

# CAMBIOS PALEOCLIMÁTICOS Y SU INFLUENCIA SOBRE EL DESARROLLO CULTURAL EN EL SUR DEL ÁREA CENTRAL ANDINA

*Bertil Mächtle\**  
*Karsten Schittek*  
*Markus Reindel*  
*Bernhard Eitel*

Recibido el 15 de septiembre de 2017; aceptado el 29 de mayo de 2018

## Resumen

Hasta hace poco se pensaba que la historia del medioambiente de los Andes Centrales era uniforme dentro de un espacio homogéneo. Nuevos resultados de las investigaciones sobre dinámicas culturales, muestran un patrón recurrente de épocas de florecimiento y declive, que coinciden con cambios regionales alternantes de las condiciones del medio ambiente en áreas contiguas. Registros paleoclimatológicos de los trópicos demuestran que estos cambios fueron influenciados por la variabilidad del fenómeno ENSO. Condiciones de tipo El Niño y el monzón sudamericano del verano austral (South American Summer Monsoon, SASM) intensificado causaron el transporte de humedad a la región del lago Titicaca, mientras que las condiciones de tipo La Niña y un SASM débil eran los prerequisites para sequías alrededor del lago Titicaca y favorecieron a cambio precipitaciones en la región de Palpa y Laramate, más al norte, las cuales a su vez sirvieron para nutrir los oasis fluviales de esa zona. Este dinamismo mutuo ocurrió varias veces desde el Holoceno medio, lo cual hace suponer un

\* Geographisches Institut der Universität Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 348, D-69120 Heidelberg, Alemania, e-mail: Bertil.Maechtle@geog.uni-heidelberg.de

mecanismo subyacente de impactos regionales de un sistema superpuesto de ENSO.

Palabras clave: *ENSO, Nasca, Tiwanaku, SASM, Holoceno.*

## Abstract

### *Paleoclimatic changes and their influence on cultural development in the southern Central Anden Area*

Until recently, the environmental history of the entire Central Andes was thought to be uniform. New insights about cultural dynamics show a recurrent pattern of boom and decline, coincident to regional changes in environmental favorability, which was out-of-phase. Remote palaeoclimatic proxy data from the tropics show that these changes were triggered by ENSO variability. El Niño-like conditions and an enhanced South American Summer Monsoon (SASM) led to moisture transport to the Titicaca region, whereas La Niña-like conditions and a weak SASM were the prerequisites for drought around lake Titicaca and enhanced rainfall in the Palpa-Laramate region further north, supporting its lowland oases. This seesaw occurred several times since the Mid-Holocene, pointing to a general underlying mechanism of regional impacts of the superimposed ENSO system.

Key words: *ENSO, Nasca, Tiwanaku, SASM, Holocene.*

## Résumé

### *Les changements paléoclimatiques et leur influence sur le développement culturel dans la région des Andes Centrales méridionales*

Pendant longtemps, on a supposé que l'histoire de l'environnement dans les Andes centrales présentait une image uniforme à grande échelle. Comme l'ont montré des études récentes et l'alternance de cultures prospères dans deux régions voisines, les conditions naturelles et donc les moyens de subsistance de la population agricole ont changé à plusieurs reprises. Des conditions naturelles favorables ont permis un développement stable et expansif des cultures dans la région concernée. Les causes de l'alternance sont à rechercher dans la dynamique de l'oscillation méridionale, qui a favorisé la région de Titicaca dans une dominance de conditions de type El Niño sur une mousson d'été sud-américaine intensifiée, tandis que dans les phases dominées par La Niña, la région Palpa-Laramate avec ses oasis de plaine est devenue une zone agricole et culturelle favorisée. Ce schéma climatique est déjà évident durant la période précéramique de l'Holocène moyen et suggère donc une relation fondamentale entre l'intensité

de la mousson d'été sud-américaine et le système ENSO, qui présente des effets contradictoires au niveau régional.

Mots-clés: *ENSO, Nasca, Tiwanaku, SASM, Holocène.*

## Resumo

### *Mudanças paleoclimáticas e sua influência no desenvolvimento cultural na região Centro-Andina do sul*

Durante muito tempo, assumiu-se que a história ambiental nos Andes centrais mostrava uma imagem uniforme em grande escala. Como revelam estudos recentes e a aparência alternada de culturas prósperas em duas regiões vizinhas, as condições naturais e, portanto, o sustento do homem econômico mudaram várias vezes. Condições espaciais naturais favoráveis permitiram um desenvolvimento estável e expansivo das culturas no respectivo espaço. As razões para a alternância encontram-se na dinâmica da oscilação do sul, que favoreceu a região do Titicaca em uma predominância de condições semelhantes ao El Niño através de uma forte monção de verão na América do Sul, enquanto nas fases dominadas por La Niña, a região de Palpa-Laramate, com seus oásis de várzea, tornou-se uma área agrícola e cultural de preferência. Este padrão climático também aparece durante o período pré-cerâmico no Holoceno Médio e, portanto, sugere uma relação fundamental entre a intensidade das monções de verão da América do Sul e o sistema ENSO, que mostra efeitos regionalmente contraditórios.

Palavras-chave: *ENSO, Nasca, Tiwanaku, SASM, Holoceno.*

## Introducción

Durante las últimas décadas, muchos estudios revelaron las dependencias de prosperidad cultural y el potencial de los recursos agronómicos de las áreas que ocuparon las sociedades humanas. No obstante, se produjeron también cambios culturales sin que se hayan podido identificar eventos correspondientes en el medio ambiente. Por lo tanto, algunos investigadores apoyan una visión geodeterminista, mientras que otros la rechazan categóricamente (e.g. Hard, 2011). Como ambos representantes tienen buenos argumentos y evidencias para su posición respectiva, hay que tomar en cuenta los factores medioambientales individuales que puedan influenciar la actitud humana para decidir si factores naturales han sido motivos para cambios en prácticas culturales en determinados lugares.

No cabe duda que la falta de recursos alimenticios debe haber influenciado la acción, el éxito y la continuidad de sociedades humanas. Fundamentalmente, a pesar de la habilidad del hombre para crear innovaciones que aumentan el potencial de rendimiento, las restricciones individuales del medio ambiente en un lugar determinado son:

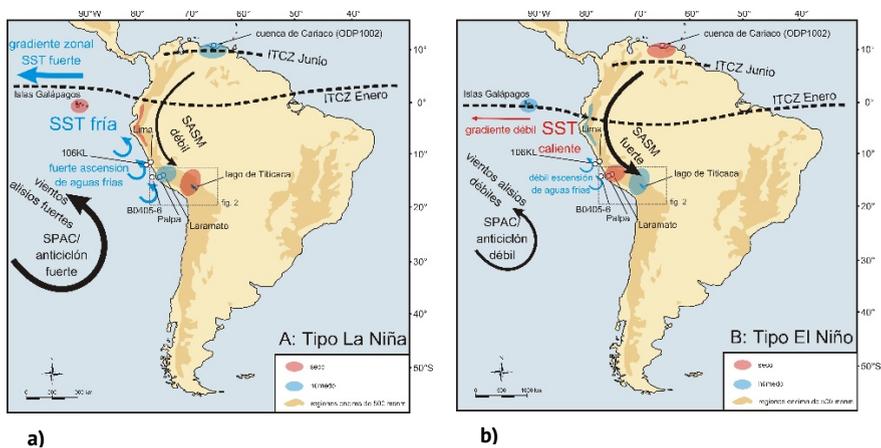
- I. la disponibilidad de agua para la agricultura (de riego), para el mantenimiento de terreno de pasto, para la irrigación y para el consumo humano;
- II. la estacionalidad de las lluvias;
- III. las limitaciones de cosecha y rendimiento por temperatura (debido a la estacionalidad o la altura);
- IV. la topografía y
- V. la variabilidad interdecenal del clima.

Está claro que un cierto decrecimiento de las lluvias afectará más drásticamente a regiones áridas que a ambientes húmedos, debido a un porcentaje más alto de pérdida de recursos. Bajo condiciones medioambientales regulares con suficientes precipitaciones y temperaturas moderadas, la producción agraria por lo tanto está lejos de sufrir severos fracasos. En regiones con estas características, la variación anual es moderada, los extremos climáticos que pueden afectar dramáticamente los rendimientos son raros y temporalmente limitados, de manera que el rango usual de variación no tiene un impacto importante. Por lo tanto, sociedades adaptadas a una ecología específica raramente son vulnerables por el clima debido a una alta resiliencia del ecosistema.

Por el contrario, la resiliencia de áreas con las limitaciones de ambientes áridos, y especialmente aquellos con las características de límites de desiertos, es baja. Aridez o condiciones frías prolongadas limitan el rendimiento y la diversidad de la producción agraria. La disponibilidad de recursos se reduce y la capacidad amortiguadora para absorber extremos climáticos es débil. Adicionalmente, condiciones desérticas están caracterizadas por una variabilidad más alta y una mayor magnitud de eventos extremos y de catástrofes. En suma, por esas razones, su vulnerabilidad es mayor. Algunos pocos años secos en una década resultan en hambrunas, el almacenamiento de víveres en los años subsiguientes requiere de varios años de productividad, los cuales en muchos casos no ocurren. El riesgo de sobrevivencia cerca del límite de la capacidad medioambiental es alto. No obstante, también en tierras áridas los sistemas productivos y las poblaciones humanas están en equilibrio y proveen a las sociedades que viven en esas zonas de medios de subsistencia.

Sin embargo, la producción de alimentos puede colapsar (o tener éxito) si las condiciones climáticas medias cambian. En el caso de empeoramiento, el número de años secos aumenta o se producen series de años secos. Entonces, el límite interno de resiliencia es superado y se pierde la base económica. La desintegración de las sociedades, prácticas adaptadas del uso de las tierras o la migración hacia zonas con más recursos son posibles respuestas a cambios climáticos.

El presente artículo describe la dominancia alternante de sociedades prehispánicas bajo condiciones cambiantes de los recursos naturales en la parte árida de los Andes Centrales, en el sur del Perú y norte de Bolivia. La región semihúmeda hasta semiárida del lago Titicaca (TTC) será comparada con la región semiárida hasta árida de la vertiente occidental de los Andes y la franja costera entre Palpa y Laramate (PLA), con respecto a sus potenciales medioambientales, sus cambios climáticos y sus dinámicas culturales (Figura 1). Finalmente, enfocaremos las interdependencias superpuestas que influenciaron las sociedades humanas muy distantes del Área Central Andina, a raíz de la modificación del régimen de los vientos alisios en regiones distantes.

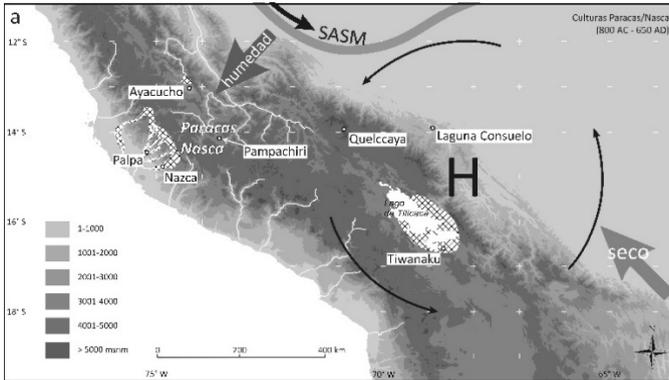


**Figura 1.** Áreas de estudio alrededor del lago Titicaca (TTC) y en la región de Palpa-Laramate (PLR). Adicionalmente está indicada la ubicación de archivos paleoclimáticos distantes. El encuadre indica la ubicación de la Figura 2. La Figura 1a muestra el patrón de circulación para condiciones de tipo La Niña, que dominaron el Holoceno medio y la MCA; la Figura 1b para condiciones de tipo El Niño que dominaron el LIA.

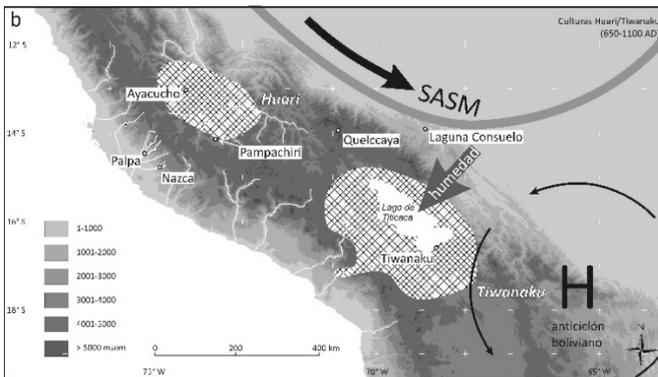
## Factores climáticos del área de estudio

El área de estudio se ubica en el sur del Perú. La cuenca sur del lago de Titicaca se extiende en altitudes por encima de los 3 800 msnm. La media anual de precipitaciones rodea alrededor de los 650 mm. Las condiciones son semihúmedas, presentando lluvias estacionales durante el verano austral. La humedad tiene su origen en la cuenca del Amazonas. La Alta de Bolivia, célula de alta presión atmosférica, es responsable del transporte de dicha humedad por medio de vientos que soplan en dirección este-oeste (Figura 2a). Actualmente, durante los eventos llamados El Niño, los vientos del este se debilitan y la precipitación disminuye ~20% (Tapley/Waylen, 1990). Extensos sistemas de andenerías alimentadas por lluvias y campos elevados alimentados por lluvias han sido construidos desde tiempos prehispánicos, los pastizales de los Andes fueron utilizados para el pastoreo.

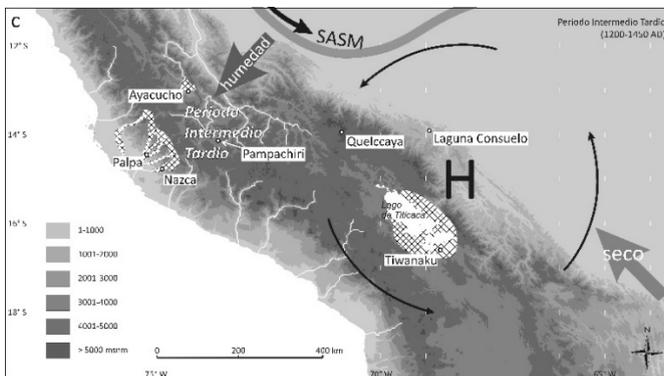
Las condiciones climáticas de la región PLA muestran una variabilidad más pronunciada. Debido a la ubicación más distante con referencia a la cuenca del Amazonas, las partes altas de la vertiente occidental de los Andes reciben menor precipitación. Las condiciones son semiáridas. Más hacia el oeste las vertientes de los Andes y la planicie costera forman parte del desierto de la costa sur del Perú, con precipitaciones medias anuales de aproximadamente 10 a 20 mm en la actualidad. En la costa las temperaturas son altas, algunos ríos atraviesan el desierto. El exceso de agua en los Andes durante la época de lluvias hace posible que se forman oasis fluviales en las partes bajas de los ríos, en el desierto, donde se ha practicado la agricultura con sistemas de irrigación desde tiempos prehispánicos. No hay precipitación que tenga su origen al oeste, sobre el Océano Pacífico. Debido a la dominancia permanente del Anticiclón sobre el Pacífico sur, vientos constantes soplan en forma paralela a la costa, causando el fenómeno de afloramiento de aguas frías. En parte estas masas frías de aire se movilizan hacia el este, debido a la irregularidad del terreno y el calentamiento de la superficie de la tierra, lo cual conduce a la divergencia y subsiguiente subsidencia de las masas de aire, y con ello a la estabilización de las mismas. Las bajas temperaturas de la superficie del mar y la subsidencia impiden los procesos de convección y las precipitaciones sobre el Pacífico. La precipitación producida por neblinas está limitada a una faja angosta de la costa. Como ambas regiones dependen de la humedad proveniente del Amazonas, deberíamos esperar reacciones similares a sus variaciones.



**Figura 2a.** Patrones prehispánicos de áreas de asentamiento. El anticiclón boliviano transporta masas de aire húmedo sobre los Andes, dependiendo de la intensidad del SASM y su ubicación latitudinal. Por lo tanto, las condiciones ecológicas favorables alternaban entre el lago Titicaca (TTC) y la región de Palpa-Laramate (PLR).



**Figura 2b.**



**Figura 2c.**

## Potencial ecológico de las áreas de estudio

Ambas regiones están limitadas por sus condiciones medioambientales: en las zonas alto-andinas de las regiones TTC y PLA, el potencial de rendimiento está controlado por la temperatura y las lluvias. No obstante el impacto de la variabilidad anual no es fundamental, a pesar de ser ya bastante marcado hacia el oeste. Por otro lado, los oasis fluviales de la cálida región de Palpa están limitados solamente por las variaciones de las precipitaciones en las áreas de captación de los ríos, lo cual puede tener consecuencias dramáticas: para el valle de Moquegua (17° S), cuyas áreas de captación se encuentran en alturas entre 3 900 y 4 900 msnm, Satterlee *et al.* (2000) reportan precipitaciones medias anuales de 360 mm. Debido a la evaporación y el almacenamiento en los suelos, quedan solamente 100 mm para la alimentación de los ríos. Una disminución moderada de las precipitaciones en aproximadamente 14% resulta en una reducción de las aguas de río de aproximadamente 50 mm, lo cual corresponde a un 50%. Los oasis fluviales, por lo tanto, son altamente sensitivos con respecto a fluctuaciones de las precipitaciones, mientras que en la sierra no se producen impactos dramáticos.

Por consiguiente, tenemos que constatar la vulnerabilidad más alta, causada por la resiliencia más baja, en los oasis fluviales, menos vulnerabilidad en la sierra semiárida adyacente, y la vulnerabilidad menos intensa en la región TTC. El potencial de rendimiento más grande, sin embargo, se encuentra en los cálidos oasis fluviales, el más pequeño en las tierras frías y semiáridas de la sierra y de forma moderada en la región TTC, la cual está caracterizada por un clima más húmedo. Las ventajas de ambas regiones para la agricultura dependen de la variabilidad de parámetros climáticos, los cuales cambiaron en varios momentos durante el Holoceno. El riesgo más grande y el mayor potencial de rendimiento coinciden en los oasis fluviales de la costa.

## Oscilaciones paleoclimáticas y ocupación humana desde el Holoceno medio

Antes del inicio de las investigaciones paleoclimáticas en la región PLA, se consideraba que el Holoceno medio estaba caracterizado por condiciones áridas en todos los Andes hasta una latitud de 25 °S (Binford *et al.*, 1997; Nuñez *et al.*, 2002; Paduano *et al.*, 2003). Los datos que apoyaban esta hipótesis provenían de la región TTC (Rowe/Dunbar 2004). A través de las intensas investigaciones geoarqueológicas de los últimos años, sin embargo, tenemos ahora conocimientos más detallados de los mecanismos e interdependencias climáticas, que se detallarán a continuación.

### *La región del lago Titicaca*

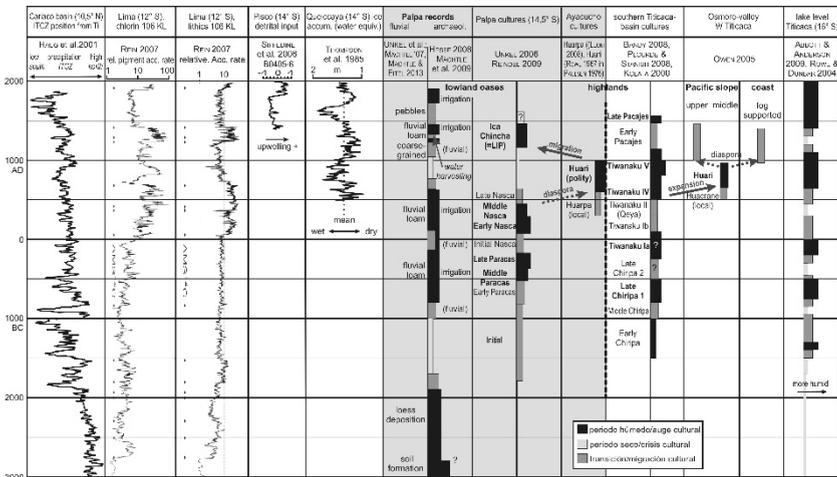
Para determinar las condiciones paleoclimáticas alrededor del lago Titicaca, se analizaron sedimentos mediante indicadores múltiples (multi-proxy) para obtener información sobre los niveles del lago y sobre la vegetación circundante. Desde los estudios de Rowe/Dunbar (2004) se sabe que durante el Holoceno medio el nivel del lago cayó, lo cual indica una sequía máxima del Holoceno desde ~6-5 ka BP dentro de un periodo seco generalizado entre 7.9–3.1 ka BP, derivado del análisis de pólenes (Paduano *et al.*, 2003). Después, se produjeron periodos alternantes de humedad y sequía (Figura 3). Niveles altos del lago están reportados por Abbott/Anderson (2009) desde ~1400-1300 BC, 750-500 BC, 200-0 BC, 650-1100 AD y 400-2000 AD, interrumpidos por varios momentos respectivos de niveles bajos del lago (las fechas se citan aquí en años calibrados AC/AD para los periodos prehispánicos). Para el último milenio, variaciones análogas de precipitación se encontraron en el glaciar de Quelccaya (Thompson *et al.*, 1985) más al norte (Figura 2a).

El registro arqueológico remonta hasta 1500 AC (Bandy 2008, Plourde/Stanish 2008, Kolata, 2000). Desde el inicio de la fase Chiripa Temprano, la región TTC estaba ocupada de forma permanente. Las fases Chiripa 1, (probablemente) Tiwanaku Ia, y Tiwanaku IV y V, así como las fases Pacaje tardío estaban caracterizadas por irrigación intensificada, lo cual se interpreta como un indicador de auge cultural (Figura 3). Por otro lado, las fases Chiripa medio, probablemente Chiripa tardío 2, Tiwanaku Ib y 3, así como Pacajes temprano muestran una actividad reducida de irrigación y un cambio hacia el uso de la tierra como pastizales para el ganado. Llama la atención que las fases de auge se produjeron durante periodos más húmedos, mientras que las fases de marginalización ocurrieron durante periodos de sequía. Durante las fases más húmedas, Tiwanaku IV y V, los asentamientos expandieron hacia los valles secos de la vertiente occidental de los Andes (Owen, 2005). Se observa una coincidencia clara entre el potencial ecológico y la reacción humana.

### *La región Palpa-Laramate*

El mecanismo de los vientos alisios que transportan las masas de aire húmedo sobre los Andes hacia ambas regiones, era responsable por los cambios en el régimen de las precipitaciones tanto en la región TTC como en la región PLA. Dadas estas condiciones, sorprende el hecho de que la historia climática de la región PLA es completamente opuesta a la de la región TTC. En la región PLA, el Holoceno medio era el periodo más húmedo, no el más árido. Esto está indicado por la deposición de loess entre 11 500-4 100 años atrás (Eitel *et al.*, 2005; Kadereit en Mächtle, 2007), un proceso que requiere necesariamente condiciones

más húmedas para generar un paisaje con gramíneas para que se puedan acumular sedimentos eólicos. La cantidad de lluvia rondaba alrededor de 250 mm p.a., lo cual es diez veces más que en la actualidad. Probablemente el periodo húmedo culminaba entre 7 000 y 5 000 años atrás con la formación de un paleosuelo dentro de la secuencia de loess, lo cual indica condiciones estables con procesos de erosión y una densa cubierta de vegetación, coincidente con un periodo de máxima sequía en la región TTC (Mächtle/Eitel, 2013). Debido a la baja resolución temporal de los indicadores analizados, las oscilaciones durante este periodo requieren de investigaciones adicionales de indicadores provenientes de archivos de bofedales.



**Figura 3.** Indicadores paleoclimáticos y culturas precolombinas en el sur del Perú. Niveles del lago Titicaca y periodos de auge de las culturas precolombinas (negro) y periodos de decrecimiento (gris claro) están representados al lado derecho. Es obvio que los periodos de auge y decrecimiento alternaban entre las regiones PLR y TTC, igual que las formaciones de paleosuelo y los niveles del lago en el Holoceno medio. Periodos frágiles y de transición (gris oscuro) están conectados con actividad geomorfológica. Acumulación intensa en el glaciar Quelccaya (Thompson *et al.* 1985) coincide con mayor actividad fluvial alrededor de Palpa y niveles del lago Titicaca más altos. Los datos del núcleo 106 KL de la costa de Lima están reproducidos de Rein (2007). El aumento de clorina fue interpretado como un aumento de productividad marina como consecuencia de una mayor ascensión de aguas frías (cf. Datos de Sifeddine *et al.*, 2008). Para informaciones detalladas sobre dinámicas culturales véase Bandy (2008), Leoni (2008), Paulsen (1976) y Unkel (2006).

De forma análoga a la región TTC, las siguientes fluctuaciones climáticas afectaron también a la región PLA. Entre los años 800 AC y 650 AD, sedimentos arcillosos fueron depositados a lo largo de los oasis fluviales de Palpa (Unkel *et al.*, 2007; Mächtle, 2007) y luego nuevamente entre 1200 y 1400 AD, así como después de 1750 AD, lo cual indica dinámicas fluviales moderadas sin inundaciones de alta energía. Estas dinámicas están relacionadas con condiciones más estables con poca erosión, bajo condiciones más húmedas. Estos periodos fueron interrumpidos por eventos de sedimentación de materiales gruesos con la deposición de guijarros, lo cual indica eventos fluviales con alta energía, i. e. eventos que ocurrieron esporádicamente, pero con mayor energía. Esta situación es típica para condiciones más áridas. Algunos eventos de máxima sequía ocurrieron entre 1400 y 1000 AC y entre 750 y 1050 AD cuando los cursos de agua no llegaron a los oasis fluviales de la costa, por lo cual no se observan sedimentos correspondientes en la parte baja de las cuencas de los ríos.

Nuevas investigaciones en un bofedal cercano a la localidad de Laramate (Schitteck, 2012, 2015) revelaron un registro de alta resolución de antiguas comunidades de vegetales en la sierra semiárida. Durante los periodos de flujo moderado de los ríos, una vegetación de gramíneas ocupaba la periferia del bofedal. Durante los periodos de una dinámica fluvial acentuada, sin embargo, dominaban especies arbustivas mejor adaptadas a condiciones secas. Adicionalmente se ha demostrado que estas fluctuaciones climáticas se produjeron a corto plazo y no de forma gradual, lo cual muestra que la región PLA también estaba expuesta a mayores cambios de circulación de la atmósfera, que suelen ser responsables para este tipo de fenómenos en todo el mundo (Mayewski *et al.*, 2004).

Igual que en la región TTC, los auges culturales se produjeron en fases de condiciones más húmedas. Las culturas Paracas y Nasca, y más tarde las poblaciones del periodo Intermedio tardío, ocupaban toda la extensión de los oasis fluviales (Reindel, 2009; Figura 3) durante los periodos de mayor precipitación en la sierra y de abundancia de agua en las partes bajas de los valles. La agricultura de irrigación expandía y el rendimiento aumentaba. En este contexto, los sedimentos de grano fino pueden ser alternativamente interpretados como depósitos fluviales de origen antropogénico (Hesse, 2008). En todo caso, estos sedimentos indican claramente condiciones más húmedas.

Periodos de reducida actividad humana durante los Horizontes medio y tardío (periodos Wari e Inka) coinciden a lo largo de los oasis fluviales tanto con sequías como con una dominancia de la actividad humana en la sierra, la cual es menos vulnerable por los deterioros climáticos. Pero la variación de lluvias y sequías afectaba también los refugios más al este: de la localidad alto-andina de Pampachiri (Figura 2) se conoce una fase húmeda con la expansión de pastizales

documentada en los sedimentos del humedal y que duraba desde 400 AC hasta 70 AD (Branch *et al.*, 2007). La sequía durante el periodo Wari a lo largo de los oasis fluviales coincide con mayor erosión y la expansión de vegetación xerofítica en la sierra, por lo cual se la relaciona con las actividades humanas durante la expansión Wari. La población se adaptó a los recursos de la sierra y aumentaba el potencial de subsistencia con extensas andenerías. Entre 1150 y 1390 AD, se produjo una nueva expansión de los pastizales húmedos, interrumpida por una sequía de corta duración alrededor de 1275 AD (1220-1330; Branch *et al.*, 2007). Esta sequía está documentada también en los bofedales y los sedimentos fluviales (Figura 3) y puede coincidir con medidas muy innovadoras de almacenamiento de agua practicadas por la población del periodo Intermedio Tardío (Mächtle *et al.*, 2009). En suma, las dinámicas de precipitación coinciden con la idea de cambios dinámicos en el transporte de aires húmedos que cruzan los Andes hacia el oeste.

### *La importancia para la climatología de los Andes Centrales*

Los datos paleoclimáticos y los registros arqueológicos muestran claramente que existía una coincidencia entre el potencial ecológico y la actividad cultural en ambas regiones, y que las poblaciones se adaptaron a los cambios de la disponibilidad de los recursos. Pero es realmente sorprendente que las condiciones favorables y desfavorables se presentaron de forma opuesta y alternante en las dos regiones.

Además, hay que preguntar por qué una de las regiones recibía más o menos precipitaciones alternadamente con respecto a la otra región. Fluctuaciones en el transporte de masas de aire húmedo desde la época del Holoceno medio tienen que ser descartadas como explicación, ya que el comportamiento opuesto y la alternancia de las condiciones climáticas a la misma latitud geográfica son obvias.

En cambio, las dinámicas del monzón del verano del hemisferio sur (*South American Summer Monsoon*, SASM) parecen ser un agente probable. Vuille *et al.* (2012) han revisado diferentes datos paleoclimáticos del continente con respecto a las dinámicas SASM, así como otros mecanismos relacionados: Ellos indican que el alcance del SASM y la cantidad de humedad que es transportada hacia el área de origen de las lluvias de los Andes Centrales depende de la posición de la zona de convergencia intertropical (*Inter-Tropical Convergence Zone*, ITCZ), la cual a su vez depende de las temperaturas de la superficie del mar (*Sea Surface Temperatures*, SST) en el Atlántico del Norte y en el este del Pacífico tropical (Bird *et al.*, 2011). El calentamiento del Pacífico tropical está conectado con eventos de El Niño (y precipitaciones en las vertientes occidentales de los Andes en el norte del Perú y de Ecuador), lo cual causa un desplazamiento de la zona de

convergencia intertropical (ITCZ) durante el verano austral, debido a un aumento en el calentamiento y en la convección atmosférica.

Bajo estas condiciones, la ITCZ puede cruzar la línea ecuatorial. Este patrón es contemporáneo con temperaturas más bajas de la superficie del mar (SST) en el Atlántico norte y se ha producido repetidamente en los últimos 2 000 años. El desplazamiento hacia el sur está acompañado por un fortalecimiento de la SASM y un movimiento elevado de masas húmedas al este de los Andes en las regiones más al sur (Figura 1b). Un periodo caracterizado por este tipo de condiciones fue la llamada “pequeña época glacial” (*Little Ice Age*, LIA), en particular desde 1650 hasta 1800 AD. Durante la anomalía medieval del clima (*Medieval Climate Anomaly*, MCA) y la actual época de temperaturas elevadas, el monzón del verano austral (SASM) fue debilitado debido a patrones contrarios, los cuales son característicos para condiciones del tipo La Niña.

Desafortunadamente los registros paleoclimáticos de Vuille *et al.* (2012) cubren solamente los últimos dos milenios. Si se comparan estas evidencias con el patrón alternante en el sur del Perú y con otros registros paleoclimáticos más lejanos, se constata que estos mecanismos eran activos por lo menos desde el Holoceno medio. Nosotros proponemos la hipótesis que durante los periodos Intermedio tardío (i.e. al final de la anomalía medieval del clima, MCA, con débil SASM) y Horizonte tardío (i.e. aproximadamente la pequeña época glacial, LIA, con fuerte SASM) los cambios de la intensidad del SASM en general son contemporáneos con el patrón alternante de precipitaciones en el sur del Perú (Figura 3) e influenciaban la disponibilidad de humedad en las regiones respectivas. El mecanismo consiste en que bajo un SASM débil, el alcance de este termina más al norte, por lo cual la región PLA es provisionada por masas húmedas del este, pero la región TTC sufre escasez de humedad. Esto coincidiría con un periodo Intermedio Tardío más húmedo en la región PLA y la sequía en la región TTC (Figura 2a, c). Bajo un SASM fuerte, el alcance de la humedad termina más al sur, por lo cual la corriente del este causada por la Alta de Bolivia, transporta masas húmedas abundantes hacia la región TTC, mientras que las regiones al este de la región PLA reciben menos humedad. Esto concuerda con las condiciones más húmedas en la región TTC durante el Horizonte Tardío y las condiciones más secas en la región PLA (Figura 2b).

Registros más distantes de la ITCZ deberían replicar estas dinámicas interrelacionadas del SASM: como muestran Haug *et al.* (2001), la ITCZ fue, de hecho, desplazada hacia el sur durante la pequeña época glacial (LIA) y hacia el norte durante la anomalía medieval del clima. Además la SST de la región ecuatorial este, debería aumentar durante un fuerte SASM, el cual está indicado por un gradiente zonal menos pronunciado en el Pacífico tropical (Conroy *et al.*, 2010) y cae durante un SASM débil, lo cual aumenta el gradiente de la SST.

Un gradiente débil de la SST en el Pacífico ecuatorial y un desplazamiento de la ITCZ hacia el sur son características de condiciones de tipo El Niño. Estos se combinan con un debilitamiento del anticiclón del Pacífico sur (*South Pacific Anticyclone*, SPAC) y una ascensión reducida de aguas frente a las costas del Perú. Esto está registrado por la producción de clorina y la sedimentación mineral frente a las costas de Lima (Rein, 2007), la cual se reduce durante la LIA y fue intensificada durante la MCA (véase Figura 3). El registro marino frente a la costa de Pisco (14° S, Sifeddine *et al.*, 2008) confirma las condiciones de la ascensión reducida de aguas frías durante la LIA.

En suma, existen evidencias abundantes de que el SASM, la ITCZ, la SST del Pacífico ecuatorial, y la intensidad de la SPAC muestran características muy coherentes, no solamente para el último milenio, sino por lo menos desde el Holoceno Medio. Para ese periodo se observa una baja frecuencia de fenómenos de El Niño (e.g. Koutavas *et al.*, 2006), mientras que la ITCZ fue desplazada hacia el norte (Haug *et al.*, 2001), el gradiente de la SST ecuatorial era fuerte (Koutavas *et al.*, 2006) y la región TTC estaba seca (Rowe/Dunbar, 2004). El periodo seco en esa región está confirmado además por la reducción de la superficie de la Laguna Consuelo y cambios de las comunidades de plantas entre 7400-5000 cal años AP (Figura 2; Urrego *et al.*, 2010). Esto demuestra que durante esa época, condiciones de tipo La Niña y muy probablemente un débil SASM dominaban los patrones de circulación en Sudamérica, lo cual explica la presencia de residuos de antiguos pastizales en el actual desierto alrededor de Palpa, y además el alto potencial ecológico para actividades humanas durante los subsiguientes periodos más húmedos en esa región. Para periodos con dominancia de condiciones del tipo de El Niño se encuentran evidencias para un patrón de circulación opuesto, que llevó a una mayor precipitación en la región TTC, la correspondiente reacción ecológica (Paduano *et al.*, 2003) y condiciones favorables para la agricultura intensiva.

Queda la pregunta, por qué las dos regiones reaccionaron de forma opuesta en el pasado, mientras que en la actualidad los fenómenos de El Niño y La Niña tienen un efecto uniforme sobre anomalías de precipitación. A pesar del debilitamiento de la corriente este-oeste durante situaciones del tipo El Niño, la región TTC recibía en el pasado más humedad, mientras que durante un periodo de una corriente más intensa, menos humedad fue transportada hacia la región TTC. Una explicación puede ser que debido a cambios en los parámetros orbitales durante el Holoceno aumentaba constantemente la insolación del verano austral. Esto habría resultado en un fortalecimiento general del SASM (Vuille *et al.*, 2012) y un transporte de humedad más al sur, por lo cual en la actualidad durante el fenómeno de El Niño la región TTC cae fuera de la latitud geográfica caracterizada por la mayor cantidad de humedad del SASM, mientras que durante

tiempos de La Niña la mayor corriente este-oeste provee ambas regiones con más humedad. Durante los últimos milenios, los parámetros orbitales de la tierra permitieron una oscilación del SASM entre las regiones TTC y PLA con el patrón alternante descrito, mientras que la sequía prolongada del Holoceno Medio en la región TTC puede ser explicada por la dominancia de condiciones de tipo La Niña y un SASM débil, el cual no fue suficientemente fuerte para alcanzar la latitud de la región TTC. En cambio, el transporte de humedad se produjo hacia la región PLA, lo cual resultó en el crecimiento de pastizales hasta en las zonas a los pies de los Andes.

## Conclusiones

Nuestras investigaciones en el sur del Perú revelaron oscilaciones repetidas y sistemáticas que en todos los casos coincidieron con cambios culturales. Por lo tanto es muy probable que el clima era un factor importante que inducía cambios en estas sociedades que encontraron su expresión en modificaciones estilísticas de artefactos o cambios en los sistemas agrícolas. Estas coincidencias, sin embargo, no ofrecen evidencias definitivas para hablar de geodeterminismo. Por otro lado hay que constatar que con toda probabilidad las sociedades humanas no pudieron escapar de los potenciales agronómicos en estos medioambientes vulnerables. Bajo estas condiciones, la actividad humana muestra el comportamiento “reactivo” en el sentido de van der Leeuw/Redman (2002), ya que el desarrollo cultural está condicionado por potenciales y restricciones ecológicos.

Como cambios (rápidos) del medio ambiente son el resultado regional específico de cambios a gran escala de la circulación atmosférica, la investigación de las teleconexiones proporcionará nuevos resultados relacionados a crisis coincidentes de sociedades de toda la Tierra. A través de la mejor comprensión de estos eventos, territorialmente y políticamente independientes, obtendremos evidencias más claras sobre cambios culturales causados principalmente por procesos geodeterminados.

Agradecimientos al licenciado Fernando Leceta Gobitz por la revisión final del manuscrito.

## Bibliografía

- Abbott, Mark B. and Anderson, Lesleigh, “Lake level fluctuations”, en Gornitz, Vivien (ed.), *Encyclopedia of paleoclimatology and ancient environments*, Heidelberg, 2009, pp. 489-492.

- Bandy, Matthew S., "Early village society in the Formative Period in the southern lake Titicaca basin", en Isbell, William H. and Silverman, Helaine (eds.), *Andean archaeology III - north and South*, Heidelberg, 2008, pp. 210-236.
- Binford, Michael W.; Kolata, Alan L.; Brenner, Mark; Janusek, John W.; Seddon, Matthew T.; Abbott, Mark B. and Curtis, Jason H., *Climate variation and the rise and fall of an Andean civilization*, Quaternary Research, vol. 47, no. 2, 1997, pp. 235-248.
- Bird, Broxton W.; Abbott, Mark B.; Vuille, Mathias; Rodbell, Donald T.; Stansell, Nathan D. and Rosenmeier, Michael F., "A 2,300-year-long annually resolved record of the South American summer monsoon from the Peruvian Andes", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 108 no. 21, 2011, pp. 8583-8588.
- Branch, Nicholas P.; Kemp, Rob A.; Silva, Barbara; Meddens, Frank M. ; Williams, Alan; Kendall, Ann and Vivanco Pomacanchari, Cirilio, "Testing the sustainability and sensitivity to climatic change of terrace agricultural systems in the Peruvian Andes: a pilot study", *Journal of Archaeological Science*, vol. 34, no. 1, 2007, pp. 1-9.
- Conroy, Jessica L.; Overpeck, Jonathan T.; Cole, Julia E., "El Niño/Southern Oscillation and changes in the zonal gradient of tropical Pacific sea surface temperature over the last 1.2 ka", *Pages News*, vol. 18, no. 1, 2010, pp. 32-34.
- Eitel, Bernhard; Hecht, Stefan; Mächtle, Bertil; Schukraft, Gerd; Wagner, Günther; Kromer, Bernd; Unkel, Ingmar and Reindel, Markus, "Geoarchaeological evidence from desert loess in the Nazca-Palpa region, southern Peru: palaeoenvironmental changes and their impact on pre-Columbian cultures", *Archaeometry*, vol. 47, no. 1, 2005, pp. 137-158.
- Hard, Gerhard, "Geography as ecology", en Schwarz, Astrid and Jax, Kurt (eds.), *Ecology revisited*, Heidelberg, 2011, pp. 351-368.
- Haug, Gerald H.; Hughen, Konrad A.; Sigman, Daniel M. ; Peterson, Larry C. and Röhl, Ursula, "Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene", *Science*, vol. 293, no. 5533, 2001, pp. 1304-1308.
- Hesse, Ralf, "Fluvial dynamics and cultural landscape evolution in the Rio Grande de Nazca drainage basin, southern Peru", *BAR International Series*, no. 1787, Oxford, 2008.
- Kolata, Alan L., "Environmental thresholds and the 'natural history' of an Andean civilization", en Bawden, Garth and Reycraft, Rick M. (eds.), *Environmental disaster and the archaeology of human response*, Albuquerque, 2000, 163-178.
- Koutavas, Athanasios; de Menocal, Peter B.; Olive, George C. and Lynch-Stieglitz, Jean, "Mid-Holocene El Niño-Southern Oscillation (ENSO) attenuation revealed by individual foraminifera in eastern tropical Pacific sediments", *Geology*, vol. 34. no. 12, 2006, pp. 993-996.
- Leoni, Juan B., "Ritual and society in early intermediate period Ayacucho: a view from the site of Ñawinpukyo", en Isbell, William H. and Silverman, Helaine (eds.), *Andean archaeology, III - north and south*, New York, 2008, pp. 279-306.
- Mächtle, Bertil, "Geomorphologisch-bodenkundliche Untersuchungen zur Rekonstruktion der holozänen Umweltgeschichte in der nördlichen Atacama im Raum Palpa/Südperu", *Heidelberger Geographische Arbeiten* 123, Heidelberg, 2007.
- Mächtle, Bertil; Eitel, Bernhard; Schukraft, Gerd and Ross, Katharina, "Built on sand-climatic oscillation and water harvesting during the Late Intermediate Period", en

- Reindel, Markus and Wagner, Günther (eds.), *New technologies for archaeology: Multidisciplinary investigations in Palpa and Nasca, Peru*, Heidelberg, 2009, pp. 39-46.
- Mächtle, Bertil and Eitel, Bernhard, "Fragile landscapes, fragile civilizations-How climate determined societies in the pre-Columbian south Peruvian Andes", *Catena*, no. 103, 2013, pp. 62-73. DOI:10.1016/j.catena.2012.01.012.
- Mayewski, Paul A.; Rohling, Eelco E.; Stager, J. Curt; Karlén, Wibjörn; Maasch, Kirk A.; Meeker, L. David; Meyerson, Eric A.; Gasse, Françoise; van Kreveld, Shirley; Holmgren, Karin; Lee-Thorp, Julia; Rosqvist, Gunhild; Rack, Frank; Staubwasser, Michael; Schneider, Ralph R.; Steig, Eric J., "Holocene climate variability", *Quaternary Research*, vol. 62, no. 3, 2004, pp. 243-255.
- Nuñez, Lautaro; Grosjean, Martin and Cartajena, Isabel, "Human occupation and climate change in the Puna de Atacama", Chile, *Science*, vol. 298, no. 5594, 2002, pp. 821-824.
- Owen, Bruce D., "Distant colonies and explosive collapse: the two stages of the Tiwanaku diaspora in the Osmore drainage", *Latin American Antiquity*, vol. 16, núm. 1, 2005, pp. 45-80.
- Paduano, Gina M.; Bush, Mark B.; Baker, Paul A.; Fritz, Sherilyn C.; Seltzer, Geoffrey O., "A vegetation and fire history of Lake Titicaca since the Last Glacial Maximum", *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 194, nos. 1-3, 2003, pp. 259-279.
- Paulsen, Allison C., "Environment and empire: climatic factors in prehistoric Andean culture change", *World Archaeology*, vol. 8, no. 2, 1976, pp. 121-132.
- Plourde, Aimée M. and Stanish, Charles, "The emergence of complex society in the Titicaca basin: the view from the north", en Isbell, William H. and Silverman, Helaine (eds.), *Andean archaeology III - north and South*, New York, 2008, pp. 237-257.
- Rein, Bert, "How do the 1982/83 and 1997/98 El Niños rank in a geological record from Peru?", *Quaternary International*, vol. 161, no. 1, 2007, pp. 56-66.
- Reindel, Markus, "Life at the edge of the desert – archaeological reconstruction of the settlement history in the valleys of Palpa, Peru", en Wagner, Günther and Reindel, Markus (eds.), *New technologies for archaeology: Multidisciplinary investigations in Palpa and Nasca, Peru*, Heidelberg, 2009, pp. 439-461.
- Rowe, Harold D. and Dunbar, Robert D., "Hydrologic-energy balance constraints on the Holocene lake-level history of lake Titicaca, South America", *Climate Dynamics*, vol. 23, nos. 3-4, 2004, pp. 439-454.
- Satterlee, Dennis R.; Moseley, Michael E.; Keefer, David K.; Tapia, Jorge, "The Miraflores El Niño disaster: convergent catastrophes and prehistoric agrarian change in Southern Peru", *Andean Past*, no. 6, 2000, pp. 95-116.
- Schitteck, Karsten, "Cushion peatlands in the high Andes of northwestern Argentina as archives for palaeoenvironmental research", Unpublished PhD thesis, University of Trier, 2012, 188 pp.
- Schitteck, Karsten; Forbriger, Markus; Mächtle, Bertil; Schäbitz, Frank; Wennrich, Volker; Reindel, Markus and Eitel, Bernhard, "Holocene environmental changes in the highlands of the southern Peruvian Andes (14° S) and their impact on pre-

- Columbian cultures”, *Clim Past*, no. 11, 2015, pp. 44, 2015. DOI:10.5194/cp-11-27-2015.
- Sifeddine, Abdelfettah; Gutiérrez, Dimitri; Ortlieb, Luc; Boucher, Hughes; Velazco, Federico; Field, David B. ; Vargas, Gabriel; Boussafir, Mohammed; Salvattecchi, Renato; Ferreira, Vinícius; García, Marcelo; Valdés, Jorge; Caquineau, Sandrine; Mandeng Yogo, Magloire; Cetin, Funda; Solis, Javier; Soler, Pierre and Baumgartner, Timothy, “Laminated sediments from the central Peruvian continental slope: a 500 year record of upwelling system productivity, terrestrial runoff and redox conditions”, *Progress in Oceanography*, vol. 79, nos. 2-4, 2008, pp. 190-197.
- Tapley, Thomas D. and Waylen, Peter R., “Spatial variability of annual precipitation and ENSO events in western Peru”, *Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 35, no. 4, 1990, pp. 429-446.
- Thompson, Lonnie G.; Mosley-Thompson, Ellen; Bolzan, John F. ; Koci, Bruce R., “A 1500-year record of tropical precipitation in ice cores from Quelccaya Ice Cap, Peru”, *Science*, vol. 229, no. 4717, 1985, pp. 971-973.
- Unkel, Ingmar, “AMS-14C-Analysen zur Rekonstruktion der Landschafts- und Kulturgeschichte in der Region Palpa (S-Peru)”, *Heidelberger Geographische Arbeiten*, no. 21, Heidelberg, 2006.
- Unkel, Ingmar; Kadereit, Annette; Mächtle, Bertil; Eitel, Bernhard; Kromer, Bernd; Wagner, Günther and Wacker, Lukas, “Dating methods and geomorphic evidence of palaeoenvironmental changes at the eastern margin of the south Peruvian coastal desert (14° 30' S) before and during the Little Ice Age”, *Quaternary International*, vol. 175, no. 1, 2007, pp. 3-28.
- Urrego, Dunia H.; Bush, Mark B. and Silman, Miles R., “A long history of cloud and forest migration from Lake Consuelo, Peru”, *Quaternary Research*, vol. 73, no. 2, 2010, pp. 364-373.
- Van der Leeuw, Sander and Redman, Charles L., “Placing archaeology at the center of socio-natural studies”, *American Antiquity*, vol. 67, no. 4, 2002, pp. 597-605.
- Vuille, Mathias; Burns, Stephen J.; Taylor, Brandon L.; Cruz, Francisco William; Bird, Broxton W.; Abbott, Mark B.; Kanner, Lisa C.; Cheng, Hai and Novello, Valdir F., “A review of the South American Monsoon history as recorded in stable isotopic proxies over the past two millennia”, *Climate of the Past Discussions*, vol. 8, no. 1, 2012, pp. 637-668.