

MODELO DE PRODUCTIVIDAD AGRARIA PARA LA PUNA DE JUJUY AJUSTADO A TÉCNICAS Y CULTIVOS TRADICIONALES ANDINOS

Laura Pey

Universidad de Buenos Aires, Facultad de Filosofía y Letras, Departamento de Arqueología (IA), Buenos Aires, Argentina

E-mail: marialaurapey@gmail.com

Recibido: 20/01/2022
Aceptado: 20/04/2022

RESUMEN

Aunque se dispone de caracterizaciones territoriales, los datos disponibles presentan limitaciones teóricas y de escala para la investigación de paisajes agrarios de la región puneña de la provincia de Jujuy (Argentina). En general, los modelos de productividad disponibles suelen subestimar la potencialidad y/o desarrollo concreto de prácticas agrícolas de esta región. Por ello, este trabajo presenta un modelo de productividad agraria para la región puneña, cuyos parámetros fueron evaluados en función de las técnicas productivas tradicionales andinas y cultivos de altura. Se ponderaron las variables altitud, suelos, hidrología, productividad primaria neta aérea (PPNA), pendiente y orientación geomorfológica. El modelo obtenido se evaluó a partir de evidencia actual y arqueológica de campos de cultivo; y se compararon los resultados con el mapa de Índice de Productividad (IP) desarrollado por el INTA. Como resultado se obtuvo un modelo de productividad agraria que se condice con la evidencia disponible de campos de cultivo actuales y del pasado. Éste puede descargarse para su implementación en la prospección arqueológica de sitios productivos y/o reajuste en función de otras variables y objetivos.

Palabras clave: aptitud agrícola, agricultura andina, SIG, Noroeste Argentino, altiplano.

AGRICULTURAL PRODUCTIVITY MODEL FOR THE PUNA OF JUJUY ADJUSTED TO TRADITIONAL ANDEAN TECHNIQUES AND CROPS

SUMMARY

Although territorial characterizations are available, the data present theoretical and scale limitations for the investigation of agrarian landscapes in the Puna region of Jujuy province (Argentina). In general, available productivity models tend to underestimate the potential and/or development of agricultural practices in this region. Therefore, this paper presents an agricultural productivity model for the Puna region, whose parameters were evaluated in terms of traditional Andean production techniques and highland crops. The variables altitude, soils, hydrology, net primary aerial productivity (PPNA), slope and geomorphological orientation were weighted. The model obtained was evaluated based on current and archeological evidence of cultivated fields; and the results were compared with the Productivity Index (PI) map developed by INTA. As a result, an agricultural productivity model was obtained that is consistent with the available evidence of present and past agricultural fields. This model can be downloaded for its implementation in the archaeological prospection of productive sites and/or readjustment according to other variables and objectives.

Key words: agricultural suitability, Andean agriculture, GIS, NW Argentina, highlands.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha avanzado significativamente el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la gestión, planeamiento e investigación ambiental y agronómica. Mucha información se ha puesto a disposición en formato digital en distintos portales estatales, como el ya clásico mapa de regiones agroeconómicas homogéneas de las provincias del noroeste argentino (Bravo *et al.*, 1999). Pero también se encuentran disponibles nuevas y más precisas caracterizaciones territoriales, como el modelo de Morales Poclava *et al.* (2015), que brinda un ajuste paramétrico del índice de productividad (IP) para las provincias de Salta y Jujuy. Si bien el desarrollo y la disponibilidad de estos datos son de gran utilidad para determinados fines (*e.g.* la industria agropecuaria), aún existen ciertas limitaciones teóricas y de escala para la investigación de paisajes agrarios puneños.

En relación con esto último, en el mapa de regiones agroeconómicas se observa que, de los 53.219 km² que ocupa la superficie de la provincia de Jujuy, 37.965 km² son asignados a la región agroeconómica clasificada como Puna y Altoandino con ganadería menor y camélidos (Bravo *et al.*, 1999) (Figura 1). A gran escala, se considera que el 71,33% de la provincia no es apta para el desarrollo de la actividad agrícola, frente a un 28,67% que parece concentrar toda la aptitud para hacerlo. En

sin-tonía, los modelos de productividad disponibles suelen homogeneizar el territorio puneño bajo índices muy bajos (prácticamente nulos): frente a un valor máximo de 87,7 (correspondiente al área de valles de cultivo intensivo), los valores asignados a la región altoandina oscilan entre 0 y 32. Por lo tanto, los modelos caracterizan a este territorio exclusivamente mediante la cría de ganado menor (ovino y caprino) y camélidos, invisibilizando la potencialidad y/o desarrollo concreto de prácticas agrícolas tanto del pasado como de la actualidad.

Los modelos e índices de productividad disponibles se elaboran ponderando parámetros ambientales (condiciones climáticas, topográficas y edáficas) de acuerdo con un tipo de cultivo de referencia y un sistema de producción que no se condicen con los tradicionales del área. Los cultivos de referencia suelen ser vegetales de altitudes bajas o intermedias como valles de producción intensiva, subtropical y umbral: soja, sorgo y maíz (Morales Poclava *et al.*, 2015) y alfalfa, trigo y maíz (Zerda, 1995). En estas tríadas, la única especie nativa es el maíz y, por lo general, su cultivo no supera los 2.200-3.100 m s. n. m. En cuanto al sistema productivo, generalmente se construyen estos modelos empleando como referencia métodos de cultivo a secano, destinados a terrenos llanos y con un nivel de manejo de los suelos de medio a alto (Morales Poclava *et al.*, 2015). Esto último no sólo hace referencia a la escala del impacto en

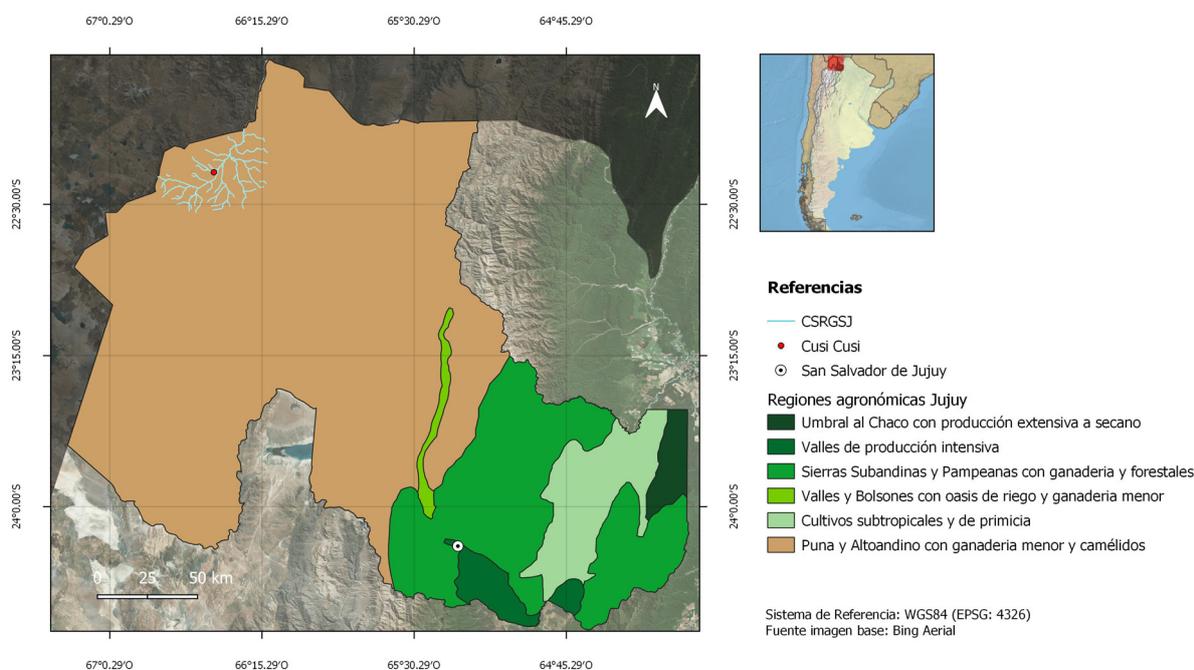


Figura 1. Mapa de regiones agroeconómicas de la provincia de Jujuy. Se destaca la localización del área de estudio (cuenca superior del Río Grande de San Juan y la localidad de Cusi Cusi). Fuente: elaborado a partir de los datos de Bravo *et al.* (1999) y de la capa vectorial disponible en la web de la Infraestructura de datos espaciales de la Provincia de Salta (IDESSA).

el paisaje sino también a las técnicas implementadas. En esta línea, se considera que en la Puna el nivel de manejo del suelo es "bajo" ya que la tracción suele ser animal y las labores se realizan con "instrumentos simples" (Vargas Gil y Bianchi, 1981).

Si bien es cierto que se trata de una región ideal para el pastoreo (sobre todo de camélidos), y que la agricultura es una práctica que requiere ciertas precauciones debido a las rigurosas características ambientales, esto no significa que cultivar allí sea imposible. En los pisos altos de la puna jujeña pueden producirse (y, en algunas regiones, aún se cultivan) especies microtéricas como quinua (*Chenopodium quinoa* C.L. Willdenow (Willd.), kañiwa (*Chenopodium pallidicaule* Aellen), tarwi o lupino (*Lupinus mutabilis* L.) y variedades de papas nativas adaptadas a la altura (*Solanum juzepczukki* L. y *S. curtilobum*), entre otras (Albeck, 2011; Bugallo, 2019; Pey, 2017a, b). La actividad agrícola en la puna es posible hasta los 4.200 m s. n. m. en función de la exposición solar, los suelos y el drenaje, siendo el límite superior de los cultivos irregular. Incluso, desde tiempos antiguos, se han desarrollado tecnologías específicas (como sistemas de irrigación y aterrazamiento) para aprovechar los terrenos escarpados y las fuertes pendientes.

En consecuencia, el presente trabajo tiene como objetivo brindar un aporte a los modelos espaciales relacionados con la productividad agraria de la Puna de Jujuy empleando herramientas y recursos de la geomática con una perspectiva productiva andina. A su vez, se realizó una investigación del paisaje agrario desde un enfoque antropológico y arqueológico abarcando la microrregión de Cusi Cusi, ubicada en la cuenca superior del Río Grande de San Juan en el departamento de Rinconada al noroeste de la provincia de Jujuy (Figura 1) (Pey, 2017a, b; 2021). Los resultados obtenidos muestran un modelo alternativo de productividad que contempla cuestiones hasta ahora no consideradas en este tipo de análisis, el cual es contrastado con la locación de sitios agrícolas arqueológicas y actuales relevados en la microrregión de Cusi Cusi (Pey, 2017a) y algunas áreas vecinas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La obtención de un modelo de productividad para la Puna de Jujuy implicó una consecución de pasos metodológicos que, en términos generales, pueden agruparse en tres instancias de trabajo. Si bien cada paso derivó en la producción de capas originales y la puesta en

acción de criterios y métodos de clasificación de los datos obtenidos, sus productos (siendo resultados parciales o correspondiendo a variables discretas) se constituyen como la base sobre la que se elaboró el modelo final. Por este motivo, se presentan en esta sección. El software utilizado para la sistematización y procesamiento de los datos fue QGIS 3.10 y SAGA 2.3.2. Ambos programas son de código abierto y libre descarga (<https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>).

Paso 1: obtención y tratamiento de capas base

Se utilizaron seis capas base provenientes de distintas fuentes, que fueron reproyectadas a coordenadas planas en el sistema POSGAR 2007 faja 3 y recortadas al área de interés de acuerdo con el polígono correspondiente a la región agroeconómica de Puna y alto andino con ganadería menor y camélidos (Bravo *et al.*, 1999). Éste fue descargado de manera libre y gratuita en formato "shape" a través de la Infraestructura de Datos Espaciales de la provincia de Salta (IDESIA) (http://geoportal.idesa.gob.ar/layers/geonode%3Aregiones_agro_eco_homog_noa).

(i) Modelo digital de elevaciones (MDE), mapa de orientación y mapa de pendientes

Se empleó un MDE ALOS PALSAR L-Band Hi-Res Terrain Corrected to 12.5 m, descargado gratuitamente del portal del Earth del Science Data Systems (ESDS) de la NASA (<https://search.asf.alaska.edu/>). Éste presenta mayor precisión frente al modelo provisto por el INTA donde los cálculos topográficos se realizaron a partir de un MDE de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de la NASA con celdas de 90 m de lado (Morales Poclava *et al.*, 2015). Para cubrir el área abarcada por la puna jujeña se descargaron 17 imágenes en formato "*.tif", que fueron combinadas obteniendo un MDE para la región con valores que varían de 2.434 a 5.898 m s. n. m. (Figura 2A). Luego, se derivaron dos mapas: un mapa de aspecto u orientación de las laderas (Figura 2B) y otro de pendientes (Figura 2C). Este último fue reclasificado contemplando las características del terreno y el empleo de técnicas tradicionales andinas de cultivo en pendiente (Cuadro 1).

(ii) Base hidrológica

Se emplearon dos capas vectoriales brindadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) con información para todo el territorio argentino: una con los cuerpos de agua (lagos y salares/salinas) y otra con los cursos de

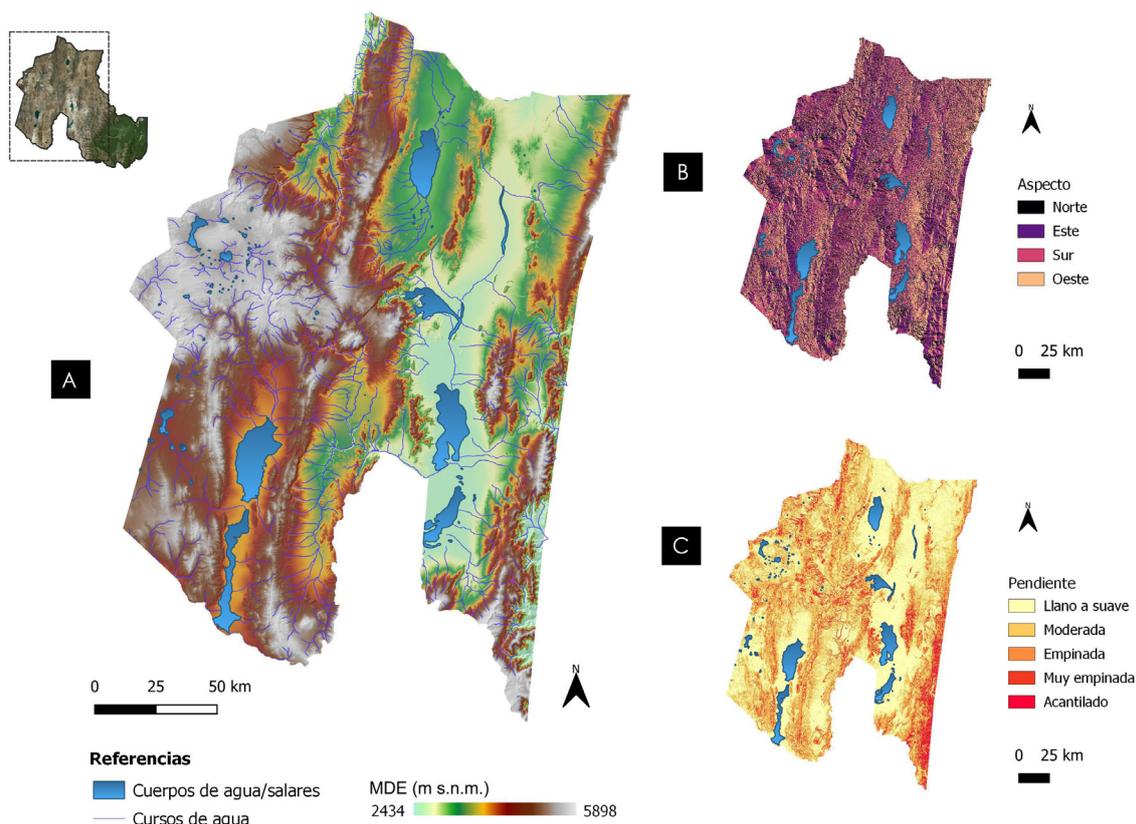


Figura 2. (A) Modelo digital de elevaciones (MDE) ALOS PALSAR de la Puna de Jujuy. (B) Mapa de orientación derivado. (C) Mapa de pendiente derivado.

Cuadro 1. Parámetros de reclasificación del mapa de pendientes.

Valores (%)	Clase (tipo de pendiente)
0-10	Llanura suave
10-25	Moderada
25-45	Empinada
45-55	Muy empinada
>55	Acantilado

agua (tanto permanentes como no permanentes). Éstas fueron re proyectadas y corregidas en base al MDE y una imagen satelital Bing. Luego, se rasterizó la capa hidrológica y se corrió el proceso Proximidad (distancia ráster) del módulo GDAL, lo cual generó un mapa de proximidad en ráster donde el valor de cada celda depende de su distancia respecto de una celda referente. En este caso, todas las celdas que ocupan la superficie de los cursos de agua de la Puna de Jujuy fueron digitalizados (Figura 3).

(iii) Base edáfica

Se trabajó con la capa vectorial Suelos del NOA (Salta y Jujuy), disponible en la página web del INTA, un

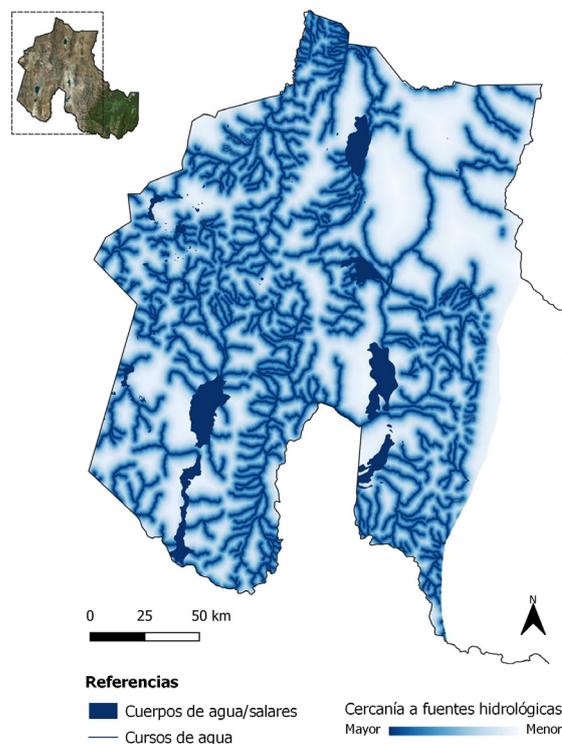


Figura 3. Mapa de proximidad a cursos y cuerpos de agua para la Puna de Jujuy.

“shape” de polígonos que presenta las asociaciones de suelos bajo la clasificación taxonómica USDA (Klingebiel y Montgomery, 1961) producto de la adecuación al SIG realizada por INTA-UNSa (2009) a partir del trabajo de Nadir y Chafatinos (1990). La escala es de 1:250.000 y, tras el recorte al área de interés, se obtuvo el mapa de la Figura 4. A su vez, se descargó la base de datos abierta disponible en la misma fuente. Se destaca que la mayoría de los suelos de la Puna de Jujuy corresponden a Torriorthentes líticos (9); seguidos por Torriorthentes típicos (6); y algunos Torripsamente líticos (3), Torripsamente típicos (2), Haplargid típico (1), Haplosalid típico (1) y Paleargid típico (1). Según la base de datos, entre ellos predominan los suelos asignados a la Clase E, seguidos por la Clase D y unos pocos casos correspondientes otras clases (B, C-D y sin asignación o N/C - No corresponde).

(iv) Vegetación

En este caso, se empleó directamente el modelo ráster de productividad primaria neta aérea (PPNA) realizado por Baldassini *et al.* (2012) en función de los distintos tipos fisonómicos de vegetación presentes en la región de la Puna de Salta y Jujuy. Éste fue elaborado a partir de datos provistos por sensores remotos, modelos

biofísicos para estimar la productividad y censos fisonómico-florísticos. Cabe destacar que la productividad primaria es la tasa de conversión entre la energía solar que ingresa a un ecosistema y la producción de compuestos orgánicos. Si a ésta se le descuenta la pérdida energética producida por la respiración celular, se obtiene lo que se denomina productividad primaria neta (PPN). La PPN tiene un componente aéreo (PPNA), que es el medido en el trabajo de Baldassini *et al.* (2012), y otro subterráneo (PPNS). El ráster fue brindado por uno de los autores para su utilización en este modelo y fue clasificado en rangos con valores asignados siguiendo la propuesta de Pirola (2019), a la que se le sumó una cuarta clase (Cuadro 2; Figura 5).

Cuadro 2. Tabla de reclasificación de modelo de productividad primaria neta aérea (PPNA) (Baldassini *et al.*, 2012) siguiendo la propuesta de Pirola (2019).

Rango PPNA (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Valor
0-250	1
250-500	2
500-1.000	3
1.000-10.000	4

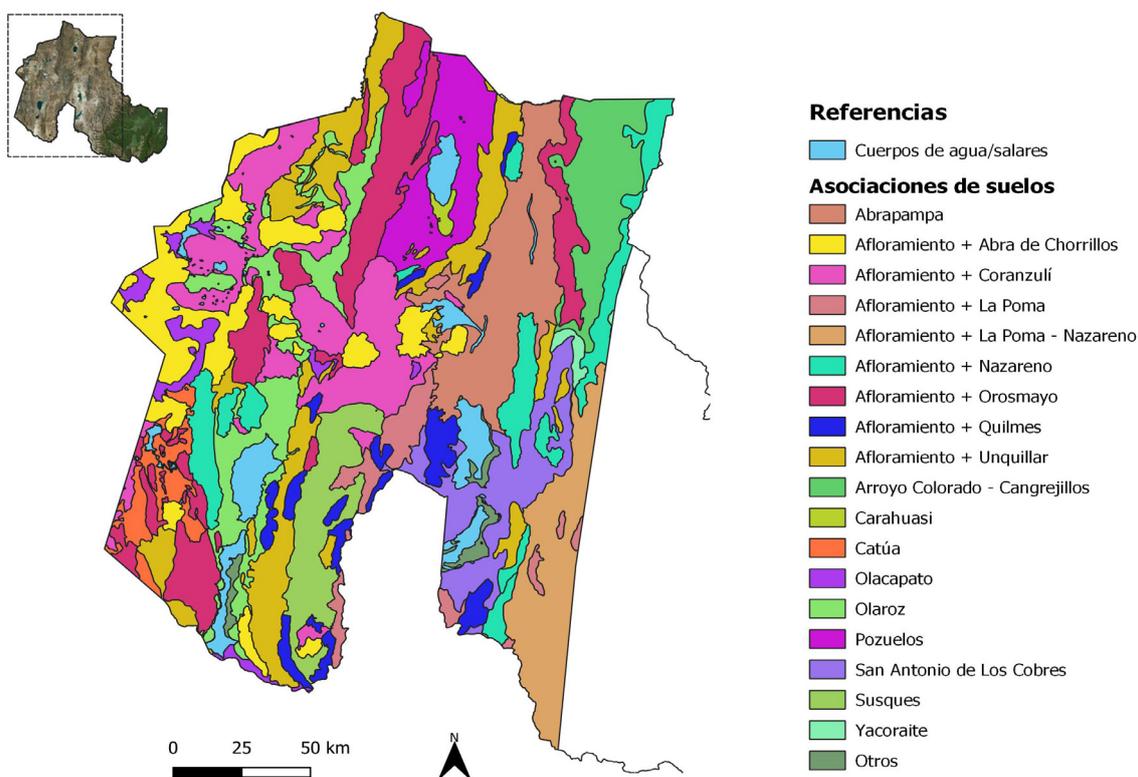


Figura 4. Mapa de asociaciones de suelos de la Puna de Jujuy. Fuente: INTA.

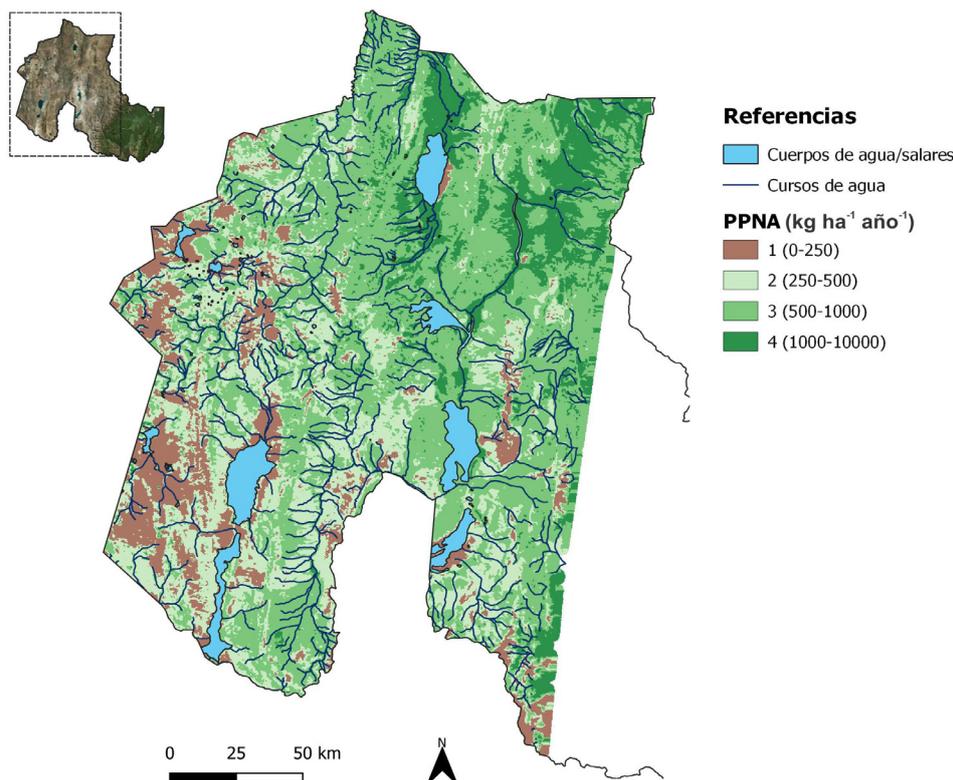


Figura 5. Mapa de productividad primaria neta aérea (PPNA) para la Puna de Jujuy. Fuente: Baldassini *et al.* (2012) y Pirola (2019).

Cuadro 3. Características agronómicas óptimas de cinco cultivos andinos nativos en base a la información disponible en National Research Council (1989), FAO (2007), Tapia y Fries (2007) y Guagliardo (2011).

CULTIVO (tipo)	NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	ALTITUD (m s. n. m.)	SUELO ÓPTIMO	CLIMA ÓPTIMO	RESISTENCIA
Quinoa (grano)	<i>Chenopodium quinoa</i>	Quinoa, Quinoa, <i>kiwña</i> (quechua), <i>jiura, jiwra, jupha</i> (aymara)	Desde el nivel del mar hasta >4.000 m	- Desde arenosos a arcillosos - Ácidos, neutros y ligeramente alcalinos	- Desde zonas áridas hasta húmedas y tropicales - Desde frías y templadas hasta cálidas	- Resiste: frío, sequías, heladas y salinidad de suelos - Vulnerable a pestes y plagas
Papa nativa (tubérculo)	<i>Solanum tuberosum</i>	Papa dulce	- Resiste entre 2.000 y 4.100 m - Rendimiento óptimo entre 3.700-4.100 m	- Muy buenos resultados en suelos franco-arenosos - Mejor rendimiento en suelos ácidos y neutros	Buena capacidad para adaptarse a diferentes climas	- Resistente a sequías y heladas - Vulnerable a pestes y plagas
Papa nativa de altura (tubérculo)	<i>S. juzepczukki</i> y <i>S. curtilobum</i>	Papa amarga. <i>Ruki</i> o <i>parko</i> y <i>lucki</i> u <i>occucuri</i>	3.800-4.200 m			
Qañiwa (grano)	<i>Chenopodium pallidicaule</i>	Qañiwa o <i>cañihua</i> (quechua); <i>qañawa</i> (aymara)	3.800-4.200 m	- Cualquier suelo moderadamente fértil, incluidos suelos poco profundos, ácidos, alcalinos o salinos	En la etapa vegetativa, la planta puede sobrevivir hasta -10 °C, florece hasta -3 °C. Puede crecer hasta temperaturas de hasta 28 °C con suficiente humedad	- Resistente a heladas, vientos fuertes, lluvias torrenciales y periodos de sequía prolongados - No crece bien a la sombra, la exposición marítima o el exceso de humedad
Tarwi (leguminosa de grano)	<i>Lupinus mutabilis</i>	Lupino andino, <i>Tarhui</i> (quechua), <i>Tauri</i> (aymara)	3.800-3.850 m	Suelos de textura gruesa - Suelos salinos de laderas y baja fertilidad	Adaptada a climas fríos principalmente en valles andinos a gran altura	- Resistente a niveles excepcionales de sequía y heladas (plantas maduras)

Paso 2: asignación y estandarización de valores de IP a las capas base

Se asignaron y estandarizaron valores de productividad para cada capa (variables discretas) en función de una escala valorativa numérica versada en las características locales, la tecnología agrícola andina y los requerimientos y limitaciones de cinco cultivos nativos referentes: quinua (*C. quinoa*), tarwi (*L. mutabilis*), kañiwa (*C. pallidicaule*) y tres tipos de papa nativa (*S. tuberosum*, *S. juzepczukki* y *S. curtilobum*) (Cuadro 3).

(i) Productividad según altitud, orientación, pendiente y proximidad a cursos de agua

El MDE se reclasificó en función del límite altitudinal máximo apto para la producción de los cultivos considerados (4.200 m s. n. m.) (Cuadro 4). Luego, se reclasificaron los mapas de orientación y pendiente. Para el primero, se consideró que las laderas orientadas al norte poseen buena retención de humedad e insolación; que las laderas orientadas al este son las mejores para el cultivo, ya que poseen la mayor cantidad de horas de insolación; que las laderas orientadas al sur son más húmedas, pero poseen baja insolación; y, finalmente, que las orientadas al oeste son las más sombrías, y suelen estar más expuestas a la erosión por los vientos del oeste (Cuadro 5).

El mapa de pendientes se reclasificó de acuerdo con el Cuadro 6 en el que se tuvo en cuenta que en la agricultura andina se emplea el sistema de aterrazado que permite el cultivo en terrenos empinados e inclusive en laderas de fuertes pendientes. También se reclasificó el

Cuadro 4. Reclasificación del MDE de la Puna de Jujuy según valoración productiva.

Rango altitudinal (m s. n. m.)	Valor de productividad
2.434-4.200	"1" - Altitud apta cultivo
4.200-5.898	"0" - Altitud no apta cultivo

Cuadro 5. Reclasificación del mapa de orientación de la Puna de Jujuy según valoración productiva.

Valor	Orientación	Valor de productividad
1	Norte	"0,75" - Orientación apta no óptima para el cultivo
2	Este	"1" - Orientación óptima para el cultivo
3	Sur	"0,5" - Orientación apta, no aconsejable para el cultivo
4	Oeste	"0" - Orientación desfavorable para el cultivo

mapa de distancias a cursos de agua a partir de los criterios establecidos en el Cuadro 7.

(ii) Productividad edáfica

Para asignar un valor de IP (reajustado a los nuevos parámetros) a cada suelo o asociación de suelos se empleó como fuente la capa de índice de productividad (IP) elaborada exclusivamente en función de variables edáficas de Morales Poclava *et al.* (2015). Esta también está basada en la cartografía de suelos del INTA a escala 1:250.000 (INTA-UNSa, 2009) y se encuentra disponible en formato ráster en el portal IDESA (http://geoportal.idesa.gob.ar/layers/geonode%3Aip_edafico). En la ecuación general que emplearon Morales Poclava *et al.* (2015) para elaborar su modelo de IP (que, además de tipo de suelo, combina topografía y clima), se observan las características edáficas que se han ponderado y que, por lo tanto, el modelo que aquí se presenta replica:

$$IP = H \times D \times PEF \times Ta \times Tb \times Sa \times Alc \times MO \times Pg \times Pd$$

[Ecuación 1]

en la ecuación, "H" corresponde a la condición climática y "Pd" a la pendiente, mientras que el resto son características edáficas: drenaje (D), profundidad efectiva (PEF), textura superficial (Ta), textura subsuperficial (Tb), salinidad (Sa), alcalinidad (Alc), materia orgánica

Cuadro 6. Reclasificación del mapa de pendientes de la Puna de Jujuy según valoración productiva.

Valor	Clase (rango pendiente)	Valor de productividad
1	Llano a suave (0-10%)	"1" - Ladera cultivable óptima
2	Moderada (10-25%)	"1" - Ladera cultivable óptima
3	Empinada (25-45%)	"0,75" - Ladera cultivable apta
4	Muy empinada (45-55%)	"0,5" - Ladera cultivable apta no óptima
5	Acantilado (>55%)	"0" - Ladera no apta cultivo

Cuadro 7. Reclasificación del mapa de distancia a cursos de agua de la Puna de Jujuy según valoración productiva.

Valor	Rango de distancia a curso de agua (m)	Valor de productividad
1	0-500	"1" - Distancia óptima
2	500-1.500	"0,5" - Lejos del curso de agua
3	>1.500	"0" - Muy lejos del curso de agua

(MO) y pedregosidad (Pg).

La capa de IP edáfica descargada se re proyectó y recortó al área de interés. A partir de ésta, se realizó una estimación de IP para cada polígono de asociación de suelos del "shape" empleado como base (Figura 4, *supra*) mediante un muestreo de centroides. De esta manera, se obtuvo un valor de IP para cada polígono de asociación de suelos (Cuadro 8). A fines operativos para la posterior clasificación, se observa que los valores resultantes se agrupan en cuatro conjuntos bien claros siendo el tipo de suelo Abrapampa el que más se distancia con un IP de 0,33 (Figura 6). Se omitieron los valores obtenidos para siete de las geometrías ya que corresponden a salinas/salares o cuerpos de agua donde sería imposible cultivar (*e.g.* Laguna de Guayatayoc; Laguna de Pozuelos; Laguna de Vilama; Salinas Grandes; S. de Caucharí; S. de Jama; y S. de Olaroz), por lo que su valor de IP es de 0.

Entonces, a partir de los cuatro conjuntos de suelos identificados, se establecieron tres clases de productividad. La primera clase ("1") se asignó a los suelos cuyo

Cuadro 8. Valores de índice de productividad (IP), según parámetros edáficos obtenidos del modelo de Morales Poclava *et al.* (2015). Con un gradiente de color (de verde oscuro a amarillo) se señalan los cuatro conjuntos que se identificaron a partir del gráfico de dispersión.

Asociación Suelos Puna de Jujuy	Nomenclatura	IP (INTA)
Abrapampa	Ap	0.329414397
Arroyo Colorado - Cangrejillos	Arc-Can	0.201855421
Yacoraite	Yac	0.188316062
Pozuelos	Pz	0.103158943
Olacapato	Op	0.081574552
Carahuasi	Car	0.076063678
San Antonio de Los Cobres	Sac	0.070888907
Afloramiento + La Poma	Af+Lp	0.064012028
Afloramiento + Unquillar	Af+Un	0.059707347
Olaroz	Oz	0.059707347
Afloramiento + Orosmayo	Af+Oy	0.054390159
Afloramiento + La Poma Nazareno	Af+Lp-Na	0.000229117
Afloramiento + Coranzulí	Af+Cr	3.28125E-05
Afloramiento + Abra de Chorrillos	Af+Acr	3.28125E-05
Afloramiento + Nazareno	Af+Na	3.28125E-05
Afloramiento + Quilmes	Af+Qm	3.28125E-05
Catua	Ct	3.28125E-05
Susques	Sq	2.46094E-05

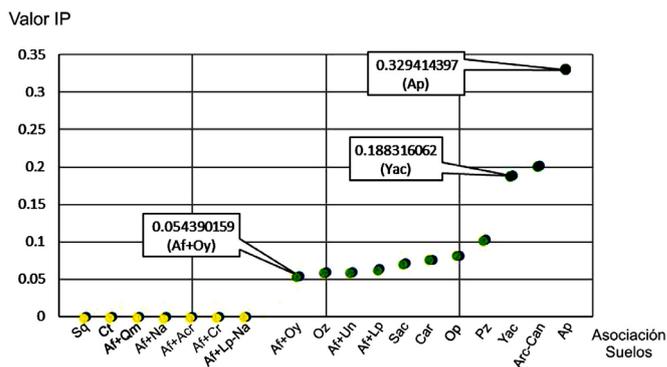


Figura 6. Dispersión de valores de índice de productividad (IP) edáfica obtenidos para cada asociación de suelos de la Puna de Jujuy. Se observan cuatro conjuntos de valores bien diferenciados.

rango de IP edáfico es 0.329414397 - 0.188316062, es decir, los suelos que presentan condiciones óptimas para el cultivo en la región. La segunda ("0,5") se asignó a los suelos cuyo IP edáfico se encuentra entre 0.103158943 - 0.054390159, es decir, aquellos que poseen una aptitud intermedia. El resto, con un IP edáfico de 0.000229117 - 0, fue asignado a la clase "0", es decir, aquellos suelos que no resultan aptos para el cultivo (Cuadro 9).

(iii) Reclasificación de la PPNA

En el caso de la capa de PPNA de Baldassini *et al.* (2012), a las cuatro clases previamente establecidas se le asignaron los siguientes valores de productividad (Cuadro 10).

Paso 3: suma lineal ponderada de las capas

Tras la estandarización de los valores de las capas base se procedió a su combinación. Para ello, se realizó una suma lineal ponderada que requirió, previamente, establecer jerarquías analíticas. Si bien todas las variables son importantes, algunas fueron determinantes. Entre ellas la altitud ya que, más allá de que se den condiciones favorables en todas las demás variables, si un punto en el terreno se haya a una altitud superior al límite tolerable por el cultivo, es muy probable que no prospere. Por ello, se jerarquizaron las variables de la siguiente forma (de mayor a menos importancia relativa):

- Altitud > PPNA > Proximidad a curso de agua > Suelo > Aspecto > Pendiente

Luego se aplicó el método de comparación por pares de Saaty (1994) mediante el complemento "Easy AHP" de QGIS (disponible para la versión 2.18), que facilita el cálculo de índice de consistencia y los cocientes de

Cuadro 9. Reclasificación del mapa de IP edáfico de la Puna de Jujuy por tipo de suelo según valoración productiva.

Asociación Suelos Puna de Jujuy	IP (INTA)	Valor de productividad
Abrapampa	0.329414397	1
Arroyo Colorado – Cangrejillos	0.201855421	1
Yacoraite	0.188316062	1
Pozuelos	0.103158943	0,5
Olacapato	0.081574552	0,5
Carahuasi	0.076063678	0,5
San Antonio de Los Cobres	0.070888907	0,5
Afloramiento + La Poma	0.064012028	0,5
Afloramiento + Unquillar	0.059707347	0,5
Olaroz	0.059707347	0,5
Afloramiento + Oros mayo	0.054390159	0,5
Afloramiento + La Poma Nazareno	0.000229117	0
Afloramiento + Abra de Chorrillos	3.28125E-05	0
Afloramiento + Nazareno	3.28125E-05	0
Afloramiento + Quilmes	3.28125E-05	0
Catua	3.28125E-05	0
Afloramiento + Coranzulí	3.28125E-05	0
Susques	2.46094E-05	0

multiplicación (Cuadro 11). Así se obtuvo una relación de consistencia (CR) de 0,06 que demuestra la consistencia de la matriz (si CR es menor a 0,1, la matriz es consistente, es decir, los criterios de jerarquización son coherentes).

Los cocientes de multiplicación obtenidos fueron empleados para generar la expresión que, finalmente, fue

Cuadro 10. Reclasificación del mapa de productividad primaria neta aérea (PPNA) de la Puna de Jujuy según valoración productiva.

Valor previo	Rango PPNA (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Valor de productividad
1	0-250	"0"
2	250-500	"0,25"
3	500-1.000	"0,5"
4	1.000-10.000	"1"

introducida en la "Calculadora Ráster" para realizar el álgebra de mapas y obtener el modelo: "altura_2_clases_norm@1" * 0.59 + "ppna_pna_norm@1" * 0.15 + "prox_agua_norm@1" * 0.11 + "suelos_norm@1" * 0.07 + "aspecto_norm@1" + 0.05 + "pendientes_norm@1" * 0.03.

Para comparar los resultados con los valores obtenidos por el Modelo de IP del INTA (Morales Poclava *et al.*, 2015), se realizó una estandarización lineal en con los rásters de ambos modelos empleando como principio la siguiente fórmula:

$$\text{Valor estandarizado} = (\text{valor} - \text{valor mínimo}) / (\text{valor máximo} - \text{valor mínimo})$$

De esta manera, los resultados fueron comparables ya que el valor más bajo de ambos modelos será 0 y, el más alto, 1. Dichos valores fueron clasificados en nueve clases de intervalos iguales y para su representación se empleó una simbología renderizada en pseudocolor monobanda, con una interpolación lineal y un gradiente de colores de rojo (valores bajos) a verde oscuro (valores altos). Esta misma simbología fue aplicada al modelo de IP del INTA normalizado (Morales Poclava *et al.*, 2015) para asegurar una comparación gráfica equivalente.

Cuadro 11. Valores obtenidos mediante el método de comparación de pares de Saaty (1994).

Criterios	Altitud	PPNA	Proximidad a cursos de agua	Suelos	Aspecto	Pendientes	Cocientes IP
Altitud	1,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	0,59
PPNA	0,11	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	0,15
Prox. Agua	0,11	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	0,11
Suelos	0,11	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	0,07
Aspecto	0,11	0,25	0,33	0,50	1,00	2,00	0,05
Pendientes	0,11	0,20	0,25	0,33	0,50	1,00	0,03

$$\lambda = 6,392$$

$$CI = 0,078$$

$$CR = 0,06$$

Finalmente, con el objetivo de contrastar los modelos con datos conocidos, se cargaron los puntos georreferenciados de cuatro sitios de la microrregión de Cusi Cusi que presentan evidencia de prácticas agrícolas actuales y/o arqueológicas (Pey 2017a; 2021); y las locaciones aproximadas de tres localidades con evidencia agrícola actual y/o arqueológica de otros tres sectores de la Puna: (i) cuenca media del Río Grande de San Juan (sitio El Angosto) (Fanco Salvi, 2014), (ii) sur de la Laguna de Pozuelos (sitio Moreta) (Angiorama *et al.*, 2019) y (iii) Casabindo (Albeck, 2011).

RESULTADOS

Como resultado final se obtuvo un modelo productividad agraria para la Puna de Jujuy ajustado a técnicas y cultivos tradicionales andinos. Este puede descargarse libremente en el siguiente enlace, donde se brinda un proyecto QGIS, capas y correspondiente simbología. Al comparar el modelo final obtenido con el modelo de IP del INTA (Morales Poclava *et al.*, 2015) (Figura 7), se observa que el modelo del INTA otorga valores productivos muy bajos (en su mayoría equivalentes a 0) a gran

parte del territorio puneño con relación con los datos derivados por el modelo desarrollado en el presente trabajo (ver valores absolutos en el Cuadro 12). En el modelo del INTA, sólo algunos parches se presentan como productivos o levemente productivos, entre ellos los coincidentes con el área ocupada por las unidades y/o asociaciones de suelos Abrapampa (los valores más altos y dentro de la que se encuentra la localidad de Casabindo y alrededores); Arroyo Colorado-Cangrejillos (productividad mediana); Pozuelos (productividad leve o baja, dentro de la que se encuentra el sitio de Moreta) y Olaroz (productividad también baja). Este último abarca la localidad de Cusi Cusi, pero deja por fuera tres sitios arqueológicos agrícolas locales (Pajchela Terrazas, Pajchela Núcleo y Huayatayoc Alto). En cuanto a la cuenca media del Río Grande de San Juan, y en particular la microrregión de El Angosto, la productividad asignada por el modelo del INTA es nula (0); mientras que el modelo aquí propuesto le asigna un índice elevado (0,79). De esta manera, se demuestra que el modelo generado en este trabajo opera como una herramienta más eficaz para señalar sectores con potencialidad agrícola, en coincidencia con datos de la realidad (algunos de estos sectores fueron efectivamente trabajados en el pasado y son cultivados en la actualidad).

A su vez, un análisis locacional de los sitios relevados en la microrregión de Cusi Cusi permitió la observación de las variables consideradas de manera discreta. Se destaca que todos los sitios se emplazan al abrigo de quebradas, a menos de 500 m del curso de un río permanente. En particular, en sectores que poseen una PPNA media (500-1.000 kg ha⁻¹ año⁻¹ de biomasa natural). La altitud de emplazamiento suele variar dentro de un rango de 3.800-3.950 m s. n. m. Es decir, el límite altitudinal se encuentra alrededor de los 4.000 m s. n. m., siendo este

Cuadro 12. Tabla comparativa de valores de índice de productividad (IP) absolutos asignados a los sitios de interés por ambos modelos.

Sitio	Valor IP INTA	Valor IP del Modelo
Cusi Cusi	0,16	0,95
Casas Quemadas	0,08	0,85
Pajchela Terrazas	0	0,85
Pajchela Núcleo	0	0,85
Huayatayoc Alto	0	0,85
El Angosto	0	0,79
Moreta	0,12	0,68
Casabindo	0,53	1

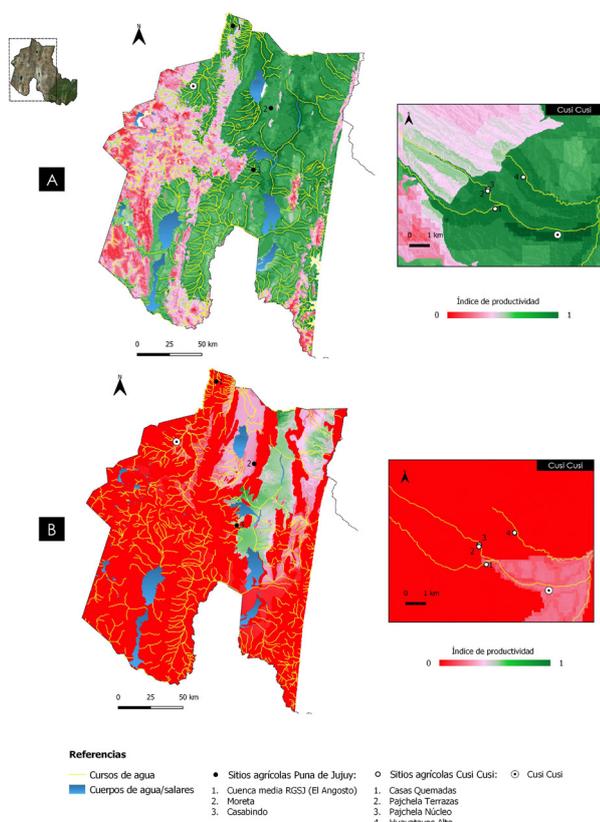


Figura 7. Comparación de resultados. (A) Modelo de aptitud agrícola de la Puna de Jujuy para el cultivo de vegetales microtérminos. (B) Modelo de índice de productividad (IP) basado en cultivos como la soja, sorgo y maíz elaborado por el INTA (Morales Poclava *et al.*, 2015).

Cuadro 13. Valores de aptitud del terreno local para cultivos microtérminos según orientación de las laderas.

Aptitud orientación	Orientación	Área (m ²)	Porcentaje del área total
0	Oeste	1.753,30	3,5
0,5	Sur	3.391,40	6,5
0,75	Norte	16.260,35	31
1	Este	30.913,4	59

Cuadro 14. Valores de aptitud del terreno local para cultivos microtérminos según pendientes.

Aptitud pendiente	Pendiente	Área (m ²)	Porcentaje del área total
0	Acantilado (> 55%)	1.476,40	2,5
0,5	Muy empinada (45-55%)	1.819,90	3,5
0,75	Empinada (25-45%)	20.319,88	39
1	Llano a moderada (0-25%)	28.702,30	55

un dato que podría tenerse en cuenta para ajustar el modelo a futuro. A su vez, suelen seleccionarse las laderas con orientación este (Cuadro 13) y una pendiente que, preferentemente, no supere una inclinación del 45% (si bien se han registrado andenes en pendientes inclusive mayores a 55%) (Cuadro 14). En cuanto al tipo de suelo, se ha demostrado que casi la totalidad de la superficie arqueológica cultivada se localiza sobre la asociación Afloramiento+Unquillar, es decir, suelos clasificados como Torripsamente líticos acompañados de porciones de afloramiento descubierto.

DISCUSIÓN

Los resultados presentados y su comparación con el modelo de IP vigente (Figura 7) manifiestan el contraste entre dos lógicas productivas diferentes. La consideración de ambas es igualmente necesaria si se desea conocer la aptitud productiva de la totalidad del paisaje jujeño. Cultivar en un desierto de altura con un relieve pronunciado es posible, teniendo en cuenta ciertos factores y considerando la existencia de técnicas o soluciones locales transmitidas de generación en generación. En términos de manejo topográfico, los agricultores puneños adaptan las *chakras* a la geografía atendiendo a sus continuidades, quiebres y pendientes, como se observa en el paisaje de la microrregión de Cusi Cusi (Pey, 2017; 2021). Además, en este ambiente predominan los afloramientos rocosos y los grandes clastos, los cuales, en lugar de ser un impedimento, podrían considerarse un recurso para la construcción y reconfiguración del paisaje productivo. Así, las particularidades geofísicas se

transforman en ventajas. De hecho, para la construcción y/o emplazamiento de distintos tipos de estructuras productivas, se emplean desde afloramientos rocosos descubiertos hasta grandes bloques ignimbríticos erráticos (Figura 8).

Los resultados obtenidos muestran la importancia de reconsiderar el potencial de las asociaciones de suelos con un componente rocoso (e.g. Afloramiento+Unquillar) desde una lógica productiva andina. Se trata de asociaciones que, desde las fuentes nacionales, se clasifican bajo la Clase E o D, es decir, suelos que por presentar severas limitaciones no son arables, ni aprovechables (INTA-UNSa, 2009). Entre las limitaciones se describen un fuerte riesgo de erosión, fuerte erosión actual, dificultoso drenaje, anegabilidad frecuente, una fuerte salinidad y/o sodicidad y una escasa profundidad efectiva (hasta 40 cm). Por lo tanto, es muy importante tener en cuenta que los suelos agrícolas no sólo dependen de la geología local, sino que, en general, son el producto lo que Zuccarelli y Quesada (2017) entienden como procesos de antropización. Dichos procesos suelen darse a través de generaciones que realizan diversas prácticas que aportan a la fertilidad del sustrato, tal como el aporte de desechos domésticos u otra materia orgánica (e.g. *wanu*) mediante la roturación. A dichas prácticas, de impacto subsuperficial, se suman otras como la limpieza de las superficies de cultivo de las que derivan los despedres como los registrados en Cusi Cusi y áreas aledañas (Pey, 2021). Inclusive, es posible construir andenes sobre roca prácticamente desnuda y rellenarlos con sustrato fértil hasta alcanzar la potencia



Figura 8. Aprovechamiento de grandes rocas para el montaje de estructuras productivas en Cusi Cusi. (A) Despedre arqueológico. (B) Estructura de almacenamiento arqueológico. (C) Muro perimetral de canchón de cultivo actual.

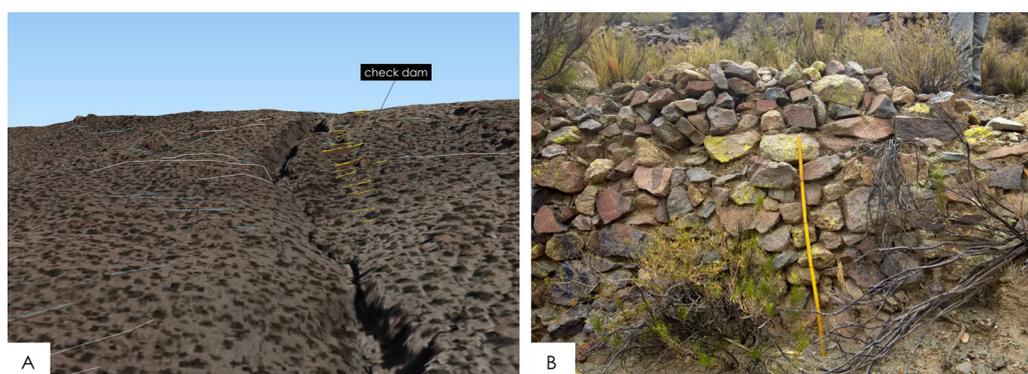


Figura 9. (A) Relieve y emplazamiento de check dams arqueológicos asociados a una cárcava en el sitio Pajchela Terrazas de Cusi Cusi. (B) Detalle del muro de contención.

o profundidad que el cultivo requiera, como se ha registrado en el área de Casabindo (Albeck, 2011).

En cuanto al dificultoso drenaje y la tendencia a la anegabilidad, en el área andina esto suele compensarse no sólo con el tratamiento de suelos mencionado en el párrafo anterior, sino también con el empleo de elaborados sistemas de riego y diferentes tecnologías de retención y circulación de humedad (Lane, 2014). Por ejemplo, en la cuenca media y superior del Río Grande de San Juan se han registrado muros de control de escorrentía, andenes y superficies de cultivo dependientes de la inundación denominadas melgas (Franco Salvi, 2014; Franco Salvi *et al.* 2019; Pey, 2021).

Finalmente, en lo que respecta al riesgo de erosión, se conocen diferentes estrategias que son y han sido empleadas a través de la historia del paisaje agrícola andino para su control (Lane, 2014). Por ejemplo, en la microrregión de Cusi Cusi se han registrado *check dams* (*sensu* Denevan, 2001) arqueológicos en el sitio Pajchela Terrazas, en un sector tendiente a la formación de cárcavas (Figura 9). Se trata de muros altos que se emplazan de manera perpendicular al curso de agua y que permiten la conservación de los suelos, ampliando y preservando las áreas de cultivo frente a fuertes procesos erosivos (Zuccarelli Freire *et al.*, 2021). También se han registrado represas modernas emplazadas sobre el

curso del río para disminuir los efectos erosivos de la crecida estacional del río Pajchela sobre los campos arqueológicos y actuales (Pey, 2021).

CONCLUSIONES

La evaluación de la productividad agropecuaria de un sitio no depende tan sólo de sus características ambientales, sino de cómo se ponderan éstas en función del sistema productivo que se emplee como referente. No es lo mismo evaluar la productividad puneña en función de un sistema extensivo, que prioriza un producto homogéneo cultivado en grandes sectores de terreno fértil y continuo (que, a su vez, garanticen la producción masiva mediante el empleo de máquinas que ahorren tiempo y trabajo); que abordarla desde las formas andinas de cultivo tradicionales. La elaboración de modelos que contemplen otras lógicas permite repensar la potencialidad (y variabilidad) de sectores del país que históricamente fueron homogeneizados. A su vez, permite reconocer prácticas que tienen larga historia en el territorio y que presentan soluciones efectivas ante los posibles obstáculos ambientales. El modelo presentado en este trabajo contempla la lógica agrícola andina del paisaje de la Puna de Jujuy. Como resultado, y a diferencia de otros modelos que otorgan valores de productividad despreciables, se detectaron terrenos con elevada apti-

tud para la práctica agrícola (en términos contextuales, aplicado a las restricciones de un desierto de altura) los sectores sobre los que efectivamente se emplazan los sitios bajo estudio (otorgándoles un índice de 0,85 o del 85%). A su vez, el modelo reflejó eficazmente la aptitud de otras áreas de la Puna jujeña que también presentan evidencia actual y/o arqueológica de prácticas agrícolas. Esto último lo convierte en una buena herramienta para su aplicación en otras áreas de la región pudiendo, inclusive, considerarse como un

modelo predictivo para la prospección de estructuras agrícolas arqueológicas a futuro.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los/as integrantes del Proyecto Arqueológico y Antropológico Pallqa (dirigido por el Dr. Viquer) y a quienes participaron en las tareas de campo. También al Dr. Baldassini por la información brindada. Finalmente, se agradece a los/as evaluadores/as del artículo cuyas sugerencias han enriquecido este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Albeck, M. E. (2011). Estudios sobre agricultura prehispánica en Casabindo (1980-1993). En: Korstanje, A y Quesada, M. (Eds.), *Arqueología de la agricultura. Casos de estudio en la región andina* (pp. 6-47). Tucumán, Argentina: Ediciones Magna.
- Angiorama, C., Becerra, M.F., Coronel, A., Franco Salvi, V., Giusta, M., Lauricella, M.S., Pérez Pieroni, M. J. y Rodríguez Curletto, S. (2019). Historia ocupacional y prácticas productivas en Moreta (Puna de Jujuy, Argentina) durante tiempos prehispánicos y coloniales. *Relaciones de la Sociedad Argentina de Antropología*, 44(1): 1-10.
- Baldassini, P., Volante, J. N., Califano, L. M. y Paruelo, J. M. (2012). Caracterización regional de la estructura y de la productividad de la vegetación de la Puna mediante el uso de imágenes MODIS. *Ecología austral*, 22 (1): 22-32.
- Bravo, G., Bianchi, A., Volante, J., Alderete Salas, S., Sempronii, G., Vicini, L., Fernández, M., Lipshitz, H. y Piccolo, A. (1999). *Regiones agro-económicas del Noroeste Argentino*. Buenos Aires, Argentina: INTA. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmpregiones_agroeconomicas_homegeneas_del_noa.pdf. (Acceso: 30/6/2020).
- Bugallo, L. (2019). Los puneños y la cría de sus cultivos. Prácticas agrícolas en la puna jujeña durante el siglo XX. *Illes i Imperis*, 21: 225-259.
- Denevan, W. (2001). *Cultivated Landscapes of Native Amazonia and the Andes*. Oxford, Inglaterra: Oxford University Press.
- Food and Agriculture Organization-FAO. (2007). *Ecocrop - Chenopodium pallidicaule, Data sheet*. Recuperado de: <http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/cropView?id=4494>
- Franco Salvi, V. (2014). Estudios preliminares sobre paisajes agrarios del Tardío en el área del San Juan Mayo (Provincia de Jujuy, Argentina). *Comechingonia virtual*, 8(2): 137-156.
- Franco Salvi, V., Angiorama, C. y Coronel, A. (2019). Paisajes agrarios y transformaciones sociales en el San Juan Mayo y sureste de la cuenca de Pozuelos (Provincia de Jujuy, Argentina). *Intersecciones en Antropología* 20 (1): 55-68.
- Guagliardo, J.P. (2011). La temporalidad de las prácticas: organización del paisaje y formas de memoria en comunidades actuales del altiplano surandino. El caso de Villa Candelaria, Nor Lípez, Bolivia. *Arqueología*, 17: 195-220.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-Universidad Nacional de Salta-INTA-UNSa. (2009). *Adecuación a un Sistema de Información Geográfica del estudio "Los Suelos del NOA (Salta y Jujuy), Nadir A. - Chafatinos T., 1990"*. Salta, Argentina: Ediciones INTA.
- Klingebiel, A. y Montgomery, P. (1961). *Land capability Classification. USDA Agricultural Handbook 210*. Washington DC, USA: US Government Printing Office.
- Lane, K. (2014). Water Technology in the Andes. En: Selin, H. (Ed.), *Encyclopaedia of the History of Science, Technology, and Medicine in Non-Western Cultures*. (pp. 1-24). Nueva York, USA: Springer.
- Morales Poclava, C., Sobral, R., Nakama, V., Volante, J. y Bianchi, A. (2015). *Evaluación de tierras mediante métodos paramétricos: ajuste del sistema índice de productividad, IP, y su aplicación mediante herramientas SIG para las provincias de Salta y Jujuy*. Salta, Argentina: Ediciones INTA. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_indice_productividad_salju_moralespoclava.pdf (Acceso: 13/07/2019)
- Nadir, A. y Chafatinos, T. (1990). *Los Suelos del NOA (Salta y Jujuy)*. Salta, Argentina: INTA.
- National Research Council. (1989). *Lost crops of the Incas: Little Known Plants of the Andes with Promise for Worldwide Cultivation*. Washington D.C., USA: National Academy Press.
- Pey, L. (2017a). Diseño metodológico para un modelo de potencial productivo del entorno de un sitio agrícola andino. *La Zaranda de Ideas*, 15(2): 113-133.
- Pey, L. (2017b). Nuevas formas, ¿viejos saberes? El caso de la Cooperativa Agrícola de Comunidades Altoandinas Limitada (CADECAL) (Puna de Jujuy, Argentina). En *Resúmenes de exposiciones del VI Congreso Mundial de la Quinua y III Simposio Internacional de Granos Andinos* (p. 9). Puno, Perú: MINAGRI, FAO y UNALM.
- Pey, L. (2021). *Tejedores de andenes: una interpretación de la historia del paisaje agrícola de Cusi Cusi (Rinconada, Puna de Jujuy)*. Tesis doctoral. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Pirola, M. (2019). *Eventos áridos en la Puna de Jujuy durante la segunda mitad del Holoceno y sus efectos sobre las sociedades humanas: una aproximación desde la Arqueología Ambiental*. Tesis doctoral) Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Saaty, T.L. (1994). How to Make a Decision-The Analytic Hierarchy Process *Interfaces*, 24: 19-43.
- Tapia, M.E. y Fries, A.M. (2007). *Guía de campo de los cultivos Andinos, Origen de las plantas cultivadas en los Andes*. Lima, Perú: FAO y ANPE.
- Vargas Gil, J. R. y Bianchi, A. R. (1981). *Memoria Anual de Información Técnica para productores*. Salta, Argentina: INTA.

- Zerda, L. (1995). *Características naturales, agrícolas, ganaderas y forestales de la Provincia de Jujuy*. Jujuy, Argentina: Ministerio de Economía, Secretaría de Estado de Agricultura y Ganadería, Dirección General de Recursos Naturales Renovables de Jujuy.
- Zuccarelli Freire, V., Meléndez, A. S., Rodríguez Oviedo, M. y Quesada, M. N. (2021). Erosion control in Prehispanic agrarian landscapes from Northwestern Argentina: El Alto-Ancasti Highlands case study (Catamarca, Argentina). *Geoarchaeology*, 37(1): 74-95. Doi: <https://doi.org/10.1002/gea.21862>
- Zuccarelli, V. y Quesada, M. (2017). Procesos de antropización del paisaje en las Sierras El Alto-Ancasti a finales del 1er milenio d.C. Trabajo presentado en el III *Taller de Arqueología de las Sierras de Ancasti y Zonas aledañas*. Cerro Colorado, Córdoba, Argentina.