

## ARTÍCULOS



## APORTE A LOS ESTUDIOS PALEOAMBIENTALES DEL VALLE DE AMBATO (CATAMARCA) A PARTIR DE LA RECONSTRUCCIÓN DEL PALEO NDVI (442-1998 AD)

María Bernarda Marconetto\*  
Lidia Susana Burry\*\*  
Patricia Palacio\*\*\*  
Mariano Somoza\*\*  
Matilde Trivi\*\*\*\*  
Henrik B. Lindsoug\*  
Héctor D'Antoni\*\*\*\*\*

### Resumen

Reconstruimos aquí parte de la historia de la vegetación del Holoceno Tardío, utilizando un módulo del modelado ecosistémico, el *Modelo de Retrodicción de Ecosistemas* HEMO. Esta reconstrucción se relaciona con la absorción de la radiación fotosintéticamente activa (APAR) de las plantas, la cobertura vegetal y la humedad. Se presenta la reconstrucción del paleo-NDVI en el Valle de Ambato, Catamarca (Argentina) desde el año 442. Se discuten las anomalías positivas y negativas ligadas a diferentes momentos de la ocupación Aguada, y la sensibilidad que presentó el modelo en relación con fenómenos globales.

**Palabras clave:** Modelado ecosistémico; Valle de Ambato; Arqueología; Paleo-NDVI.

### Abstract

In order to reconstruct the Late Holocene vegetation history we used a module from of HEMO (*Hindcasting Ecosystems Model*), an ecosystem-process model. This reconstruction of the environmental past in terms of the normalized difference vegetation index (NDVI) is related to plant's absorption of the photosynthetically active radiation (APAR), with the canopy geometry of woody plants, soil cover and humidity. This work presents the Paleo-NDVI reconstruction from 442 AD to the present. Positive and negative anomalies are discussed here, which are linked to different Aguada's occupational sequences, together with the model sensibility to global phenomena.

**Keywords:** Ecosystem modeling; Ambato Valley; Archaeology; Paleo-NDVI.

\* Instituto de Antropología de Córdoba, (IDACOR), CONICET – FFyH – Universidad Nacional de Córdoba. Correo electrónico: [bernarda.marconetto@gmail.com]

\*\* Laboratorio de Palinología y Bioantropología, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata, (UNMdP), Argentina.

\*\*\* CONICET. Laboratorio de Palinología y Bioantropología, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UNMdP, Argentina.

\*\*\*\* Universidad Atlántida Argentina, Mar del Plata, Argentina. Laboratorio de Palinología y Bioantropología, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UNMdP, Argentina.

\*\*\*\*\* Profesor Emérito asociado a NASA Ames Research Center. Moffet Field California, EEUU.

## Introducción

Este trabajo es una primera reconstrucción del escenario paleoambiental en que se entramaron los cambios observados en el registro arqueológico del Valle de Ambato 27°54'S-28°03'S; 65°45'W- 65°55'W (Provincia de Catamarca, Argentina) a partir de la ocupación conocida en la arqueología argentina como Aguada de Ambato (400-1000 AD). Diferentes trabajos basados en datos paleoambientales –sedimentos lacustres, columnas de hielo, secuencias de polen– dan cuenta de fluctuaciones ambientales de distinta intensidad ocurridas a lo largo del Holoceno y que afectaron a los Andes Meridionales (Baied 1999; Cardich 1980; Fernández et al. 1991; Grosjean et al. 1997; Markgraf 1985; Olivera et al. 2004; Thompson et al. 1994; Valero Garcés et al. 2000). Con el objeto de monitorear estas fluctuaciones en nuestra área de investigación empleamos el modelado ecosistémico.

La aplicación del modelado ecosistémico a la arqueología es novedosa y está mostrando interesantes variaciones que pueden valorarse a escala local. Iniciamos el modelado del proceso ecosistémico usando un módulo fundamental del *Hindcasting Ecosystems Model* (HEMO) para reconstruir el paleo-NDVI. Las retrodicciones generadas por el modelo permiten estimar el estado de la vegetación y sus cambios en el pasado, cotejando estos últimos con las fluctuaciones contemporáneas de uno o más factores ambientales. El HEMO fue desarrollado por el grupo de Héctor D'Antoni en NASA Ames Research Center (California) para integrar sus contribuciones de análogos terrestres al Programa de Astrobiología entre 1998 y 2008. Al iniciar nuestra investigación en Ambato contábamos con los resultados del HEMO a escala continental en un lapso de 754 años (1246-2000), con resolución temporal de un año (D'Antoni 2006, 2008a). Sin embargo, nuestro objetivo requería acercarse al inicio del primer milenio. En este trabajo logramos llegar al 442 AD, que es anterior a la ocupación Aguada del Valle de Ambato.

La teledetección satelital mide el estado de la vegetación por su reflexión en el rojo (RED) y el infrarrojo cercano (NIR). Los detectores AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) montados en satélites artificiales transmiten datos en una escala de 0 a 225, donde 0 corresponde al agua y 225 a la vegetación más densa (D'Antoni y Spanner 1993). La relación de rojo e infrarrojo cercano se ha utilizado para crear varios índices. El más usado es el índice de las diferencias normalizadas NDVI (por sus iniciales en inglés). Se usan estas bandas del espectro electromagnético solar porque la clorofila absorbe en el rojo y las paredes celulares reflejan en el infrarrojo cercano. El NDVI es igual al cociente entre  $(NIR - RED)$  y  $(NIR + RED)$ . El resultado es una medida con rango  $-1 \leq NDVI \leq +1$ . Los valores negativos corresponden al agua en cualquiera de sus tres estados, mientras que los valores positivos indican vegetación, desde extremadamente rala a muy densa. Esta es una lectura básica del índice que se puede afinar contrastando los valores satelitales con la "verdad de tierra". Los bosques y pastizales pueden tener NDVI de alrededor de 0,6 y aún

mayores mientras que los semidesiertos y desiertos tienen valores menores que 0,2. Los cambios del NDVI a lo largo del tiempo se deben a variaciones del estado de la vegetación relacionados a cambios climáticos, a impactos por la carga animal o la actividad humana.

Las series temporales de datos NDVI obtenidas por detectores montados en satélites artificiales permiten supervisar la dinámica del ecosistema. Se han realizado numerosos estudios de vegetación de escala regional a global con datos del detector AVHRR que orbita a bordo de satélites de la NASA y la NOAA desde 1978. Los datos han sido corregidos y resumidos en varias ocasiones, como en NASA-Pathfinder AVHRR Land (NASA-PAL) que es una base de datos con cobertura global y resolución espacial de 8 km, disponible desde 1981.

Las variaciones espaciales y temporales de la actividad fotosintética de la vegetación tienen una estrecha relación con la disponibilidad de agua en el suelo, especialmente en zonas áridas y semiáridas (Fabricante *et al.* 2009; Tucker *et al.* 1985). En este sentido, se han comparado series temporales de NDVI con series temporales de variables climáticas, como temperatura del aire y precipitación, con el fin de explorar las relaciones entre variables ambientales y cambios del NDVI (Herrmann *et al.* 2005; Xiao y Moody 2005). Como antecedente de la aplicación del método usado en este estudio (*vide infra*) podemos citar trabajos como el de D'Antoni y Schäbitz (1995) en el cual se calculó el paleo-NDVI a partir del polen fósil. Estos autores realizaron en primer lugar una regresión múltiple entre distintos tipos polínicos actuales y el NDVI actual de distintos sitios de Patagonia para luego retroceder el NDVI a partir de un perfil polínico de Meseta Latorre en la Provincia de Santa Cruz. Trivi (2003) en la misma provincia estableció de modo semejante el paleo-NDVI a partir del perfil polínico de Arroyo Feo, relacionando la información obtenida con la arqueología del sitio. Como caso de aplicación de este tipo de análisis en arqueología también puede mencionarse el trabajo de Vicent García y colaboradores (2004) en su estudio de la Edad del Bronce en el sur de los Urales.

## **Materiales y métodos**

*Se trabajó con:*

a) datos de NDVI del período 1981 - 1998 extraídos del *Global Inventory Modeling and Mapping Studies* (GIMMS) (Tucker *et al.* 2004) derivados de las imágenes satelitales AVHRR/NOAA series 7, 9, 11, 14, 16 y 17;

b) datos de anillos de crecimiento obtenidos del *International Tree Ring Data Bank* y del *World Data Center for Paleoclimatology archives*<sup>1</sup> correspondientes a nueve cronologías

<sup>1</sup> [<http://www.ndc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-datasets/tree-ring>].

de *Juglans australis* y *Cedrella angustifolia* del bosque montano del Noroeste Argentino del lapso 1765 a 1985 (Tabla 1) (Villalba et al. 1985, 1992), y a cuatro cronologías de *Fitzroya cupressoides* de la Patagonia entre -342 y 1995 (Lara et al. 2000; Villalba et al. 1996);

c) datos de isótopos del oxígeno e hidrógeno, gases atmosféricos, sulfatos no-marinos (Cole-Dai et al. 2000; Jiang et al. 2012; Mosley-Thompson et al. 2003; Zhou et al. 2006; Zielinski 1994) y un elemento cosmogénico (Berilio 10) (Bard et al. 1997, 2000, 2003, 2007) contenidos en el hielo antártico y de Groenlandia, extraídos de la base de datos de archivos paleoclimáticos mencionada y que corresponden al rango de 442 a 1998.<sup>2</sup>

**Tabla 1.** Sitios, ubicación geográfica y cronologías del NOA.

Sitio	Latitud	Longitud	Datos período		msnm	Especies	Autores
			Inicio	Fin			
El Arrasayal (Salta)	-22,73	-64,53	1765	1985	880	JGAU	Villalba et al. (1992)
Río La Sala (Salta)	-24,60	-64,58	1849	1981	700	JGAU	Villalba et al. (1985, 1992)
Finca del Rey (Salta)	-24,60	-64,58	1810	1981	1700	CEAN	Villalba et al. (1985)
Los Laureles (Salta)	-25,12	-65,55	1826	1979	1650	JGAU	Villalba et al. (1992)
Río Bolsas, Piedra Parada (Jujuy)	-23,92	-65,32	1689	1981	1850	JGAU	Villalba et al. (1985, 1992)
Río Blanco (Jujuy)	-24,92	-65,32	1850	1981	1900	CEAN	Villalba et al. (1985, 1992)
Finca Las Pichanas (Salta)	-26,08	-65,38	1848	1981	1070	JGAU	Villalba et al. (1992)
Dique Escaba (Tucumán)	-27,70	-65,78	1813	1985	900	JGAU	Villalba et al. (1992)
Río Horqueta (Tucumán)	-27,09	-65,51	1783	1982	1850	JGAU	Villalba et al. (1992)

Nota: JGAU: *Juglans australis*; CEAN: *Cedrella angustifolia*.

<sup>2</sup> [<http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/ice-core>].

Se utilizó el Módulo de Vegetación del HEMO (D'Antoni 2008b) para retrodecir el paleo-NDVI en el Valle de Ambato entre los años 442 y 1998 AD. El Módulo de Vegetación incluye el entrenamiento de un modelo de redes neuronales con datos de NDVI de la actualidad (1981 - 1998) de 11 píxeles de 8 km que cubren el área de investigación. Las unidades de vegetación propuestas para el Valle de Ambato por De la Orden y Quiroga en 1997 se utilizaron como "verdad de tierra" para verificar la justeza de los resultados del entrenamiento y luego para interpretar los cambios predichos para el pasado en esos píxeles.

Las Redes Neuronales Artificiales son herramientas estadísticas no lineales y no paramétricas. Los elementos que constituyen una red neuronal son los nodos o neuronas. Hay tres tipos de neuronas: de entrada (datos), ocultas y de salida (resultados). Para pasar al nivel oculto, el procesado debe asignar a cada dato un peso adecuado; la retropropagación significa que si el peso no es aceptable, el dato vuelve atrás y se recalcula el peso hasta que alcanza un nivel aceptable (para cruzar el umbral e incorporarse al modelo). La integración tridimensional de las neuronas es lo que les confiere la condición de "red" y el álgebra es no lineal porque de lo contrario la red se aplastaría haciéndose lineal perdiendo mucho de su poder explicativo. La red se "entrena" de modo similar al calibrado de las ecuaciones lineales, usando datos reales para los predictores y para la incógnita. El "entrenamiento" finaliza cuando todos aquellos datos a los que fue posible asignar un peso se han incorporado al modelo. Entonces, este último está listo para realizar predicciones o retrodicciones. Los algoritmos más usados son el perceptrón y las neuronas sigmoideas (Nielsen 2015). Se utilizó en este trabajo el paquete de software Weka (2009). El algoritmo utilizado es el perceptrón multicapa, formado por capas de perceptrones simples que se relacionan entre sí por una función de retropropagación. Esta función permite equilibrar los pesos de todos los perceptrones simples de la red y aproximar las relaciones no lineales (Hall et al. 2009) hasta construir el modelo.

El paleo-NDVI se retrodijo hasta el año 442 AD a resolución anual mediante el modelo de las redes neuronales previamente entrenado con datos de NDVI, anillos de crecimiento, isótopos y gases atrapados en el hielo antártico y de Groenlandia.

### **Retrodicción**

Para realizar la retrodicción del período 442 - 1998 AD se llevaron a cabo los siguientes procedimientos:

*Retrodicción de datos de anillos faltantes.* Mediante el entrenamiento de un modelo con los datos de isótopos del hielo de Groenlandia y de anillos de crecimiento de árboles de Patagonia<sup>3</sup> (de los sitios Río Cisne, La Esperanza, Río Motoco y Puerto Café) se retrodijeron los anillos faltantes para completar el período estudiado (Tabla 2).

<sup>3</sup> Si bien la correlación de las series isotópicas y gaseosas seleccionadas con las series dendroclimáticas disponibles es buena, se prevé en una próxima etapa, con resoluciones espaciales más finas y otros datos espectrales, incluir los datos disponibles para Quelccaya.

**Tabla 2.** Sitios, ubicación geográfica y cronologías de Patagonia.

Sitio	Latitud	Longitud	Datos período		msnm	Especies	Autores
			Inicio	Fin			
Río Cisne (Chubut)	-42,15	-71,55	441	1974	550	FICU	Lara et al. (2000) Villalba et al. (1996)
La Esperanza (Río Negro)	-41,25	-71,90	-342	1995	750	FICU	Lara et al. (2000) Villalba et al. (1996)
Río Motoco (Chubut)	-45,08	-71,83	320	1993	1200	FICU	Lara et al. (2000) Villalba et al. (1996)
Puerto Café (Chubut)	-42,73	-71,97	311	1992	535	FICU	Lara et al. (2000) Villalba et al. (1996)

Nota: FICU: *Fitzroya cupressoides*

**Generación del modelo.** Se ingresaron al programa de redes neuronales los datos de NDVI anual (1981 - 1998) y los anillos de crecimiento del NOA para ese mismo período y se generó el modelo. A continuación se ingresaron los datos de los anillos de las cronologías mencionadas en (1) y se realizó la retrodicción para el lapso 442 - 1998 con resolución anual.

**Validación. Modelo actual.** Con el modelo se simularon los NDVI anuales de cada pixel del período 1981 - 1998. Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre el NDVI real y el NDVI simulado para valorar similitudes y diferencias (Tabla 3).

**Retrodicción. Modelo paleo-NDVI (442 - 1998 AD).** Se realizó la retrodicción del NDVI hasta 442 AD y con el objetivo de visualizar la magnitud de los desvíos de los paleo-NDVI anuales con respecto a los valores medios, se calcularon las anomalías empleando la siguiente fórmula:

$$\text{Anomalía (n)} = [\text{NDVI}_p - \text{paleo-NDVI(n)}] / \text{sd.}$$

Donde: **n**: año, **NDVI<sub>p</sub>**: promedio del paleo-NDVI del período 442 - 1998, **paleo-NDVI(n)**: NDVI de cada uno de los años del período 442 - 1998, **sd**: Desviación Standard del paleo-NDVI.



**Tabla 3.** Coeficiente de correlación de Pearson (r) entre anillos de NOA y *proxies* (anillos de Patagonia).

Procedencia de datos de anillos	r
El Arrasayal, Salta	0,26
Río Bolsas, Piedra Parada, Jujuy	0,07
Río La Sala, Salta	0,85
Finca del Rey, Salta	0,70
Los Laureles, Salta	0,80
Río Blanco, Jujuy	0,70
Finca Las Pichanas, Salta	0,84
Dique Escaba, Tucumán	0,66
Río Horqueta, Tucumán	0,83

**Tabla 4.** Coeficiente de correlación de Pearson entre NDVI simulado y real del período 1981-1998.

Pixel	r
1	0,78
2	0,91
3	0,70
4	0,99
5	0,89
6	0,83
7	0,86
8	0,50
9	0,76
10	0,78
11	0,82

Se consideró la siguiente escala de anomalías: mayores de 2 sd (extrema positiva), entre 2 y 1 sd (media positiva), entre 1 y -1 sd (normal), entre -1 y -2 sd (media negativa) y menores de -2 sd (extrema negativa) (Britos y Basconcelo 2012).

## Resultados

### Modelo Actual

La correlación entre los NDVI simulados y reales del período 1981 - 1998 de los píxeles correspondientes al Valle de Ambato y zonas vecinas (Tabla 4), mostró que los píxeles con correlación más alta fueron el 4 (r=0,99), el 2 (r=0,91), el 5 (r=0,89), el 6 (r=0,83) y el 7 (r=0,86). Los restantes píxeles mostraron correlaciones entre 0,78 y 0,50.

Los valores de NDVI promedio en el valle disminuyen de Este a Oeste. El NDVI resulta un descriptor confiable del estado de la vegetación actual de la región (Figura 1).

El pixel 2 corresponde casi totalmente a las Yungas (bosques húmedos de montaña) ubicados al Noreste del Valle de Ambato. Este sector ha sido alterado en bajo grado por el desmonte y los diferimientos fiscales que impulsaron el desmonte y posterior plantación de nogales desde mediados de la década de 1990, en el sector sur del valle. El pixel 4 cubre un sector con numerosos sitios arqueológicos. La vegetación es de bosque en galería del fondo de valle (con dominancia de *Prosopis* sp., *Geoffroea decorticans*, *Celtis tala*) y de mosaicos de bosque y arbustal del piedemonte de la Sierra Graciana con dominancia de los géneros *Schinopsis* y *Aspidosperma*. El pixel

5, involucra pastizales de piedemonte alto y de la cumbre de la sierra Graciana. El pixel 6 cubre un sector de relativa homogeneidad en su fisonomía vegetal formada por pastizales y mosaicos de arbustales sobre las laderas y piedemontes al Oeste del valle. El pixel 7 ha sufrido alteraciones significativas debido a los emprendimientos mencionados. Aquí se encuentran la mayoría de los sitios arqueológicos excavados en la región.

### *Modelo Paleo- NDVI*

La figura 2 presenta **la dinámica de los paleo-NDVI de los píxeles 2, 4, 5, 6 y 7** en el período **442 - 1998**. Los resultados muestran que los píxeles 2 y 5 ubicados al NE poseen los valores más elevados de NDVI. Al mismo tiempo estos dos píxeles se diferencian en las variaciones de los paleo-NDVI en el tiempo. El pixel 5 es estable a lo largo de toda la secuencia con valores levemente superiores a 0,6 en contraposición al pixel 2 cuyos valores presentan sensibles variaciones con valores extremos, como 0,4 y 0,75. El pixel 4 presenta valores más bajos respecto del 2 y del 5 y, salvo excepciones, los valores varían. Los píxeles 6 y 7, que corresponden a los sectores sur y oeste del área analizada, presentan los valores más bajos.

Se observan variaciones de diversa intensidad a lo largo de toda la secuencia. Los gráficos presentados por la Figura 3 (3.1 a 3.16) son recortes cada 100 años de las anomalías en los valores de paleo-NDVI de la secuencia temporal completa para los píxeles analizados.

Se observan fluctuaciones en los valores de paleo-NDVI en los cinco píxeles, hacia fines del 500 e inicios del 600 (Figura 3.2). Se registra una caída abrupta de los valores en el pixel 2 por debajo de los valores de los demás píxeles, en tanto se incrementan sensiblemente los valores del pixel 4. Los restantes muestran oscilaciones pronunciadas. Se registran para este momento anomalías extremas positivas y negativas en los diferentes píxeles.

Se dan condiciones semejantes a las actuales desde aproximadamente el 620 hasta inicios del 700 AD (Figura 3.3), momento en que se observan algunas anomalías extremas negativas y positivas afectando diferentes píxeles. Una situación similar se nota entre mediados y fines del 800 AD (Figura 3.5).

Se observaron escasas variaciones a partir del año 930 AD, aumentando las anomalías medias negativas hacia el inicio del segundo milenio, continuando a lo largo de casi un siglo (Figuras 3.6 y 3.7). Exceptuando algunas décadas, en las que se registran algunas anomalías medias positivas, esta situación parece continuar hasta prácticamente mediados del 1400 AD, cuando un escenario de fluctuaciones parece volver a instalarse (Figuras 3.8 a 3.11). Por otra parte es notable cómo vuelven a observarse fluctuaciones marcadas hacia 1470, intensificándose claramente hacia finales del 1500 y continuando con distintos niveles de intensidad hasta mediados del Siglo XX.

Finalizando en un escenario conocido (Figura 3.16) que cubre el lapso entre 1942 y 1998, podemos observar valores que pueden describirse entre normales y anomalías

medias (tanto positivas como negativas). Se registran unas pocas anomalías extremas que afectan píxeles aislados.

## Discusión

En la interpretación de los resultados tuvimos en cuenta los píxeles 2, 4, 5, 6 y 7, que presentan una correlación superior a 0,80 entre el NDVI real y los datos de la simulación, y algunas particularidades que los hacen relevantes por su importancia arqueológica y fitogeográfica. Los píxeles mencionados incluyen las unidades de vegetación de a) Yungas, de interés fitogeográfico porque los cambios que presentan responden a una circulación atmosférica proveniente del Atlántico y porque es una unidad de vegetación constituida por especies más vulnerables a las fluctuaciones de humedad (Carlquist 1988); b) bosque de fondo de valle y mosaico bosque-arbustal del este del valle, con sitios arqueológicos; c) pastizales de altura del noreste del valle; d) pastizales y mosaicos de arbustales del oeste del valle; gran parte de las terrazas de cultivo prehispánicas se encuentran en esta zona; y e) fondo de valle con numerosos sitios arqueológicos. Tanto la vegetación como la humedad de las laderas al oeste del valle presentan sensibles diferencias con las laderas y piedemontes del sector noreste (De la Orden y Quiroga 1997) por lo que resulta de interés verificar la dinámica del NDVI.

Podemos discutir los resultados según dos aspectos; por un lado, relacionar el modelado del proceso ecosistémico con las condiciones conocidas para el Valle de Ambato, y por otro, evaluar los resultados del paleo-NDVI en relación con los análisis paleoambientales llevados a cabo hasta la fecha ligados a problemáticas propias de la ocupación Aguada. Asimismo, podemos comparar nuestros datos con algunos registros globales conocidos. Es necesario destacar que lo presentado aquí es un modelo exploratorio basado en unidades de superficie de 8 km<sup>2</sup> tomadas del sensor AVHRR, que involucran sectores heterogéneos en cuanto al estado de la vegetación por lo que se trata de muestras con datos promediados de NDVI.

La variación entre los cinco píxeles analizados está ligada a diferencias en la vegetación, que se refleja en los resultados del modelo, con valores más bajos en sectores con menos biomasa vegetal y humedad, específicamente en áreas del oeste del valle. Las correlaciones entre datos reales y simulados de NDVI son altas, lo que permite una discusión sobre el paleo-NDVI y la comparación con resultados de otros estudios.

El análisis de la anatomía ecológica del leño de *Geoffroea decorticans*, recuperado en contextos datados hacia finales del primer milenio (Marconetto 2009), indica que las condiciones de humedad durante el crecimiento de los leños eran significativamente más bajas que las condiciones actuales en cualquiera de las unidades de vegetación del Valle de Ambato. El modelado presentado no muestra episodios de NDVI sensiblemente bajos

entre el 900 y el 1100 AD, como hubiéramos esperado, sino una etapa de anomalías medias negativas que afecta a todos los píxeles. Probablemente, los momentos que se observan desde inicios del 1000 AD reflejan condiciones de mayor aridez en tanto no se observan aumentos en los valores del NDVI y consecuentemente del vigor de la vegetación. De ser así, el hallazgo de rasgos anatómicos asociados a estrés hídrico en madera recuperada en contextos datados circa 1000 AD podría corresponderse con un escenario de mayor aridez. Se observa asimismo correspondencia entre estos momentos de valores negativos y el Cálido Medieval. Aparentemente la vegetación del Ambato fue sensible a los efectos de variaciones globales.

Las fluctuaciones marcadas hacia 1470 se intensifican hacia finales del 1500, continúan con distintos niveles de intensidad hasta mediados del 1800 y luego disminuyen a lo largo del siglo XX. Resulta plausible preguntarse si existe relación entre estas marcas y la Pequeña Edad del Hielo, periodo frío entre 1550 y 1850, marcado con intervalos particularmente agudos, destacándose el mínimo de Maunder 1645 - 1715. Es notoria la alteración que se observa en nuestro registro entre 1678 y 1688 (Figura 3.13), con una fuerte caída del NDVI de las Yungas (pixel 2) y variaciones y aumento de valores en los bosques, pastizales y arbustales (píxeles 4, 5, 6 y 7), similar al escenario detectado entre fines del 500 e inicios del 600. Estudios en el Hemisferio Sur sugieren que para la Pequeña Edad de Hielo se dio también un enfriamiento para esta región del mundo así como un incremento de la frecuencia e intensidad del fenómeno de El Niño (Crowley y North 1991; Maenza y Compagnucci 2010). Una investigación llevada a cabo por D'Antoni y Mlinarevic en 2002 (D'Antoni y Skiles 2004) presenta las fluctuaciones en la temperatura del mar de los océanos Atlántico y Pacífico asociadas a erupciones volcánicas registradas entre los años 1242 y 2000. Los resultados reflejan marcadas variaciones en las temperaturas del Pacífico coincidentes con los momentos en que registramos anomalías extremas. Estos eventos parecieran verse reflejados también en los resultados del modelo usado en este trabajo.

El estudio de "señales de fuego" a partir de conteos de microcarbones en muestras de sedimentos de 18 estaciones del Valle de Ambato sugiere que sucedieron incendios recurrentes a lo largo de al menos 4000 años (Lindsoug 2014; Lindsoug y Marconetto 2014). Esta información es consistente con las fluctuaciones que marca la dinámica del NDVI en los últimos 2000 años. Las condiciones tanto de baja humedad como de NDVI que suceden a momentos de mayor humedad y alto NDVI producen contextos aptos para la generación de fuegos, en tanto los valores altos indican que se está produciendo una alta biomasa que alimentará los fuegos en periodos secos. Podríamos proponer que las fluctuaciones más marcadas se corresponden con los incendios que han dejado traza en el registro de microcarbones. Contamos con dos fechados de sedimentos cuyo conteo de microcarbones resultó elevado (Lindsoug y Marconetto 2014). Ambos episodios podrían

corresponderse con el tipo de condiciones descritas –aumento y caída de la biomasa en lapsos cortos–. Uno de ellos, acorde con la datación, se ubica entre 1700 y 1750 AD, y el otro en el lapso transcurrido entre 870 y 1018 AD. Este último punto nos enfrenta a la diferencia en la resolución de las dataciones radiocarbónicas y el modelo HEMO, ofreciendo éste último una resolución anual, inviable de alcanzar a partir de métodos radiométricos. El caso del primer fechado no presenta problema en relación con la hipótesis propuesta, en tanto el segundo, sólo si el episodio de fuego datado ocurrió hacia fines del 800 AD y mediados del 900 AD sería consistente con la hipótesis, dado que luego cesan las anomalías positivas, ligadas al aumento de la biomasa vegetal.

Los estudios paleoambientales de maderas carbonizadas y de microcarbones de nuestra área de estudio, llaman a reflexionar acerca del rol de una hipotética situación ambiental desfavorable que pudiera vincularse al fin de la ocupación Aguada en Ambato. En arqueología suelen ser lineales las explicaciones que vinculan problemas ambientales y colapsos, en particular en el caso de sociedades complejas (ver Ikehara Tsukayama 2006; Lucero 2002; Williams 2002). Sin embargo, estas explicaciones deben ser tomadas con precaución. En Aguada de Ambato, hasta el momento no se cuenta con registros datados más allá de fines del primer milenio, cuando se observan anomalías negativas de baja intensidad durante un período prolongado. Habrá que discutir el papel de una posible sequía sostenida en el tiempo en relación con la desocupación del valle. Los incendios se registran a lo largo de la ocupación Aguada al igual que la variación en las anomalías positivas y negativas de diferente intensidad, habiendo sido éstos –fuegos y variaciones en la biomasa vegetal– elementos constitutivos del paisaje pasado.

Por último, una cuestión que abre nuevos interrogantes y será fuente para nuevas indagaciones es el episodio que se registra hacia finales del 500 AD con anomalías extremas positivas y negativas sostenidas a lo largo de al menos dos décadas. No podemos explicar por el momento a qué responde, en particular la significativa baja en las áreas correspondientes a las Yungas y el aumento en las unidades de vegetación de bosques, pastizales y arbustales. No obstante, no deja de ser llamativo el hecho de que los contextos datados con buen grado de confianza, realizados sobre colágeno (Marconetto et al. 2014) presentarían los momentos cercanos a este evento como el inicio de la ocupación Aguada en el valle.

## Conclusiones

A partir de la concreción de este análisis hemos realizado una reconstrucción paleoambiental del período 442 - 1998 AD que permite describir la dinámica de la vegetación del pasado en el Valle de Ambato y delinear el escenario ambiental en el que ocurrieron los cambios de los grupos agropastoriles que ocuparon el valle.

Si bien variaciones de variada intensidad se registran a lo largo de toda la secuencia, condiciones semejantes a las actuales se registran entre el 600 y el 700 AD. Se destaca un

período prolongado de anomalías medias negativas que acompaña el fin de la ocupación Aguada en el valle según los fechados disponibles hasta el momento, así como un lapso de anomalías extremas negativas y positivas que parece asociarse al momento cercano al inicio de esta ocupación.

El tipo de análisis realizado puso en evidencia fluctuaciones ambientales en la región sin necesidad de extrapolar datos de otras zonas, permitiendo la comparación con estudios previos.

Señalamos que el modelo resultó además sensible a fenómenos de escala global como la Pequeña Edad de Hielo y el Cálido Medieval.

Hemos presentado los resultados del modelado ecosistémico retrodictivo de la vegetación del Valle de Ambato. La utilización de datos de teledetección satelital permitirá expandir estos estudios a otras escalas espaciales.

Para futuros trabajos se prevé relacionar los datos del sensor MODIS con los del NDVI del detector AVHRR para contar con un lapso mayor de entrenamiento del modelo paleoambiental aquí propuesto.

### Agradecimientos

El presente trabajo fue realizado con subsidios de la SECYT-UNC y PIP CONICET.

### Bibliografía

Baied, C.

1999 Distribución actual de matorrales altoandinos de *Polylepis* en los Andes centro-sur: Oscilaciones climáticas y el impacto de la actividad humana en el pasado. En *Los tres reinos: prácticas de recolección en el cono sur de América*, editado por C. Aschero, M. A. Korstanje y P. Vuoto, pp. 129-139. Instituto de Arqueología y Museo, Universidad Nacional de Tucumán.

Bard, E., G. Raisbeck, F. Yiou y J. Jouzel

1997 Solar modulation of cosmogenic nuclide production over the last millennium: comparison between <sup>14</sup>C and <sup>10</sup>Be records. *Earth and Planetary Science Letters* 150:453-462.

2000 Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides. *TELLUS B* 52 (3):985-992.

2003 Reconstructed Solar Irradiance Data. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series #2003-006. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.

[[http://www ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/climate\\_forcing/solar\\_variability/bard\\_irradiance.txt](http://www ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/climate_forcing/solar_variability/bard_irradiance.txt)]. (fecha de acceso: 8 de agosto de 2015).

- 2007 Comment on "Solar activity during the last 1000 yr inferred from radionuclide records" by Muscheler et al. 2007. *Quaternary Science Reviews* 26:2301-2308.
- Britos, A. y S. Basconcelo  
2012 Informe Sequía 2011. Análisis de las Anomalías del Índice Verde (NDVI). Subsecretaría de Agricultura Familiar, Delegación Córdoba, Equipo del Norte. [<http://www.asadep.org.ar/documentos/Informesequia2011.pdf>]. (fecha de acceso: noviembre de 2012).
- Cardich, A.  
1980 El fenómeno de las fluctuaciones de los límites superiores del cultivo en los Andes: su importancia. *Relaciones de la Sociedad Argentina de Antropología* 14 (1):7-31.
- Carlquist, S.  
1988 *Comparative wood anatomy. Systematic, ecological and evolutionary aspects of dicotyledon wood*. Springer series in wood science. Springer Verlag. Berlin.
- Cole-Dai J., E. Mosley-Thompson, S.P. Wight y L. G. Thompson  
2000 A 4100-year record of explosive volcanism from an East Antarctica ice core. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere* 105 (14):24431-24441.
- Crowley, T. J. y G. R. North  
1991 *Paleoclimatology*. Oxford Monographs on Geology and Geophysics, New York, Oxford.
- D'Antoni, H.L.  
2006 *Hindcasting Ecosystems*. NASA Ames Research Center Project.  
2008a *Arqueoecología Sistémica y Caótica*. Colección Textos Universitarios CSIC, Madrid.  
2008b *Progress Report*. NASA Institute of Astrobiology.
- D'Antoni, H. y A. Mlinarevic  
2002 Rapid Rates of Change. *Astrobiology Science Conference*. Moffett Field, California.
- D'Antoni, H. L. y F. Schäbitz  
1995 *Remote Sensing and Holocene Vegetation: History of Global Change*. *World Resource Review* 7 (2):282-288.
- D'Antoni, H. L. y J. Skiles  
2004 Prediciendo ecosistemas del pasado en América del Sur. Presentation, Second Astrobiology Conference, NASA Ames Research Center, April 7-11, 2002, Moffett Field, CA. *International Journal of Astrobiology (Supplement 1):10*. Cambridge University Press.

D'Antoni, H. L. y M. A Spanner

1993 Remote sensing and modern pollen dispersal in Southern Patagonia and Tierra del Fuego (Argentina): Models for palaeoecology. *Grana* 32:29-39.

De La Orden, A. y A. Quiroga

1997 Fisiografía y vegetación de la Cuenca del Río Los Puestos, Departamento de Ambato, Catamarca. *Revista de Ciencia y Técnica* 4 (4):27-45.

Fabricante, I., M. Oesterheld y J. M. Paruelo

2009 Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across Northern Patagonia. *Journal of Arid Environments* 73:745-753.

Fernández, J., V. Markgraf, H. Panarello, M. Albero, F. Angiolini, S. Valencio y M. Arriaga

1991 Late Pleistocene/Early Holocene environments and climates, fauna, and human occupation in the Argentine Altiplano. *Geoarchaeology: An International Journal* 6 (3):251- 272.

Groesjean, M., L. Nuñez, I. Cartagena, y B. Messerli

1997 Mid-Holocene Climate and Culture Change in the Atacama Desert, Northern Chile. *Quaternary Research* 48:239-246.

Hall, M., E. Frank, G. Holmes, B. Pfahringer, P. Reutemann y I. H. Witten

2009 The WEKA Data Mining Software: An Update; *SIGKDD Explorations* 11(1):10-18.

Herrmann, S. M., A. Anyamba y C. J. Tucker

2005 Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change* 15:394-404.

Ikehara Tsukayama, H.

2006 Comparación de los procesos de colapso de las sociedades Mochica y Maya. *Arkeos* 1 (2):1-19.

Jiang, S., J. Cole-Dai, Y. Li, D. G. Ferris, H. Ma, C. An, G. Shi y B. Sun

2012 A detailed 2840-year record of explosive volcanism in a shallow ice core from Dome A, East Antarctica, *Journal of Glaciology* 58:65-75.

Lara, A., R. Villalba, J. Aravena, A. Wolodarsky y E. Neira

2000 Desarrollo de una red de cronologías de *Fitzroya cupressoides* para Chile y Argentina. En *Dendrocronología en América Latina*, compilado por F. Roig, pp. 217-244. EDIUNC, Mendoza.



Lindskoug, H. B.

2014 In pursuit of the fire. Contributions of microcharcoal analysis to the archaeology of the Ambato valley (Catamarca). En *Physical, chemical and biological markers in argentine archaeology: theory, methods and applications*, editado por D. M. Kligmann y M. R. Morales, pp. 117-130. BAR International Series, Archaeopress, Oxford.

Lindskoug, H. B. y M. B. Marconetto

2014 Paleoecología de Fuegos en el Valle de Ambato (Catamarca). *Intersecciones en Antropología* 15:23-37.

Lucero, L.

2002 The collapse of the classic Maya: A case for the role of water control. *American Anthropologist* 104:814-826.

Maenza, R. A. y R. H. Compagnucci

2010 Simulación de la Pequeña Edad de Hielo usando el modelo EdGCM. *GEOACTA* 35:2,78-91.

Marconetto, M. B.

2009 Rasgos Anatómicos Asociados a Stress Hídrico en Carbón Vegetal Arqueológico. Valle de Ambato (Catamarca) fines del 1er Milenio. *Darwiniana* 47 (2):247-259.

Marconetto, M. B., M. R. Gastaldi, H. B. Lindskoug y A. G. Laguens

2014 Merging the Matrix: Stratigraphy, Radiocarbon Dates, and Fire Regimens in the Ambato Valley (Catamarca, Argentina). *Radiocarbon* 56 (1):189-207.

Markgraf, V.

1985 Paleoenvironmental history of the last 10000 years in Northwestern Argentina. *Symposium: Sudamerica-Geomorphologie und Paleoökologie des jungeren Quartaers*, editado por K. Garleff y H. Stingl. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie* 1 (11-12):1739-1749. Mosley-Thompson, E., T. A. Mashiotta y L. G. Thompson.

2003 High resolution ice core records of Late Holocene volcanism: Current and future contributions from the Greenland PARCA cores, in *Volcanism and the Earth's Atmosphere. Geophysical Monograph Series* 139:153-164.

Nielsen, M. A.

2015 *Neural Networks and Deep Learning*, Determination Press.

[<http://www.neuralnetworksanddeeplearning.com/index.html>] (fecha de acceso: 7 de agosto de 2015).

Olivera, D., P. Tchilinguirian y L. Grana

2004 Paleoambiente y arqueología en la Puna Meridional argentina: archivos ambientales, escalas de análisis y registro arqueológico. *Relaciones de la Sociedad Argentina de Antropología* XXIX:229-248.

Thompson, L., M. Davis y E. Moseley-Thompson

1994 Glacial records of global climate: A 1500 year tropical ice core record of climate. *Human Ecology* 22 (1):83-95.

Trivi, M. E.

2003 Paleoecología del Noroeste de la Provincia de Santa Cruz. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

Tucker, C. J., J. E. Pinzon y M. E. Brown

2004 *Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS), AVHRR 8km Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Bimonthly 1981-1998*. Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park, Maryland.

Tucker, C.J., C. L. Vanpraet, M. J. Sharma y G. Van Ittersum

1985 Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel. 1980-1984. *Remote Sensing Environment* 17:233-249.

Valero Garcés, B., A. Delgado Huertas, N. Ratto, A. Navas y L. Edwards

2000 Paleohydrology of Andean Saline Lakes from Sedimentological and Isotopic Records, Northwestern Argentina. *Journal of Paleolimnology* 24 (3):343-359.

Vicent García, J. M., P. López García, M. I. Martínez Navarrete, J. A. López Sáez, I. de Zavala Morencos y S. Rovira Llorens

2004 *Teledetección, Arqueología e Historia de la Vegetación: el Proyecto Kargaly*. *International Journal of Astrobiology* (Special Supplement from the Astrobiology Science Conference NASA, Ames).

Villalba, R., J. A. Boninsegna y R. L. Holmes

1985 *Cedrela angustifolia* and *Junglans australis* two new tropical species useful in dendrochronology. *Tree-ring Bulletin* 45:25-35.

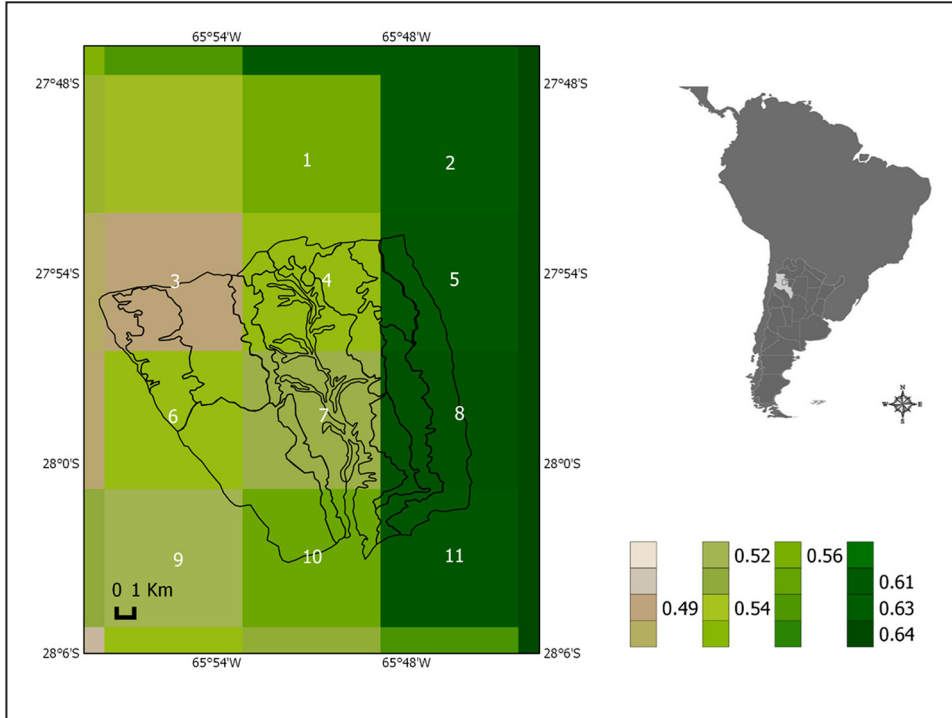
Villalba, R., R. L. Holmes y J. A. Boninsegna

1992 Spatial patterns of climate and tree growth variations in subtropical northwestern Argentina. *Journal of Biogeography* 19:631-649.

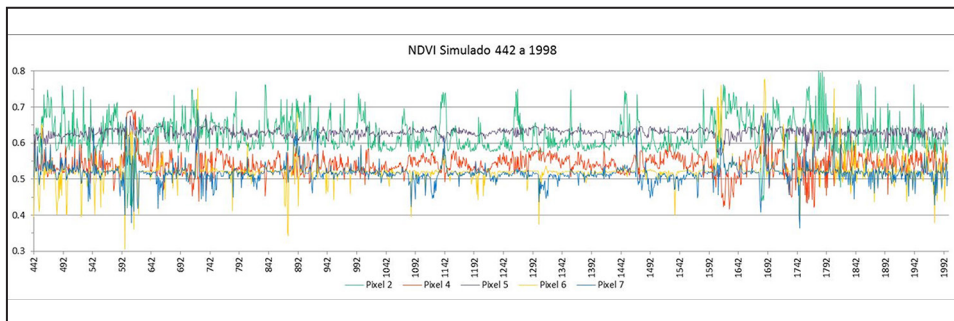
- Villalba, R., J. A. Boninsegna, A. Lara, T. Veblen, F. Roig, J. C. Aravena y A. Ripalta  
1996 Interdecadal climatic variations in millennial temperature reconstructions from Southern South America. En *Climatic variations and forcing mechanisms of the last 2000 years*, editado por P. D. Jones, R. Bradley y J. Jouzel, pp. 161-189. NATO ASI Series, Springer Berlin Heidelberg.
- Williams, P.  
2002 Rethinking disaster-induced collapse in the demis of the andean highlands states: Wari and Tiwanaku. *World Archaeology* 33:361-374.
- Xiao, J. F y A. Moody  
2005 A comparison of methods for estimating fractional green vegetation cover within a desert-to-upland transition zone in central New Mexico, USA. *Remote Sensing of Environment* 98: 237-250.
- Zhou, L., Y. Li, J. Cole-Dai, D. Tan, B. Sun, J. Ren, L. Wei y H. Wang  
2006 A 780 year record of explosive volcanic eruptions from the DT263 ice core from East Antarctica. *Chinese Science Bulletin* 51(18):2189-2197.
- Zielinski, G. A., P. A. Mayewski, L. D. Meeker, S. Whitlow, M. S. Twickler, M. Morrison, D. A. Meese, A. J. Gow y R. B. Alley  
1994 Record of volcanism since 7000 B.C. form the GISP2 Greenland ice core and implications for the volcano-climate system. *Science* 26:948-952.

## Anexo Figuras

**Figura 1.** Valores de NDVI promedio de los píxeles 1 a 11 - Valle de Ambato, Catamarca.



**Figura 2.** Dinámica de los paleo-NDVI de los píxeles 2, 4, 5, 6 y 7 en el período 442 – 1998.



**Figuras 3.1 a 3.16.** Anomalías en los valores de paleo-NDVI del período 442 - 1998. Recortes cada 100 años.

