors that have a great influence on the statistics that define patterns, thus revealing a widespread distribution of new distinctive environments around the world, as well as the associated convergent evolution and some dominant plant genera in several continents to which you can associate this pattern.

**Keywords:** Leopard pattern, Maxent, Convergent evolution, Drylands.

## I. INTRODUCCIÓN

En las áreas áridas y semi áridas del mundo (Meigg, 1953) durante los últimos 50 años, se ha evidenciado la presencia de patrones espaciales a escala regional y local, en el que la vegetación forma patrones regulares (Slatyer, 1959; Warren, 1973; Worral, 1959), estos pueden ser observados principalmente desde sensores remotos montados sobre plataformas satelitales o aerotransportadas. El avance en las tecnologías de percepción remota significa que el mapeo y monitoreo mediante imágenes de satélite es ahora factible y rentable (White, 2011). Con el constante y mayor aumento de la cobertura y resolución espacial de la información cartográfica, se ha podido vislumbrar con más detalle a un nivel global la presencia de estos comportamientos en la distribución de la vegetación, los patrones consisten principalmente en una matriz heterogénea de cobertura vegetal baja que aparentemente ha sido desestabilizada con la consecuente ruptura del sistema matricial, ésta cubierta vegetal subsecuente revela zonas de suelos desnudos o claros de tierra y zonas con vegetación espaciada de manera regular, generalmente de porte bajo o intercala con porte un poco más alto de vegetación, las áreas son homogéneas en su composición desde el punto de vista de suelos, vegetación y clima circundante. Dentro de la zonas con vegetación se puede presumir una mayor capacidad de desarrollo de las plantas por el fenómeno de isla de fertilidad; isla fértil o parches fértiles (Schlesinger, 1990; García, 1970) así como la influencia de la teoría de islas; respecto al equilibrio y dinamismo (MacArthur, 1967) de las especies vegetales presentes en los parches, en el cual los lugares donde se sitúa la vegetación tienen una mayor cantidad de nutrientes dentro del suelo y disponibilidad de humedad, facilitando el desarrollo en estos espacios en contra posición a los lugares donde hay ausencia de la vegetación. En algunos ecosistemas, los parches densos forman bandas o rayas y las comunidades que presentan este patrón se denominan genéricamente como bandas o «patrón tigre». En otros ecosistemas, los parches de vegetación densa son irregulares en forma siguiendo la analogía anterior, aquí se conocen como manchas de vegetación o «patrón leopardo» (Aguilar, 1999). Los patrones espaciales en la vegetación de zonas áridas y semi áridas, se produce en forma de rayas (arbusto tigre - Tiger bush), laberintos, puntos (arbusto leopardo - Leopard bush) y lagunas (Rietkerk, 2008). Se caracterizan por un espaciamiento regular entre los parches de vegetación y pueden abarcar cientos o miles de kilómetros cuadrados de zonas áridas o desérticas (Figura 1).

La mayoría de los estudios en la bibliografía se han centrado en el caso de las franjas o rayas conocidas como Tiger Bush por su nombre en inglés, muy pocos han sido los estudios que abordan el patrón de manchas o espacios de vegetación denominado leopardo, gran parte de los análisis de patrones espacio-temporales ha sido a través de simulaciones numéricas (Borgogno, 2009), existe un modelo de distribución mundial de patrones periódicos de la vegetación en zonas áridas y semi áridas en el cual intentan aislar la causalidad de todos los patrones en conjunto no haciendo distinción entre ellos y a una escala global poco detallada (Deblauwe, 2008). A causa de la poca investigación y análisis experimentales en este campo, todavía se desconocen los procesos que controlan la formación y el desarrollo específica del patrón leopardo. Existen diversas hipótesis pero la mayoría señalan que la formación de éstos patrones de vegetación está vinculada al pastoreo de los herbívoros, el fuego, el viento, las condiciones anisotrópicas ambientales en particular la pendiente y otros factores como la diseminación de corta y larga distancia, además de la competitividad entre especies de la vegetación (Chenget, et al., 2010), ligado con el fenómeno de la facilitación, el cual puede llegar a ser factor dominante en la regulación del sistema.

Figura 1

*PARCHES DE VEGETACIÓN EN ESPACIOS DENOMINADO LEOPARDO (DERECHA)*  
*Y PARCHES DE VEGETACIÓN EN FRANJAS O RAYAS DENOMINADO TIGRE (IZQUIERDA)*



Vista aérea del patrón en bandas o rayas (Tigre)



Vista aérea del patrón en espacios (Leopardo)

Fuente: elaboración propia.

Se determinó las relaciones directas de variables ambientales con la aparición y comportamiento específicamente de patrones tipo leopardo en las zonas áridas y semi áridas, tomando como base información real de campo de dos partes del mundo y referencias de información bibliográfica así como predictores de variables ambientales a escala global, en conjunto con un modelo matemático empírico. Con el objetivo de aislar las condiciones ambientales que determinan su existencia en diversas zonas áridas, partiendo de la hipótesis de que en los distintos sitios del mundo dichas variables serán similares; por último contrastando los sitios resultantes con imágenes de alta resolución espacial para verificar los resultados.

## II. METODOLOGÍA

### II.1. Muestra de patrones (Presencia)

Los puntos de presencia de patrones leopardo alrededor del mundo fueron recopilados a partir de información bibliográfica (Tongway 1990; Slatyer 1959; Aguiar 1999; Bisigato, 2009; Juergens, 2012; Yetemen, 2010; Bestelmeye, 2006; Borgogno, 2009; Wickens 1971; Lefever, 2009; Meron, 2004) (Tabla 1) y de datos recolectados en campo (Tabla 2) en áreas

Tabla 1  
DATOS DE PRESENCIA DEL PATRÓN LEOPARDO TOMADOS DE REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Lugar	Continente	Distancia	Especie	Referencia	Precipitación
Sturk national Park	Australia	10-50m	<i>Acacia anuera</i> <i>Eragrostis eriopoda savanna</i> <i>Monachather paradoxa savanna</i>	Tongway 1990	308 mm
Alice Springs	Australia	20-40m	<i>Acacia anuera</i> <i>Eragrostis eriopoda savanna</i>	Slatyer 1959	250 mm
Río Mayo - Argentina	América	2 m	<i>Stipa speciosa</i> <i>Swietenia humilis</i> <i>Poa ligularis</i> <i>Mulinum spinosum</i> <i>Adesmia campestris</i> <i>Senecio filaginoides</i>	Aguiar 1999	160 mm
Desierto del Monte, Argentina	América	2- 3m	<i>Prosopis flexuosa</i> <i>Larrea divaricata</i> <i>Aristida adscensionis</i>	Bisigato, 2009	30 - 350 mm
Sevilleta Wildlife National Refuge New Mexico	América	20-40m	<i>Juniperus monosperma</i> <i>Bouteloua eriopoda</i> <i>Larrera tridentata</i> <i>Erioneuron pulchellum</i>	Yetemen, 2010	250 mm
Chihuahua Las Cruces, NM	América	1-2m	<i>Pleuraphis mutica</i> <i>Prosopis glandulosa Torr</i> <i>Flourensia cernua</i> <i>Lycium berlandieri</i> <i>Larrea tridentata</i>	Bestelmeye, 2006	220 mm
Zambia	África	15-30m	No hay datos	Borgogno, 2009	230 mm
Kordofán y Darfur - Sudan	África	30-50m	<i>Acacia mellifera</i> <i>Terminalia brownii</i>	Wickens 1971	350 mm
South-WestNiger	Africa	1.75-50m	<i>Combretum micranthum</i>	Lefever, 2009	200 mm
Namibia	África	3-5m	<i>Stipagrostis sabulicolae</i> <i>Cladoraphis spinosus</i>	Juergens, 2012	285 mm
Negev - Israel	Asia	1-2 m	<i>Paspalum vaginatum</i> <i>Poa bulbosa</i>	Meron, 2004	200 mm

Fuente: elaboración propia.

no antes reportadas como es el caso, en la península de la Guajira en Colombia, las áreas de Almería y Murcia en España (Figura, 2), los puntos de referencia de la información bibliográfica fueron verificados utilizando imágenes de alta resolución disponibles en los servicios en el línea BingMaps y Google Earth, estos sistemas incluyen cientos de terabytes en imágenes aéreas y de satélite. En muchas áreas, la resolución máxima es de menos de un metro. En otros lugares, especialmente en las zonas más remotas del mundo, resolución es magnitud menor a 5 metros. Luego de verificar todas las localidades se determinaron 150 puntos de presencia del patrón Leopardo alrededor del mundo (Figura 3).

Tabla 2  
DATOS DE PRESENCIA TOMADOS EN CAMPO DEL PATRÓN LEOPARDO

Lugar	Continente	Distancia	Especie	Precipitación
La Guajira, Colombia	América	10 -50m	<i>Castela erecta</i> <i>Heterostachys ritteriana</i> <i>Prosopis juliflora</i>	152-308 mm
Almería y Murcia, España	Europa	2- 5m	<i>Acacia anuera</i> <i>Eragrostis eriopoda savanna</i> <i>Monachather paradoxa savanna</i> <i>Arthrocnemum fruticosum</i> <i>Launaea lanifera</i> <i>Lycium intricatum</i> <i>Salsola genistoides</i> <i>Salsola oppositifolia</i>	199-289 mm

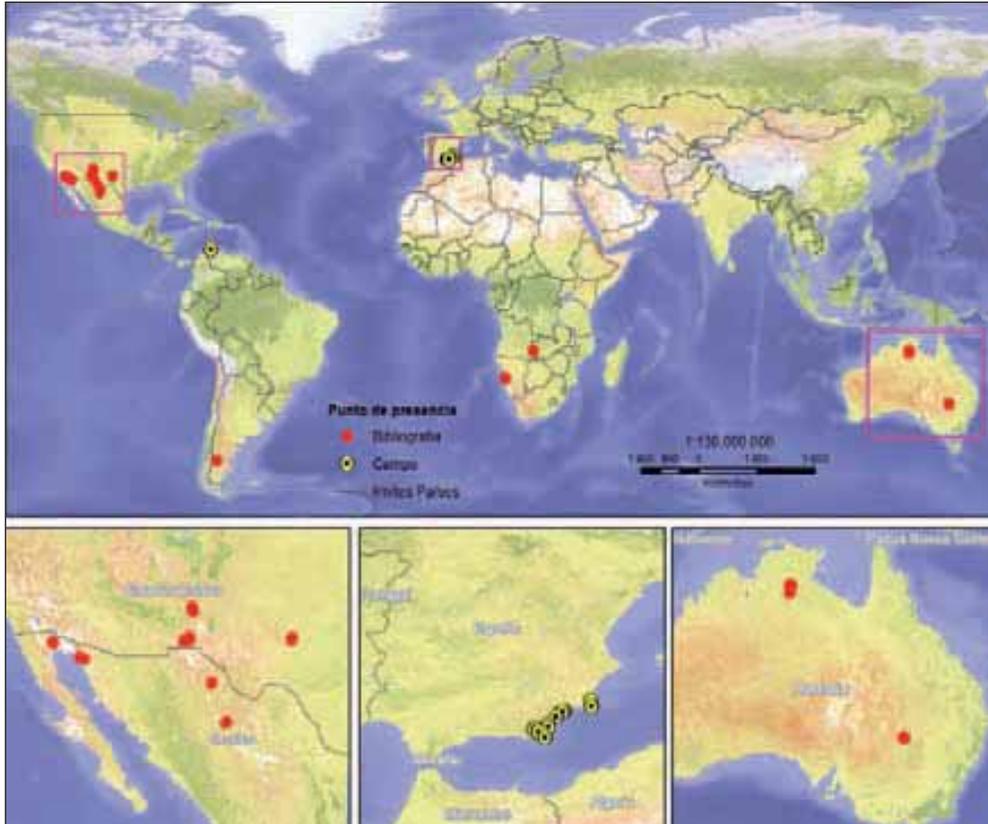
Fuente: elaboración propia.

Figura 2  
PATRONES ESPACIALES TIPO LEOPARDO (IZQUIERDA) LA GUAJIRA, COLOMBIA 2013  
(12° 9'36.17"N - 72° 7'44.64"O) (DERECHA) ALMERÍA, ESPAÑA 2010 (36°52'52.26"N - 2°20'39.02"O)



Fuente: EROS-B Imagesat internacional, Ortofoto PNOA, IGN.

Figura 3  
PUNTOS DE PRESENCIA DE PATRONES LEOPARDO ALREDEDOR DEL MUNDO,  
TOMADOS DESDE REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS E INFORMACIÓN DE CAMPO



Fuente: elaboración propia.

## II.2. Variables ambientales y datos climáticos

Las variables ambientales refinaron la aplicación de la técnica de modelación en conjunto con un modelo de máxima entropía, se trabajó con un set de variables bioclimáticas predefinidas para caracterizar del espacio ambiental donde se distribuyen las variables climáticas, topográficas y edafológicas. Para evitar que el modelo de distribución tuviera un exceso de información y minimizar el número de variables ambientales correlacionadas, elegimos un subconjunto donde todos los coeficientes de correlación fueron menos de 0,80. La resolución de los datos fue de  $0,5^\circ$  para todas las capas de análisis disponibles se consideraron 6 capas temáticas relevantes como predictores del modelo. La temperatura y precipitación anual, fueron obtenidas de WorldClim (<http://WorldClim.org>) dentro de su base de datos climática global para fines de modelamiento ambiental (1950-2000) (Hijmans, 2005), El índice de aridez global y la radiación solar extraterrestre

están basados en el modelado y análisis por Antonio Trabucco, (se ofrecen en línea por el CGIAR-CSI con el apoyo del Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT son a la vez el modelo, utilizando los datos disponibles de WorldClim). La elevación fue basada en los datos Shuttle Radar Topography Mission (por sus siglas en inglés SRTM) completos para el mundo en la versión 4, disponible en el CGIAR-CSI SRTM de 90m base de datos derivada (Jarvis, 2008). Finalmente se utilizó base de datos armonizada mundial de los suelos Harmonized World Soil Database (HWSD) (Nachtergaele, 2012) todas las capas fueron cortadas en la misma referencia espacial y tamaño de pixel para poder ser procesadas en formato raster.

### **II.3. Modelo de distribución potencial**

En los últimos años ha tomado fuerza el uso de técnicas basadas en algoritmos específicos como máxima entropía y algoritmos genéticos (Phillips, 2006; Stockwell, 1992 y 1999). Han significado un aumento exponencial en el número de publicaciones y estudios asociados a la modelación de la distribución geográfica de las especies y ecosistemas, por la facilidad de su aplicación y la rapidez con que se pueden obtener resultados (Pliscoff, 2011). Para generar el modelo empírico potencial se utilizó Maxent (Version 3.3.3) un algoritmo de máxima entropía (Phillips, 2006; Elith, 2011), este muestra la probabilidad de que una celda dada, se tenga una muestra de presencia, para ello utiliza un índice de similitud dentro de unas variables ambientales (predictores) respecto a las celdas donde se ha observado a la especie. Los valores de dicho índice tendrán valores de probabilidad más altos en los espacios semejantes a los lugares donde se ubicaron las muestras conocidas. El modelo inicial permitió generar un mapa de distribución potencial de presencia del patrón Leopardo a nivel global basado en las características de los lugares reportados en campo y en la bibliografía.

Los Modelos de distribución de especies (por sus siglas en inglés SDM) estiman la relación entre registros de especies en los sitios y el medio ambiente y / o características espaciales de esos sitios (Franklin, 2009). Maxent es un método de aprendizaje computacional de propósito general con una simple y la formulación matemática precisa y tiene una serie de aspectos que lo hacen muy adecuado para el modelado de la distribución de especies (Phillips et al., 2006). Es un método no paramétrico, el cual genera una distribución de probabilidad sobre los píxeles de la grilla, empieza por una distribución uniforme y de forma iterativa mejora el ajuste de la distribución a los datos de muestreo; para ello tiene en cuenta las curvas de respuesta, los puntos de muestreo para realizar el test del modelo son una muestra tomada al azar de las localidades de presencia. Maxent utiliza el mismo conjunto de datos tomados al azar en cada vuelta del modelo. Al final del proceso, el valor de la ganancia indica cómo está de ajustado el modelo a las muestras de presencia (Phillips, 2005). Los valores de salida de las distribuciones predichas son acumulativos, con el valor de salida de una celda de la cuadrícula correspondiente a la suma de las probabilidades de todas las cuadrículas de menor o igual valor a la probabilidad de la celda considerada. En otras palabras, el conjunto de valores más altos que 5% incorpora el 95% de la distribución de probabilidad alrededor de la óptima ecológica (Deblauwe, 2008).

## II.4. Evaluación del rendimiento general del modelo

Se evaluó el rendimiento general del modelo mediante el cálculo del área bajo la curva (AUC), para lo cual se utilizó el 25% de los puntos de muestra para ser excluidos de los registros y no usarlos en la prueba. La curva ROC es un indicador de la predicción de una acertada presencia o ausencia en la distribución de los datos dentro de los umbrales. Se analizan los valores de las medidas de umbrales independientes, uno para entrenar y el otro para testar el modelo, lo normal es que la curva AUC de entrenamiento aparezca por encima de la curva AUC de test. La curva de entrenamiento representa el ajuste del modelo a los datos de muestreo. La curva test indica el grado de ajuste del modelo a los datos de test, y supone el test real del poder predictivo del modelo (Phillips, 2005). Los resultados sobre la predicción del AUC pueden variar de 0 a 1, lo cual indica una que la predicción es aleatoria cuando es próximo a 0.5 y una muy buena predicción cuando el umbral se acerca a 1. Dentro del estudio se tuvo en cuenta las imitaciones conocidas del AUC, las cuales se refieren a la variación del valor de puntuación más alto, cuando la zona de muestreo es inferior en extensión a la distribución de las muestras. Los datos de distribución de especies se refiere a un ámbito geográfico concreto y el aumento de la extensión geográfica presente fuera del dominio del medio ambiente implica la obtención de las puntuaciones más altas de las AUC (Lobo, 2008). Teniendo en cuenta las limitaciones del AUC, el uso de este puede proporcionar información valiosa al utilizar en lugares relativamente homogéneos y con muestras definidas e iguales escalas como es nuestro caso.

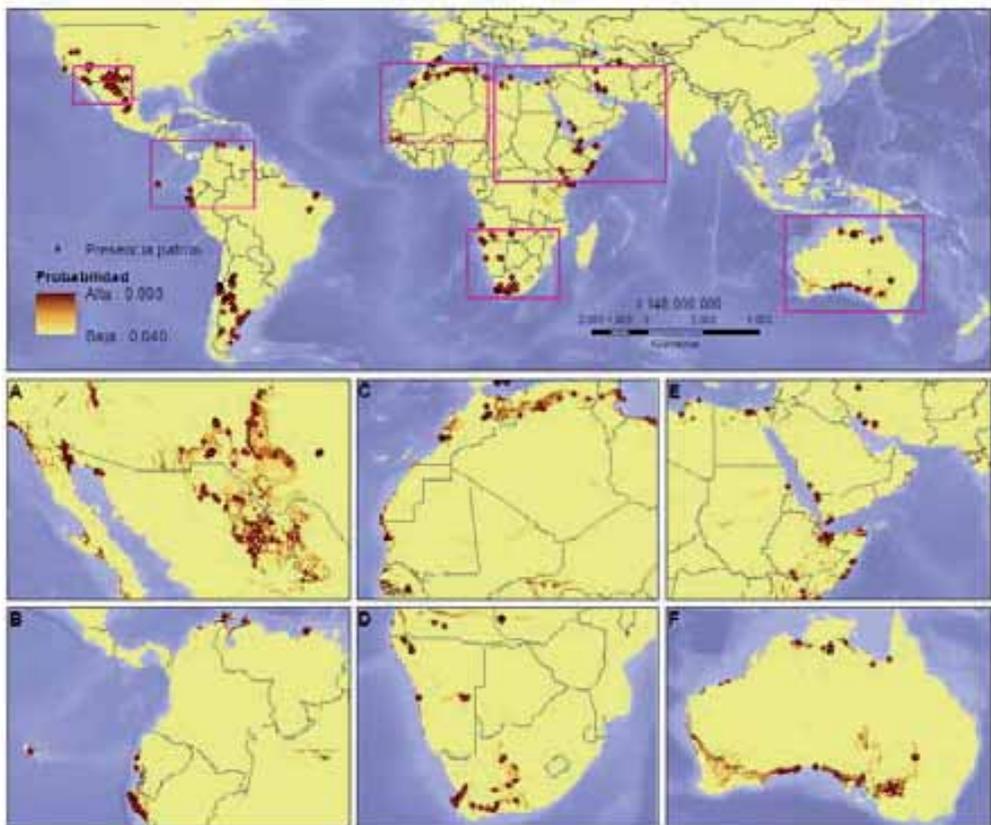
## III. RESULTADOS

El resultado mostro la distribución probable de las áreas en el globo donde se puede evidenciar patrones regulares tipo Leopardo, dentro de las contribuciones relativas de las variables ambientales en el modelo de Maxent, el predictor que tuvo una mayor aporte porcentual fue el índice de aridez global, el que tuvo un 40.2, seguido del predictor de elevación global STRM con un 18.3 éstas dos variables representan más del 50 % de la contribución total a los valores más significativos del índice. La precipitación 14.5, la temperatura 12.4 y en menor medida la radiación solar con 9.8 y los suelos con 4.9. Para el modelo ejecutado las puntuaciones de las AUC fueron estadísticamente muy significativa 0.993, dándole un gran valor predictivo a el modelo de distribución resultante, al superar el límite medio de 0.5 con una mayor aproximación al valor máximo 1, lo que confirmó la pertinencia de ésta predicción al revelar zonas nuevas del mundo donde no se han tenido reportes de presencia del patrón leopardo anteriormente (Figura 4).

El modelo revelo la extensa distribución de ambientes distintivos para la presencia del patrón leopardo, arrojo zonas no identificadas anteriormente o con muy pocas referencias. Estas áreas incluyen el desierto de Chihuahua y Sonora entre Estados unidos y México (Figuras 4a), el sur de Ecuador e islas Galápagos y el norte del Perú en el área de Piura (Figura 4b), una franja costera desde de Libia hasta Gambia, en África Occidental alrededor del desierto del Sahara (Figura 4c), Sudáfrica y desde Angola hasta Namibia por la franja costera alrededor del desierto del Kalahari (Figuras 4d). Áreas alrededor de Somalia, Kenia Yemen y Oman (Figura 4e) y finalmente áreas al borde del desierto australiano

(Figura 4f). Otras características ambientales importantes que se definieron en las áreas aisladas fueron: la precipitación anual, que se encuentra el rango de 100 mm a 300 mm, el rango temperatura que es característicamente muy importante en ambientes áridos y en donde los patrones ocurren dentro de la gama de 10 a 26 ° C, la elevación que muestra un rango entre 0 a los 1700 metros, la radiación solar que se encuentra en los rango de 10 a 15mm/mes y por último el índice de aridez que se encuentra en el rango de 0 a 0.2 dentro de la característica de árido, en la clasificación de las zonas áridas de la UNESCO (De Pauw, 2000). Referente a las propiedades del suelo predominan los calcisoles suelos con orígenes calcáreos muy típicos de ambientes áridos, donde el material original lo constituyen depósitos aluviales, coluviales o eólicos de materiales alterados.

Figura 4  
MODELO DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL PATRÓN ESPACIAL  
TIPO LEOPARDO



Fuente: elaboración propia.

Se identificaron lugares con ambientes distintivos, con una clara semejanza entre sí, una de estas características se comprobó en los trabajos de campo llevados a cabo en

España y Colombia. Donde se encontró evidencia del fenómeno llamado convergencia evolutiva (Arendt, 2008), en estos lugares los patrones leopardo se conforman principalmente por dos especies *Castela erecta* y *Lycium intricatum* (Figura 5), estas plantas pertenecientes a familias distintas Simaroubaceae y Solanaceae; son muy parecidas en su aspecto feno-morfológico y estructural, pero sin una conexión biológica y evolutiva directa, conformando patrones afines de desarrollo en el ambiente árido donde se desenvuelven, siendo probable que sean modificadas de manera similar y sujetas a presiones de selección similares.

Figura 5

*ESPECIES IDENTIFICADAS EN CAMPO (IZQUIERDA) GUAJIRA, COLOMBIA (12°24'31.34"N - 71°43'59.63"O) (DERECHA) MURCIA, ESPAÑA (37°36'18.62"N - 0°43'43.55"O)*



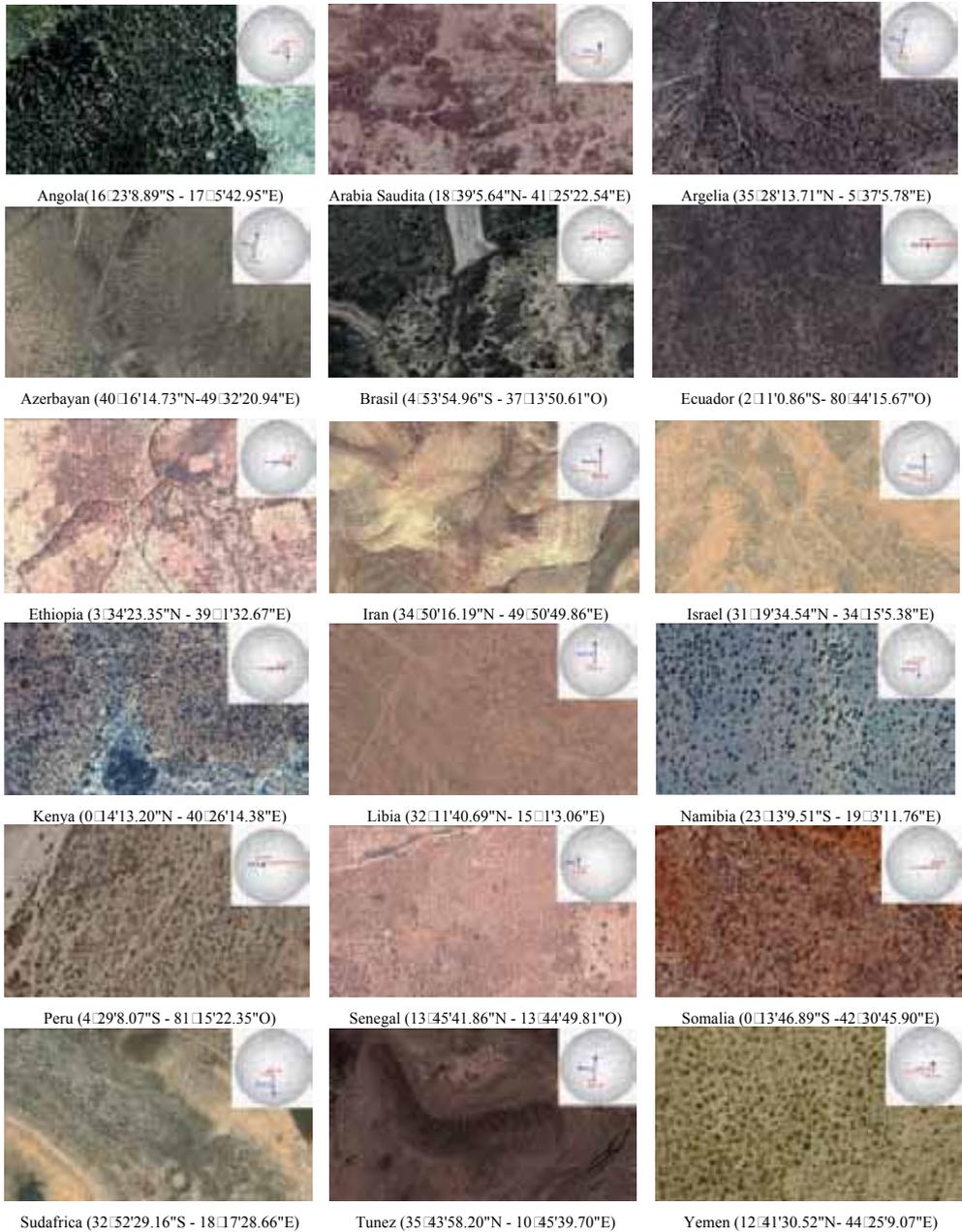
*Castela erecta* – Simaroubaceae



*Lycium intricatum* – Solanaceae

Para comprobar la estimación de la exactitud de la clasificación, se tomaron 100 puntos de muestra seleccionados sobre el modelo de distribución potencial, se utilizó la matriz de confusión, para ello se seleccionaron los puntos sobre los valores superiores al 0.90. El objetivo es evidenciar la proporción de muestras correctamente clasificadas, comprobando si los patrones se encuentran presentes a través de las imágenes de satélite disponibles en línea utilizando los servicios cartográficos de BingMaps y Google Earth. Generalmente es admisible para una muestra la relación entre tamaño del universo, un error estándar relativo del 10 por ciento. Cuando la matriz de confusión presenta muchas categorías se requiere de un gran número de muestras para evaluar su exactitud, pero en este caso solo se utiliza una única clase. El resultado fue de una precisión con una fiabilidad global del 91 % esto se comprobó con las muestras cotejadas en distintos lugares del mundo donde se verifico la existencia del patrón leopardo, en muchos de los lugares donde no se tenía reportes anteriores o no existían referencias directas debido a la amplia distribución global (Figura 6).

Figura 6  
MUESTRAS DE ALGUNOS LUGARES CON PRESENCIA DEL PATRÓN LEOPARDO ALREDEDOR DEL MUNDO,  
IDENTIFICADOS CON EL MODELO DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL



Fuente: QuickBird, DigitalGlobe distribuido por Google Earth.

#### IV. CONCLUSIONES

El estudio evidencia los rangos de las capas y particularidades que caracterizan a nivel mundial las nuevas ubicaciones en zonas áridas tropicales y subtropicales con patrones leopardo, mejorando la discriminación entre hábitats climáticamente adecuados y no adecuados, en los últimos años a aumentando la disponibilidad y el detalle la información satelital lo que ha permitido mejorar las observaciones y tener mejor detalle aprovechando las disponibilidad de información cartográfica en línea.

Se pudo aislar una relación de ambientes distintivos que claramente conforman patrones y se encuentran en distintos lugares del mundo, más exactamente en distintos continentes, América, África, Europa y Oceanía, la convergencia de estos lugares se debe principalmente a que el ambiente modeló los factores de las formas vegetales de dichas zonas, logrando aislar las características ambientales similares en las especies vegetales, parte de esto se evidenció en dos de las zonas estudiadas en América y Europa, el medio genera los patrones espaciales similares en donde éstas plantas se encuentran, probablemente las especies que estén en otros lugares no analizados arrojen fenómenos de convergencia evolutiva en dichos ambientes similares (Figura 5) o contengan géneros idénticos siendo el caso el de *Prosopis* en América y *Acacia* en Australia, África y Europa. (Tabla 1 y 2). La hipótesis de que el ambiente distintivo modela la fenomorfología de las especies indica que las variables ambientales solamente proporcionan información importante sobre los requisitos del desarrollo del patrón leopardo en una escala regional y que deben haber otros factores más determinantes a nivel local que se desconocen por ahora (Barbier, 2006).

Los patrones tipo leopardo se ubican en su mayoría en zonas exteriores o bordes de grandes desiertos o zonas secas litorales (Sahara, Kalahari, desierto australiano, etc.), principalmente cerca de la zona costera o con algún tipo de influencia marina, una característica específica que no se ha abordado más a fondo es la posible interacción de estos patrones, relacionado con la presencia de pastos marinos cercanos en las áreas litorales donde hay presencia de patrones leopardo, casos como el de Colombia, España o Australia pueden tener una relación directa en los efectos locales y el aporte de nutrientes principalmente por efectos de los vientos que aportan sedimentos a las áreas marinas cercanas (Hemminga, 1990; Short, 2010).

En los lugares analizados en campo no se ha demostrado que la vegetación sea periódica como sugieren otros autores (Deblauwe, 2008), la variación de vegetación es principalmente el proceso de rebrote o floración de las plantas o el crecimiento temporal de la vegetación por periodos de lluvias, pero el nivel inicial de la vegetación siempre se mantiene a menos que sea perturbado significativamente, también se puede analizar que no solo se limitan a zonas planas pudiéndose presentar en áreas relativamente altas de montañas en todos los continentes, esto es indudable al visualizar los patrones desde un mayor nivel de detalle espacial. Para mejorar la comprensión de cómo interactúan y se conforman los patrones debe haber más investigación de campo que permitan definir las especies vegetales presentes, la variabilidad de nutrientes en el suelo y las características ambientales locales relevantes (vientos, humedad, temperatura, precipitación) además de tener en cuenta la influencia animal. Como en otros estudios concluyen (Aguilar, 1999; Barbier, 2006; Deblauwe, 2008), es probable que el fenómeno de los patrones en algunas zonas que el modelo arrojó, y que actualmente no existe se deba a la supresión de éstos por influencia antrópica, caso probable que se evidenció en zonas de España donde los campos de cultivo e influencia humana podrían haber eliminado patrones antes presentes.

## V. BIBLIOGRAFÍA

- AGUIAR, M.N.R. y SALA, O.E. (1999): «Patch structure, dynamics and implications for the functioning of arid ecosystems», *Trends in Ecology & Evolution*, 14 (7): 273-277.
- ARENDRT, J. y REZNICK, D. (2008): «Convergence and parallelism reconsidered: what have we learned about the genetics of adaptation?», *Trends in Ecology & Evolution*, 23 (1): 26-32.
- BARBIER, N., COUTERON, P., LEJOLY, J., DEBLAUWE, V y LEJEUNE, O. (2006): «Self-organized vegetation patterning as a fingerprint of climate and human impact on semi-arid ecosystems», *Journal of Ecology*, 94 (3): 537-547.
- BESTELMEYER, B.T., WARD, J.P. y HAVSTAD, K.M. (2006): «soil-geomorphic heterogeneity governs patchy vegetation dynamics at an arid ecotone», *Ecology*, 87 (4): 963-973.
- BISIGATO, A. J., VILLAGRA, P.E., ARES, J.O. y ROSSI, B.E. (2009): «Vegetation heterogeneity in Monte Desert ecosystems: A multi-scale approach linking patterns and processes», *Journal of Arid Environments*, 73 (2): 182-191.
- BORGOGNO, F., D'ODORICO, P., LAIO, F. y RIDOLFI, L. (2009): «Mathematical models of vegetation pattern formation in ecohydrology», *Reviews of Geophysics*, 47 (1): RG1005.
- CHENG, Y., STIEGLITZ, M., ENGEL, V. y TURK, G. (2009): Parallel Vegetation Stripe Formation Through Hydrologic Interactions. *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- DE PAUW, E., GÖBEL, W. y ADAM, H. (2000): «Agrometeorological aspects of agriculture and forestry in the arid zones», *Agricultural and Forest Meteorology*, 103 (1): 43-58.
- DEBLAUWE, V., BARBIER, N., COUTERON, P., LEJEUNE, O. y BOGAERT, J. (2008): «The global biogeography of semi-arid periodic vegetation patterns», *Global Ecology and Biogeography*, 17 (6): 715-723.
- ELITH, J., PHILLIPS, S.J., HASTIE, T., DUDÍK, M., CHEE, E. y YATES, C.J (2011): «A statistical explanation of MaxEnt for ecologists», *Diversity and Distributions*, 17 (1): 43-57.
- FRANKLIN, J. (2010): *Mapping Species Distributions*, Cambridge University Press.
- GARCIA-MOYA, E. y MCKELL, C.M. (1970): «Contribution of shrubs to the nitrogen economy of a desert-wash plant community», *Ecology*, 51:81-88.
- HEMMINGA, M.A. y NIEUWENHUIZE, J. (1990): «Seagrass wrack-induced dune formation on a tropical coast (Banc d'Arguin, Mauritania)», *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 31 (4): 499-502.
- HIJMANS, R.J., CAMERON, S.E., PARRA, J.L., JONES, P.G. y JARVIS, A. (2005): «Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas», *International Journal of Climatology*, 25 (15): 1965-1978.
- JARVIS, A., REUTER, H., NELSON, A. y GUEVARA, E. (2008): «Hole-filled SRTM for the globe Version 4.» Disponible en *CGIAR-SXI SRTM 90m database*: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- JUERGENS, N., OLDELAND, J., HACHFELD, B., ERB, E. y SCHULTZ, C. (2013): «Ecology and spatial patterns of large-scale vegetation units within the central Namib Desert», *Journal of Arid Environments*, 93: 59-79.
- LEFEVER, R. y TURNER, J.W. (2012): «A quantitative theory of vegetation patterns based on plant structure and the non-local F-KPP equation», *Comptes Rendus Mécanique*, 340 (11-12): 818-828.

- LOBO, J.M., JIMÉNEZ-VALVERDE, A. y REAL, R. (2008): «AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models», *Global Ecology and Biogeography*, 17 (2): 145-151.
- MACARTHUR, R.H. (1967): *The theory of island biogeography*, Princeton University Press.
- MEIGS, P. (1953): World Distribution of Arid and Semi-arid Hot Climates. *Reviews of Research on Arid Zone Hydrology*. Paris, UNESCO.
- MERON, E., GILAD, E., VON HARDENBERG, J., SHACHAK, M. y ZARMI, Y. (2004): «Vegetation patterns along a rainfall gradient», *Chaos, Solitons & Fractals*, 19 (2): 367-376.
- NACHTERGAELE, F. y BATJES, N. (2012): *Harmonized world soil database*, FAO.
- PHILLIPS, S. (2005): «A brief tutorial on Maxent», *AT&T Research*.
- PHILLIPS, S.J., ANDERSON, R.P. y SCHAPIRE, R.E. (2006): «Maximum entropy modeling of species geographic distributions», *Ecological Modelling*, 190 (3): 231-259.
- PLISCOFF, P. y FUENTES-CASTILLO, T. (2011): «Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles», *Revista de Geografía Norte Grande*, 48: 61-79.
- RIETKERK, M. y VAN DE KOPPEL, J. (2008): «Regular pattern formation in real ecosystems», *Trends in Ecology & Evolution*, 23 (3): 169-175.
- SCHLESINGER, W. y PILMANIS, A. (1998): «Plant-soil Interactions in Deserts», *Biogeochemistry*, 42 (1-2): 169-187.
- SHORT, A.D. (2010): «Sediment Transport around Australia—Sources, Mechanisms, Rates, and Barrier Forms», *Journal of Coastal Research*, 26 (3): 395-402.
- SLATYER, R.O. (1959): Methodology of a water balance study conducted on a desert woodland (acacia aneura f. muell.) community in central Australia. *Symposium on Plant-Water Relationships in Arid and Semi-arid Conditions*. UNESCO. Madrid, UNESCO document: 13 p.
- STOCKWELL, D. (1999): «The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction», *International Journal of Geographical Information Science*, 13(2): 143-158.
- STOCKWELL, D.R.B. y NOBLE, I.R. (1992): «Induction of sets of rules from animal distribution data: A robust and informative method of data analysis», *Mathematics and Computers in Simulation*, 33(5-6): 385-390.
- TONGWAY, D.J. y LUDWIG, J.A. (1990): «Vegetation and soil patterning in semi-arid mulga lands of Eastern Australia», *Australian Journal of Ecology*, 15(1): 23-34.
- WARREN, A. (1973): «Some vegetation patterns in the Republic of the Sudan - a discussion», *Geoderma*, 9 (1): 75-78.
- WHITE, D.C. y LEWIS, M.M. (2011): «A new approach to monitoring spatial distribution and dynamics of wetlands and associated flows of Australian Great Artesian Basin springs using QuickBird satellite imagery», *Journal of Hydrology*, 408 (1-2): 140-152.
- WICKENS, G.E. y COLLIER, F.W. (1971): «Some vegetation patterns in the Republic of the Sudan», *Geoderma* 6 (1): 43-59.
- WORRALL, G. (1959): «The Butana grass patterns», *Journal of Soil Science*, 10 (1): 34-53.
- YETEMEN, O., ISTANBULLUOGLU, E. y VIVONI, E.R. (2010): «The implications of geology, soils, and vegetation on landscape morphology: Inferences from semi-arid basins with complex vegetation patterns in Central New Mexico, USA», *Geomorphology*, 116 (3-4): 246-263.