

Reconstrucción de datos de precipitación pluvial en series de tiempo mediante transformadas de wavelet con dos niveles de descomposición

Christian Yarlequé, Centro Internacional de la Papa (CIP)
Adolfo Posadas, Centro Internacional de la Papa (CIP)
Facultad de Ciencias Físicas, DAFI, UNMSM
Roberto Quiroz, Centro Internacional de la Papa (CIP)

2007-2 Documento de Trabajo



**Reconstrucción de datos de
precipitación pluvial en series de tiempo
mediante transformadas de wavelet con
dos niveles de descomposición**



Christian Yarlequé, Centro Internacional de la Papa (CIP)
Adolfo Posadas, Centro Internacional de la Papa (CIP)
Facultad de Ciencias Físicas, DAFI, UNMSM
Roberto Quiroz, Centro Internacional de la Papa (CIP)

Reconstrucción de datos de precipitación pluvial en series de tiempo
mediante transformadas de wavelet con dos niveles de descomposición

© Centro Internacional de la Papa (CIP), 2007

ISBN 978-92-9060-315-3

Las publicaciones del CIP contribuyen con información importante sobre el desarrollo para el dominio público. Los lectores están autorizados a citar o reproducir este material en sus propias publicaciones. Se solicita respetar los derechos de autor del CIP y enviar una copia de la publicación en la cual se realizó la cita o se publicó el material, al Departamento de Comunicación y Difusión, a la dirección que se indica abajo.

Centro Internacional de la Papa
Apartado 1558, Lima 12 – Perú
cip@cgjar.org • www.cipotato.org

Producido por el Departamento de Comunicación y Difusión del CIP

Coordinadora de Producción
Cecilia Lafosse

Diseño y diagramación
Elena Taipe con la contribución de Artes Gráficas

Impreso en el Perú por Comercial Gráfica Sucre
Tiraje: 100 ejemplares
Agosto 2007

Tabla de Contenido

| | |
|--|----|
| Resumen | iv |
| Abstract | v |
| Agradecimiento | vi |
| Reconstrucción de datos de precipitación pluvial en series de tiempo mediante transformadas de wavelet con dos niveles de descomposición | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| MÉTODOS | 2 |
| Datos procesados | 2 |
| Métodos matemáticos utilizados | 2 |
| RESULTADOS | 6 |
| DISCUSIÓN | 13 |
| CONCLUSIONES | 14 |
| REFERENCIAS | 15 |

Resumen

La cuantificación de la precipitación pluvial, a escalas espaciales y temporales, es un tema de gran importancia para la agricultura. Esta cuantificación se dificulta en regiones en las que las estaciones meteorológicas están muy espaciadas entre sí. El presente trabajo trata de la estimación retrospectiva de la precipitación acaecida, a partir de valores del índice de vegetación conocido en inglés como Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), considerando que ambas señales son periódicas y proporcionales. Se presenta un modelo de reconstrucción de precipitación, basado en la técnica de la Transformada Wavelet (Wavelet Transform) la cual procesa los datos de NDVI y el ruido característico de la señal de precipitación para obtener una reconstrucción a la misma resolución temporal (diaria) de los datos de lluvia, mediante un procesamiento en dos niveles de descomposición. Como paso previo a la reconstrucción, se aplica la técnica de la Transformada de Fourier para obtener la concordancia en la periodicidad (relativa) de los datos de precipitación y NDVI. Los valores de precipitación provienen de 10 estaciones climatológicas ubicadas en el Altiplano Peruano, en el Departamento de Puno y las de NDVI del satélite SPOT-VEGETATION. Ambas señales cubren un periodo de 5 años de toma de datos, en distintas escalas de tiempo, diaria para la precipitación y decadal para NDVI. La validación se realizó mediante el cálculo del coeficiente de determinación lineal (R^2), obteniéndose $R^2 > 0.70$ entre los valores medidos y reconstruidos de estimados de precipitación de lluvias, en días, superando los resultados obtenidos en reconstrucciones de precipitaciones anuales y mensuales, descritas en publicaciones referenciales.

Palabras Clave: Precipitación; Índice de Vegetación; Transformadas; Wavelets; Fourier; Descomposición.

Abstract

Quantifying rainfall at spatial and temporal scales is a challenge posed to scientists in different disciplines given its importance in agriculture, natural resource management and climate change. This paper describes a new approach to assess rainfall combining measured data with the normalized difference vegetation index (NDVI) based on the fact that both events are periodic and proportional. The procedure developed to reconstruct the rainfall signal combining the Fourier Transform and the Wavelet Transform is described. Second level decompositions of both signals were used for the reconstruction process. The low frequency signal from the NDVI data was used as the base signal for the reconstruction to which the high frequency signal (noise) extracted from the rainfall data was added. The reconstructed daily rainfall was compared to the measured one obtaining determination coefficients $R^2 > 0.70$. This finding is quite an improvement over the reconstructions reported in the literature where this level of precisions is only found for comparisons at the seasonal levels.

Keywords: Rainfall, NDVI, Transforms, Wavelets, Fourier, and Decomposition.

Agradecimiento

Los autores agradecen a los miembros del equipo de investigación de la División de Manejo de Recursos Naturales por su colaboración técnica. El Proyecto ALTAGRO contribuyó al financiamiento del trabajo.

Reconstrucción de datos de precipitación pluvial en series de tiempo mediante transformadas de wavelet con dos niveles de descomposición

INTRODUCCIÓN

La cuantificación de la precipitación pluvial es de suma importancia para estimar la disponibilidad de agua para uso doméstico, agricultura, generación de energía y otros. La precipitación pluvial es medida por las estaciones meteorológicas. Sin embargo, por su costo, estas estaciones no pueden instalarse en el número mínimo necesario para cubrir adecuadamente la variación espacial en una región o país. A partir de que el crecimiento de las plantas en condiciones de secano responde directamente a la cantidad y distribución de la lluvia, ese proceso de crecimiento puede ser usado para cuantificar la precipitación (Nicholson et al., 1990; Santos and Negri, 1997). La biomasa vegetal de campos de cultivo, bosques o pastizales puede ser estimada mediante métodos de Percepción Remota (Richards, 1995). Estos datos pueden ser interpretados geoespacialmente ya que las imágenes, tomadas por sensores remotos, pueden tener una composición matricial, lo que posibilita analizar los campos de biomasa (imágenes o señales en 2D) mediante el uso de herramientas físico-matemáticas.

El índice de vegetación de la diferencia normalizada, conocido en inglés como *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), que se calcula a partir de la reflectancia de la radiación visible e infrarroja cercana, es utilizado para evaluar la variación en la condición de la biomasa vegetal, producida por el crecimiento y senescencia de la vegetación.

La literatura muestra que existe una proporción directa entre los espectros de NDVI y la precipitación pluvial en zonas geográficas que no excedan los 100 mm mensuales. Por lo tanto, la propuesta de una reconstrucción de eventos de lluvia a partir de los datos de NDVI, es fundamentada. Sin embargo, existen importantes consideraciones en el tratamiento de dichas señales. La primera se refiere a la presencia de un desfase temporal entre los espectros de NDVI y los datos de precipitación, debido a que la diversidad, densidad y condiciones de la vegetación en una zona geográfica están determinadas por la precipitación, pero con un cierto retardo pues la respuesta vegetal no es inmediata. La segunda es que ambas señales son incompatibles, en principio, en su valor numérico-dimensional. Tercero, el ruido o la tan alta variabilidad de los valores del espectro de lluvia, produce un alto índice de error en el tratamiento de los datos (reconstrucción, simulación, etc.). Finalmente, el procesamiento a diferentes escalas de los datos

de precipitación y NDVI, conduce a un error de escala. La presente publicación describe la cuantificación de la proporcionalidad y periodicidad de la precipitación a partir de datos de NDVI procesados mediante herramientas matemáticas, en este caso las Transformadas, y aborda dos partes fundamentales del procesamiento: *el tratamiento de los datos muestreados y la reconstrucción de datos de precipitación pluvial*.

MÉTODOS

Datos procesados

Los datos procesados son de dos clases: precipitación pluvial y NDVI. Los datos diarios de precipitación fueron proporcionados por 10 estaciones climatológicas del SENAMHI en Puno, cuyas ubicaciones se muestran en la Tabla 1. Los datos procesados corresponden al periodo comprendido entre el 01/01/99 y el 31/12/02. Igualmente se trabajó con una base de datos de 197 imágenes (Bandas) compuestas de valores máximos de reflectancia decadal, de NDVI, con una resolución de 1km², provenientes de los satélites SPOT (4 y 5) – sensor “vegetation” (VGT1 y VGT2) y correspondientes al periodo comprendido entre el 01/01/99 y el 21/09/03, que excedió al periodo de los datos de precipitación. Estas imágenes se corrigieron geoméricamente y se extrajo la información contenida en las coordenadas puntuales de cada una de las 10 estaciones climatológicas comprendidas.

Se obtuvieron los valores de NDVI y se crearon archivos lineales seleccionando los píxeles correspondientes a las estaciones climatológicas de la Tabla 1. Cada valor de NDVI de estos archivos representa un periodo de 9, 10 u 11 días, por lo que se procedió a atribuir estos valores decadales a días sucesivos en el calendario, construyéndose de este modo los valores diarios de NDVI. Los datos fueron procesados mediante programas desarrollados en los ambientes MatLab-Windows e IDL – Cross Platform.

Métodos matemáticos utilizados

Las plantas en diferentes estados de crecimiento y desarrollo y de sanidad vegetal, difieren en la absorción y reflectancia de radiación solar. La vegetación saludable y en periodo de crecimiento absorbe más luz en el rango de longitud de onda correspondiente a la luz roja del espectro electromagnético, que es utilizada en la fotosíntesis, y refleja más radiación infrarroja (IR). Al contrario, la vegetación que sufre de algún tipo de estrés (hídrico, nutricional o patogénico), la vegetación senescente y el suelo reflejan la luz roja y la radiación IR en similares magnitudes. De este modo, las magnitudes relativas de luz roja y de radiación IR absorbidas o reflejadas por la vegetación constituyen un indicador de su vigor. El NDVI es una proporción de valores de las bandas rojo visible e IR:

$$NDVI = \frac{(IR - R)}{(IR + R)} \quad (1)$$

El cálculo de NDVI siempre resulta en un número dentro del rango de -1 a +1. Hojas cloróticas o amarillentas dan valores cercanos a cero (0). El cero indica que no existe actividad fotosintética y valores cercanos a +1 (0.8~0.9) indican la más alta densidad posible de hojas verdes. Las imágenes de un campo dado, producidas por la radiación IR y roja son procesadas según (1), para obtener una imagen con valores de NDVI que muestran la existencia de biomasa y su condición.

La Transformada de Fourier (TF), es la herramienta que permite el análisis de una cierta señal con un comportamiento periódico (frecuencias, periodos, amplitud, etc.) y acotada. Es decir; nos brinda información adicional de la señal respecto a la frecuencia (f) de repeticiones de eventos que la describen. Aplicada a un conjunto de datos (t) de precipitación, la TF nos muestra directamente su frecuencia característica para poder predecir comportamientos (periódicos) posteriores. Además, brinda una buena técnica de filtrado (Russ, 1999), eliminando frecuencias no deseadas (altas frecuencias o ruido de la señal, interferencias, etc.), alisando así la señal. La TF está dada por la ecuación (Foufoula-Georgiou and Kumar, 1994; González and Woods, 1992):

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i2\pi ft} dt, \quad (2)$$

donde F(f) es la TF de la señal f(t) y t el tiempo. Y en su forma discreta, en la que n=0,1, 2,...,(N-1)(en nuestro marco de trabajo, t = número de toma o día de toma, N • número total de datos tomados), obtenemos la serie (compleja):

$$F(n) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} f(t) e^{-2i\pi nt / N} = a_n + ib_n, \quad (3)$$

donde a_n y b_n son los coeficientes de Fourier de la señal y n la frecuencia. La Forma Fase-Ángulo de la serie de Fourier (González y Woods, 1992; Immerzeel et al., 2005; Stearn, 2003) de la señal, es utilizada en el siguiente proceso de reconstrucción de señales:

$$\begin{aligned}
 f(t) &\approx \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(2\pi nt / N + \delta_n), \\
 C_n &= \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \\
 \delta_n &= \text{Tan}^{-1}\left(-\frac{b_n}{a_n}\right).
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

La Transformada Wavelet (TW), es un operador que reescala una se1al de mayor a menor escala (las escalas son proporcionales a las frecuencias) o viceversa, haciendo variar su resoluci3n espacial (compresi3n o elongaci3n de la se1al) sobre translaciones temporales (toma de datos, tiempo, etc.) sobre el entero de la se1al (Foufoula-Georgiou and Kumar, 1994; Stearn, 2003). Al igual que la TF, la TW puede realizar un proceso de filtrado al reproducir la se1al a diferentes escalas con la ayuda de funciones bases denominadas Wavelet o Wavelet Madre (conocidas en su traducci3n al espa1ol como Onditas o Ond3culas Madre) (Polikar, 1996; Foufoula-Georgiou and Kumar, 1994; Vetterli and Herley, 1992; Graps, 1995; Garay De Pablo, 1998). Estas pueden ser

comparadas con las funciones bases (Kernel) de la TF: $e^{-i2\pi ft}$. Este Wavelet convoluciona con la se1al, produciendo una nueva se1al reescalada (con mayor o menor detalle), siendo este procedimiento diferente a otros, por la caracterizaci3n espec3fica que se da a la se1al, en cada proceso de escalamiento, seg3n el Wavelet escogido. El Wavelet que se utiliza es una funci3n de baja o alta frecuencia, que tiende a cero fuera de un dominio finito (cuantificado), mientras que en la TF hay variaciones de senos y cosenos estacionarios (infinitos); esta propiedad nos permite localizar el an3lisis en el dominio temporal, por intermedio de cambios del par3metro de translaci3n, u . Otra propiedad fundamental es que los Wavelets son obtenidos mediante cambios en el par3metro de dilataci3n, λ , lo que produce una amplia variedad de tipos de Wavelet. Mientras que las funciones bases de TF son obtenidas mediante la modulaci3n de una simple funci3n: seno o coseno, la TW esta dada como:

$$\begin{aligned}
 Wf(\lambda, u) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{\lambda, u}(t)dt \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \psi\left(\frac{t-u}{\lambda}\right)du,
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

donde $\psi_{\lambda,t}(u)$ es el *Wavelet*; es el valor de la variable *escala* (proporcionalmente relacionado con la frecuencia), asociado a la variable de *translación*, u (tiempo), equivalentes a filtros de distintas clases.

Así mismo, se tiene la *Transformada Inversa de Wavelet (TIW)*, dada por:

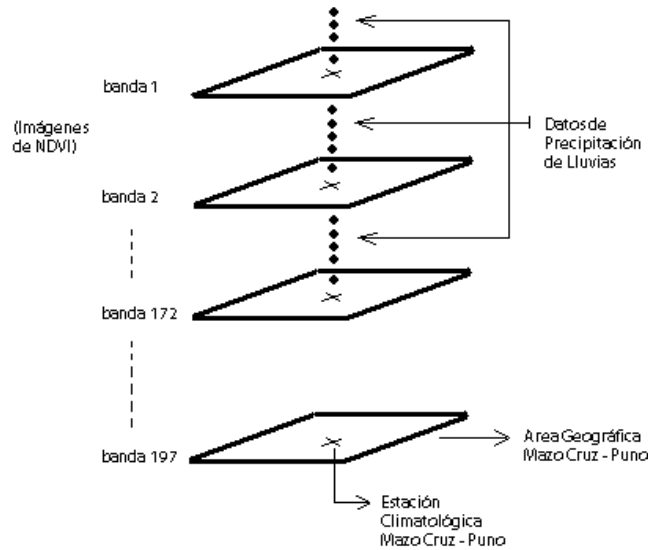
$$f(t) = \frac{1}{c_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \lambda^{-2} Wf(\lambda, u) \psi_{\lambda,u}(t) d\lambda du, \quad (6)$$

donde, $c_{\psi} = 2\pi \int_0^{\infty} \frac{|\hat{\psi}_{\lambda,t}|}{w} dw < \infty$.

Toda transformada produce un cambio de dominio (variables independientes) en la función analizada, permitiendo que se perciban las diversas características de esa función en otro dominio (por ejemplo, a una función que da valores de temperatura se puede aplicar la transformada de Fourier para obtener las frecuencias en las cuales ocurre la intensidad de cada temperatura), pero la función sigue siendo la misma. En el presente trabajo se utilizaron las Transformadas de Fourier (TF) y Wavelet (TW), para el procesamiento de datos decadales (muestreo cada 10 días) de NDVI, para obtener una reconstrucción de datos de precipitación. En este caso, la TW se aplicó a la señal de NDVI hasta el segundo nivel de descomposición. Posteriormente, se comparó el resultado obtenido con los datos reales de precipitación (Plant et al., 2001). Este procedimiento de reconstrucción de datos de precipitación fue realizado para 10 lugares, para su posterior validación con los datos tomados por las estaciones meteorológicas ubicadas en esas localidades.

Un primer paso en el análisis de los datos fue proceder a la superposición de los datos de precipitación y NDVI, en cada una de las áreas geográficas representadas por las diferentes estaciones meteorológicas que proporcionaron los datos sobre lluvias. Un ejemplo gráfico de esta superposición se muestra en la Figura 1.

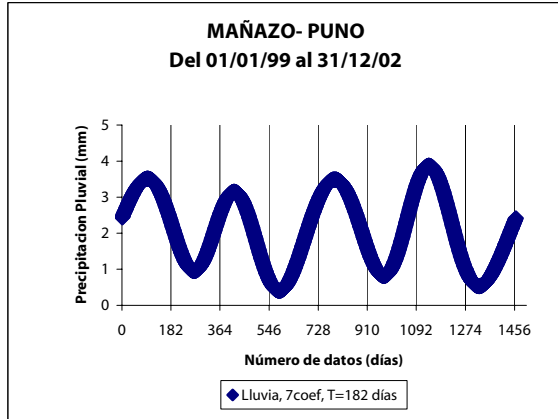
Figura 1.
Superposición en el dominio temporal de los datos de Precipitación y NDVI. Los datos de NDVI (área), superpuestos a los datos de precipitación, tomados en la estación Mazo Cruz - Puno.



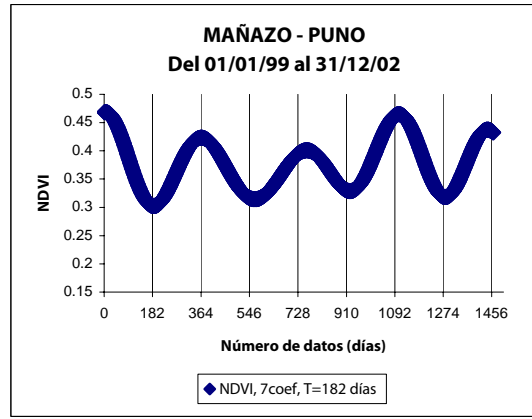
Luego, la aplicación de la Transformada de Fourier para el *análisis periódico* de las señales, permitió obtener el desfase temporal de los datos de NDVI respecto a los de precipitación.

RESULTADOS

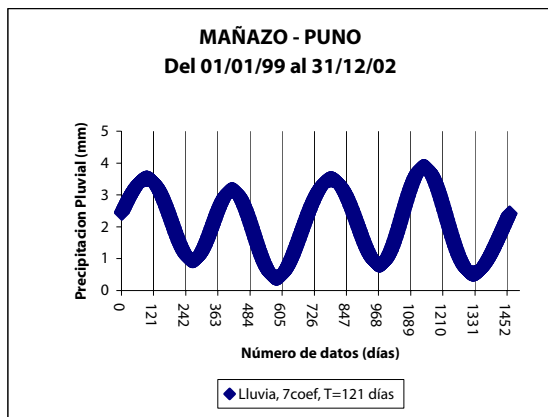
Los espectros reconstruidos con la serie de Fourier de (4), con las 6 primeras frecuencias más representativas de precipitación y NDVI (Immerzeel et al., 2005), muestran ese *desfase* de los datos analizados. El comportamiento periódico y proporcional de las señales reconstruidas de precipitación y NDVI se aprecia en la Figura 2, la que muestra un *desfase* entre ambas señales al compararse las crestas y valles de los espectros. Los detalles en los datos de precipitación son de alta frecuencia, datos diarios caóticos debido a la alta variación estocástica de las lluvias, mientras que la precipitación de baja frecuencia (reconstruida con la serie de Fourier) muestra la forma general de esta señal en distintas escalas (Immerzeel et al., 2005; Prutscher, 1998; González y Woods, 1992; Polikar, 1996). Así, con la técnica de Fourier fue posible obtener una reconstrucción (Immerzeel et al., 2005) de baja frecuencia de la señal de precipitación y NDVI, siendo ambas muy similares entre sí.



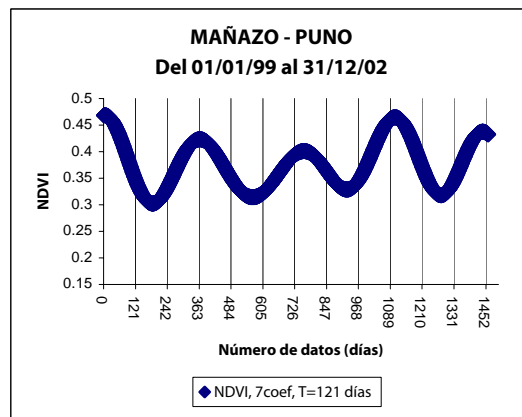
(a)



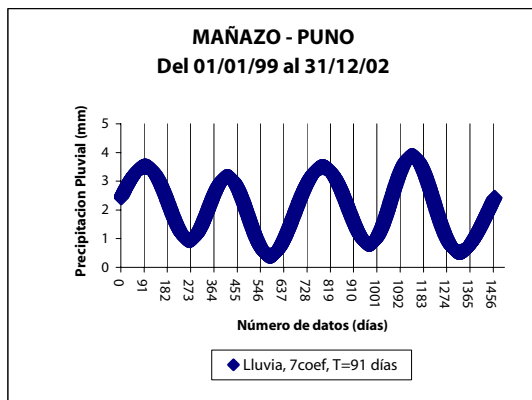
(b)



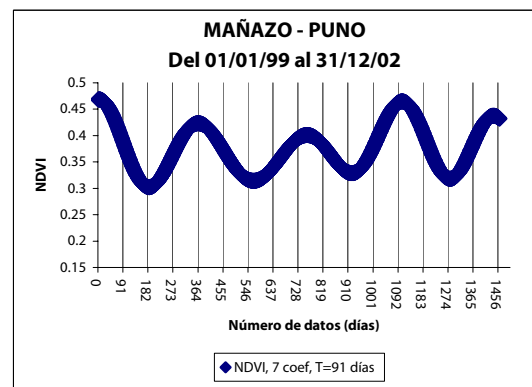
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 2. Las gráficas (a), (c), (e), muestran la precipitación pluvial a diferentes T:182, 121, 91 días periodos de análisis, y las (b), (d), (f) los de NDVI respectivos, dentro de periodo del 01/01/99 al 31/12/02 en la Estación Mañazo, ubicada en el Distrito de Mañazo, Provincia de Chucuito, Departamento de Puno.

El *desfase* se obtuvo mediante la comparación directa de un cierto intervalo de datos, de los espectros de NDVI y lluvia. Tomando el mínimo valor (valle de la onda) de cada señal en un *i-esimo intervalo*, se halló la distancia del sub-intervalo que conforman (ver Figura 2). A esta distancia se le llama *desfase* del *i-esimo intervalo*. Este mismo análisis se realizó en cada uno de los intervalos en que se divide la señal, obteniéndose un conjunto de valores de desfases. Finalmente, se promediaron los valores de dicho conjunto, para obtener el *desfase* [ONDAS]. Se observa en la Figura 2 (a-b), 2(c-d) y 2(e-f) que el análisis de los datos de una misma estación meteorológica, correspondientes a las señales de lluvia y NDVI, produce resultados distintos para los valores del *desfase* a diferentes intervalos de tiempos o *periodos* (T) de análisis (182 días, 121 días, 91 días), como se muestra en la Tabla 2. Así, es posible deducir el *desfase* existente entre las señales, en diferentes T. En resumen, sobreponiendo las señales de NDVI, se midió la distancia entre valle a valle (o cresta a cresta), en cada periodo T días y se calculó el promedio simple de dichas distancias para obtener una representativa, la cual tomamos como el *desfase* en esta aplicación. Esta es una técnica directa para obtener el desfase entre ondas, gracias al comportamiento periódico que presentan las señales reconstruidas a baja frecuencia (las 6 primeras frecuencias de las señales) mediante la serie de Fourier. Finalmente, se seleccionaron los datos de NDVI desde (01/01/99+*desfase*) hasta (31/12/02+*desfase*), para que se encuentren en *fase* (corregida) con los datos de precipitación, según indique el valor del *desfase* de cada estación (Tabla 2), en cada T escogido.

La *amplitud característica* ($n=0$ en (4)) nos indica el valor medio de la señal reconstruida (lluvia o NDVI). Esta es utilizada para poder obtener el valor proporcional de cambio de escala (*relación de escala*) de la serie de tiempo de NDVI, en las amplitudes del espectro real (ver (3)) a la de precipitación, a través de la siguiente relación:

$$\text{Factor de Cambio de Escala} = \text{FCE} = \frac{F_{\text{lluvia}}(0)}{F_{\text{NDVI}}(0)} \quad (7)$$

Luego se multiplicaron los valores de NDVI por el FCE, para obtener valores correspondientes a los de precipitación. Así, la reconstrucción basada en los datos de NDVI es del tipo de precipitación y de un mismo valor dimensional.

Se procesaron las señales de lluvia y NDVI, descomponiéndolas dos veces (segundo nivel de descomposición) con la TW, utilizando el Wavelet *Symmet2*, el cual es un filtro de alta frecuencia, utilizado convenientemente para reconstruir la precipitación pluvial, que es una señal exageradamente perturbada (con mucho ruido). La Figura 3, muestra los datos de precipitación y

NDVI, descompuestos por la TW, con sus respectivos espectros equivalentes a diferentes escalas, es decir *reescalados* a una *resolución espacial mayor*. Por cada procesamiento (descomposición) de la TW se obtuvieron dos espectros: uno en baja frecuencia (S_B) conocido como BASE y otro en alta frecuencia (S_A) llamado RUIDO (*low-high frequency filter*). La Base nos muestra la estructura o forma principal de la señal mientras que el Ruido nos brinda sus detalles.

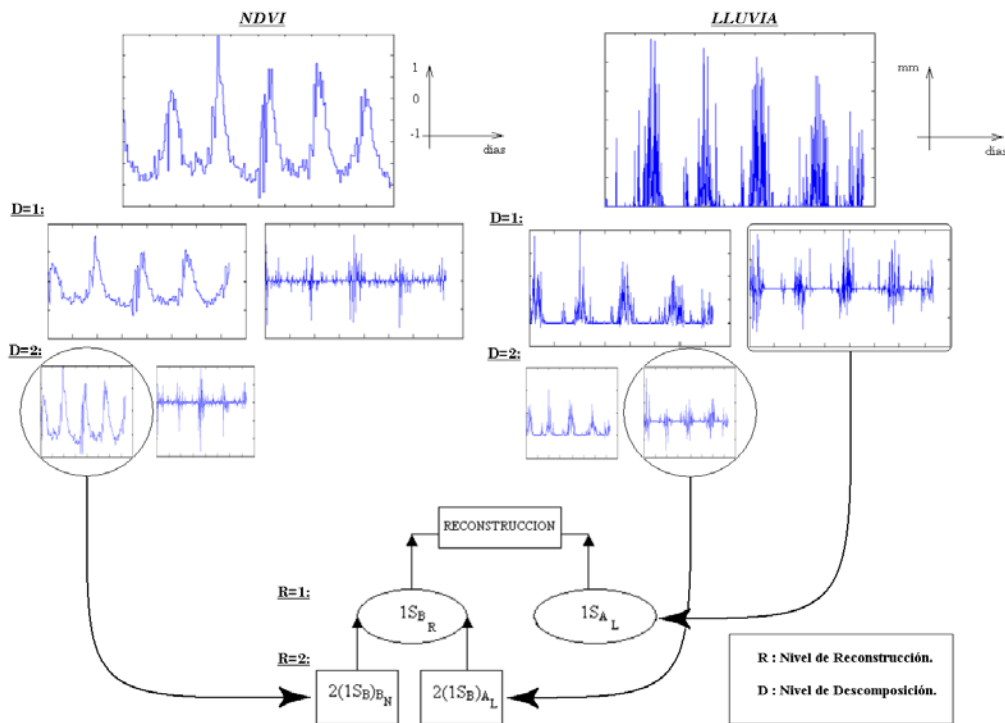
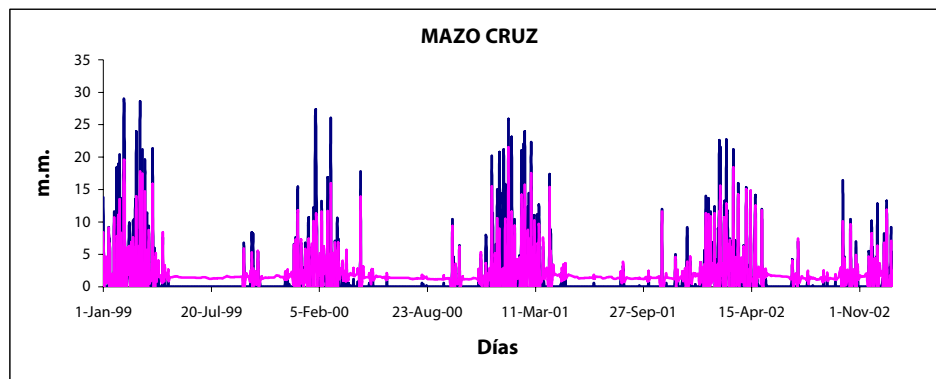


Figura 3. "TÉCNICA DE RECONSTRUCCIÓN DE OCURRENCIA DE LLUVIA". A la derecha, datos diarios de precipitación pluvial (L), en la Estación Mazo Cruz, con T=365 días. La señal (S) se descompone aplicando la TW a una mayor resolución espacial a distintas frecuencias (B-baja y A-alta), hasta el segundo nivel de descomposición (D=2). A la izquierda, el mismo proceso pero aplicado a los datos de NDVI (N) (Foufoula-Georgiou and Kumar, 1994).

El procesamiento inverso es llamado RECONSTRUCCIÓN, y es descrito gráficamente por las "flechas verticales" de la Figura 3. Los niveles de Reconstrucción son equivalentes a los niveles de Descomposición. La Técnica de Reconstrucción de lluvia, de la presente publicación, tomó la señal de NDVI, corrigió su *desfase* y luego le aplicó la TIW. En principio se procedió a aplicar la TW, con el filtro Symmlet 2, a las señales de precipitación y NDVI, obteniéndose la señal base y ruido de precipitación ($1S_{B_L}$ y $1S_{A_L}$) y base y ruido de NDVI ($1S_{B_N}$ y $1S_{A_N}$), respectivamente. Luego se procedió a aplicar una segunda vez la TW, ahora en el primer nivel de descomposición (D=1), a la señal base ($1S_{B_N}$), obteniéndose en el segundo nivel de descomposición (D=2) las señales $2(1S_B)_{B_N}$ (Base de NDVI, en D=2) y $2(1S_B)_{A_N}$ (Ruido en D=2). La señal $2(1S_B)_{B_N}$ es multiplicada por el valor de FCE correspondiente a este nivel, obteniéndose datos del tipo de precipitación en baja frecuencia. Simultáneamente, se procedió a descomponer la señal base de

precipitación ($1S_{B_L}$) en $D=1$, obtenida anteriormente. De esta manera se descompuso la precipitación en el nivel $D=2$, obteniéndose las señales $(2(1S_B)_{B_L}$ (Base en $D=2$) y $2(1S_B)_{A_L}$ (Ruido en $D=2$). En el segundo nivel de Reconstrucción ($R=2$), se seleccionaron la señal base de NDVI y la señal Ruido de la Precipitación, como muestran las flechas curvas alargadas de la figura 3. Luego, se aplicó la TIW (sentido de las Flechas verticales, en la Figura 3), obteniéndose una señal reconstruida en el primer nivel de Reconstrucción ($R=1$) del tipo Base ($1S_{B_R}$). Finalmente, la señal reconstruida en $R=1$, con el ruido de lluvia ($1S_{A_L}$), fue procesada por la TIW, para dar como resultado la *Reconstrucción de lluvia final* en la escala diaria, del mismo tipo que la de los datos de precipitación originales. En publicaciones anteriores (Immerzeel et al., 2005) se muestra la similitud que existe entre las señales de NDVI y de precipitación.

Los resultados de la obtención de los desfases y los valores correspondientes de R^2 de la regresión lineal entre la precipitación real vs la reconstruida, se muestran en la Tabla 1. Se observa que los valores de mayor R^2 se encuentran en el periodo $T=121$ días. En este periodo se tiene R^2 entre [0.707, 0.849] en las estaciones Tahuaco Yunguyo y Macusani y el desfase se encuentra en el rango de [3, 95] días, valores límites correspondientes a las estaciones Azángaro y Macusani, respectivamente. Las reconstrucciones de las precipitaciones de las 10 estaciones del altiplano peruano que se muestran en la Tabla 1, con $T=121$, se presentan en la Figura 4.



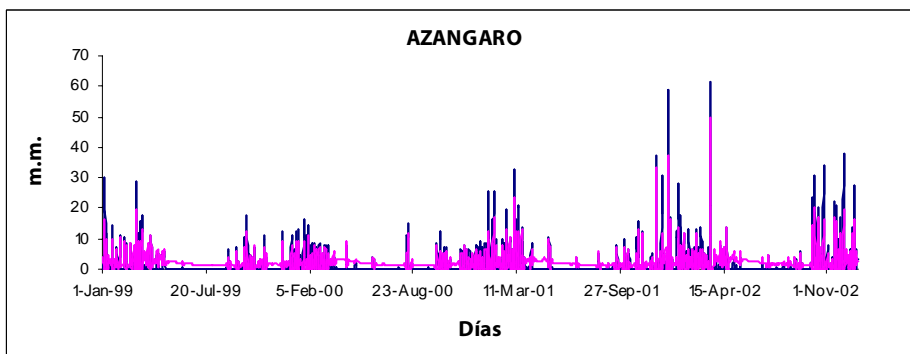
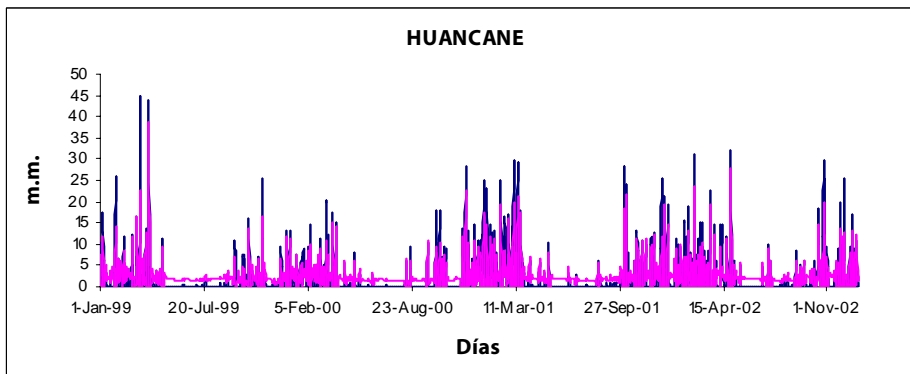
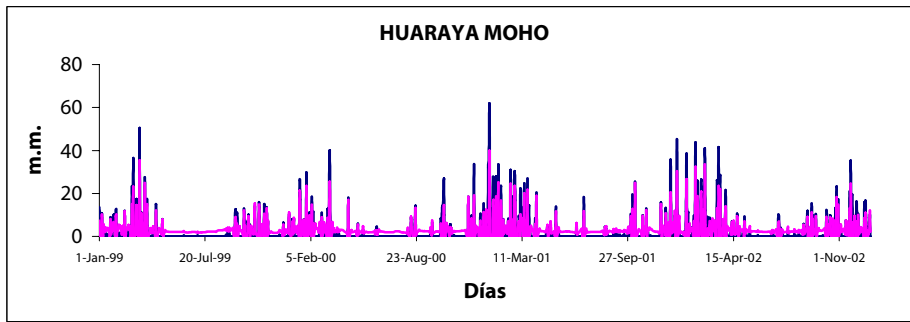
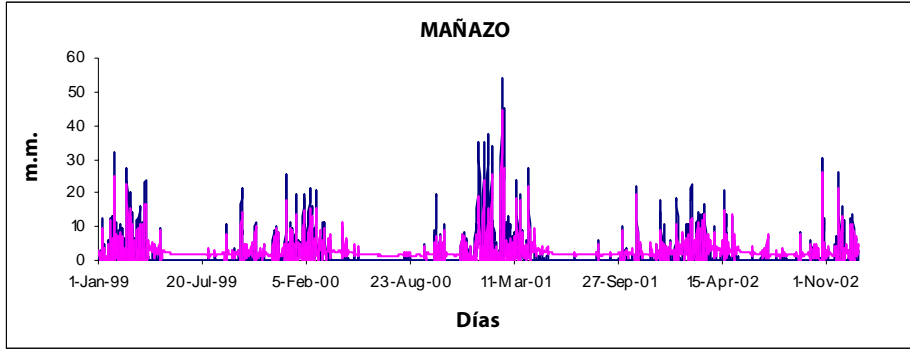
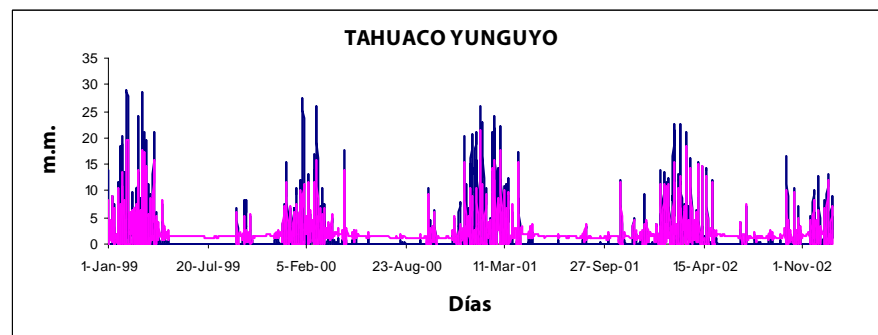
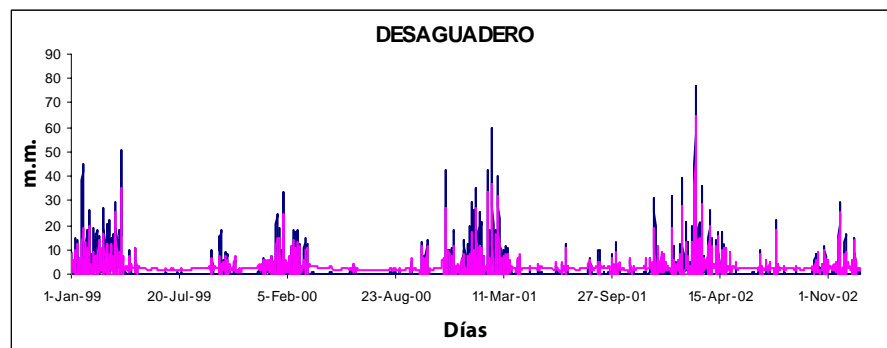
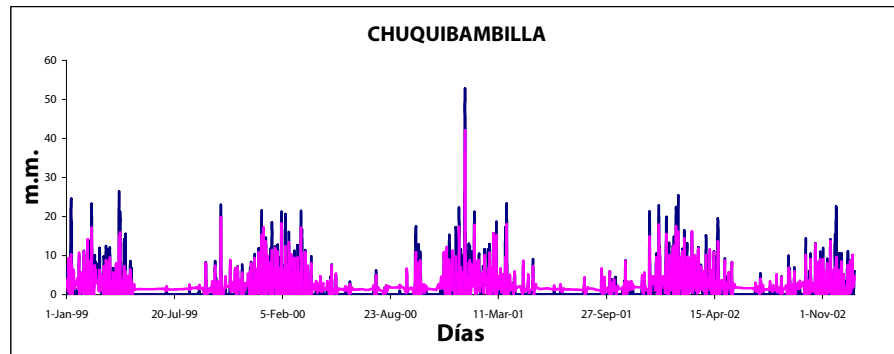
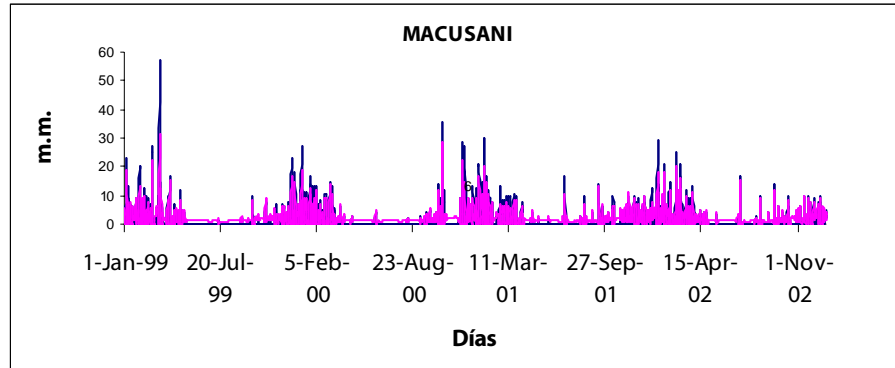
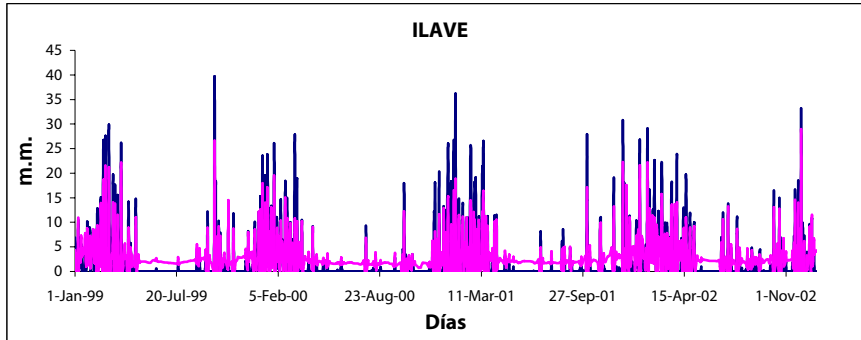


Figura 4. Reconstrucciones de ocurrencias de lluvias en 10 estaciones meteorológicas del Altiplano Peruano. — Precipitación real y — Precipitación reconstruida.





Es necesario mencionar que los datos reconstruidos tienen la misma resolución espacial que los píxeles de las bandas de NDVI, de donde fueron obtenidos los datos de NDVI, en cada estación, entre el 01/01/99 y el 31/12/02. En este caso, la resolución de las imágenes de las bandas de NDVI es de 1píxel/km². Es decir, esta reconstrucción representa la lluvia en una superficie de 1km² aproximadamente. Si se procesaran bandas de NDVI de alguna mayor o menor resolución, tendríamos reconstrucciones de la misma resolución de los datos de entrada.

DISCUSIÓN

Como se observa en la Figura 3, en el nivel de descomposición original (D=0) las señales muestran un mismo número de crestas y valles, lo que sugiere que es factible un comportamiento proporcional, sugerencia fundamentada en los resultados de un análisis previo mediante la TF[4]. En D=1, los ruidos (descomposición con TW de altas frecuencias, $1S_{A_L}$ y $1S_{A_N}$) de ambas señales muestran un comportamiento caótico similar. Igualmente, en D=2, los ruidos de las señales de NDVI y lluvia ($2(1S_B)_{A_L}$ y $2(1S_B)_{A_N}$), son semejantes respecto a la forma de la envolvente de las señales, lo cual implica un principio estocástico similar y también que la perturbación o detalles más puntuales (su distribución) pueden ser catalogados como una misma clase de eventos. Lo mismo sucede con las bases (señal de un rango de bajas frecuencias, obtenida con TW, en un proceso de descomposición $2(1S_B)_{B_L}$ y $2(1S_B)_{B_N}$) en D=2).

Se observa un comportamiento estacionario en las señales reconstruidas con la serie de Fourier (Figura 2), lo cual genera un error (no significativo) en el desfase, debido a que los datos reales son estocásticos. Por lo dicho, se sobreentiende al desfase como un valor dinámico pero en la presente técnica de reconstrucción se utiliza el valor medio. El desfase que se presenta es variable respecto a la ubicación geográfica; al R² que se obtiene con la recta de regresión de los datos

reales de precipitación *vs* los reconstruidos; y además, respecto al periodo (particiones de días) de análisis T que se considere (anual, semestral, etc., ver Tabla 1).

Las reconstrucciones, como se aprecia en la Figura 4, son próximas puntualmente, y en su espectro, convergentes uniformemente a los datos de precipitación en cada estación. Asimismo, los valores numéricos son de la misma clase y próximos en magnitud a los datos reales de precipitación. La técnica de reconstrucción presentada es a escala local

CONCLUSIONES

Se observa una mejor correlación de los datos reconstruidos *vs* los datos originales ($0.849 > R^2 > 0.707$ diario), comparada con correlaciones en anteriores trabajos de reconstrucción de lluvia (alrededor de $R^2 \cdot 0.70$ mensual, anual en Immerzeel et al., 2005), La importancia de este Modelo es que permite obtener datos diarios de precipitación. El Modelo busca una función generatriz de lluvia, o ruido característico, como se observa en el nivel D=2. Así, en posteriores trabajos se podría estimar precipitaciones pluviales en diferentes intervalos de tiempo, usando datos de NDVI y el ruido (generatriz) de lluvia como es mostrado en la Figura 3. El método resultaría muy relevante para alimentar modelos globales de predicción climática al estimar llovias en zonas donde no hay estaciones climatológicas.

Se observa que el mayor valor de R^2 (por lo tanto, la mejor reconstrucción), es obtenido en un análisis cuatrimestral en la mayoría de estaciones climatológicas. Este análisis produce un *desfase* óptimo para la reconstrucción y muestra que las llovias en el altiplano peruano se comportan establemente, con una partición cuatrimestral (cada T=4 meses o 121 días aproximadamente) de la señal anual de precipitación. El *desfase* en este periodo (y en todos, ver Tabla 2), es proporcional al periodo T de análisis y muy variable entre estaciones meteorológicas de una misma zona geográfica del altiplano peruano. Esto se debe a la diversidad de la vegetación existente en las localidades donde están ubicadas las estaciones meteorológicas; a la topografía de la región, cuyas pendientes producen un efecto de falso riego en las zonas que reciben la escorrentía de las zonas altas, modificándose su vegetación; y a la altitud en que se encuentran las estaciones, mayor a 3860 msnm, donde el clima y la radiación solar son muy variables. Todas estas condiciones determinan una alta variabilidad del tipo y condición de la vegetación, lo que influye sobre el NDVI, causando los diferentes *desfases* observados, correspondientes a cada estación climática.

REFERENCIAS

- Foufoula-Georgiou, E., and Kumar, P.** 1994. Wavelets in Geophysics. Academic Press Inc., First Edition.
- Garay De Pablo, J.** 1998. Transformadas matemáticas en teoría de señales. Discurso de Ingreso presentado en la Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza. Zaragoza, España. 21 Abril 1998. 36 p. [Consulta: 25/01/2007.]
<<<http://www.unizar.es/acz/02AcademicosNumerarios/Discursos/Garay.pdf>>>
- González, R.C., and Woods, R.E.** 1992. Digital Image Processing. Addison-Wesley Publishing Company Inc, First edition.
- Graps, A.** 1995. An Introduction to Wavelets. IEEE Computational Science and Engineering, 2 (2) p. 50-61.
- Immerzeel, W.W., Quiroz, R.A., and De Jong, S.M.** 2005. Understanding precipitation patterns and land use interaction in Tibet using harmonic analysis of SPOT VGT-S10 NDVI time series. International Journal of Remote Sensing, 26, (11), p. 2281-2296.
- Nicholson, S. E., Davenport, M.L., and Malo, A. R.** 1990. A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR. Climatic Change 17 (2-3) p. 209-241.
- Plant, R.E., Munk, D.S., Roberts, R., Vargas, R.N., Travis, R.L., Rains, D.W., and Hutmacher, R.B.** 2001. Application of Remote Sensing to Strategic Questions in Cotton Management and Research. Journal of Cotton Science 5 (1) p. 30-41.
- Polikar, R.** 1996. The Wavelet Tutorial, 329 Durham Computation Center, Iowa State University.
- Prutscher, M.** 1998. Series de Fourier, http://www.e-technik.uni-ulm.de/world/lehre/basic_mathematics/fourier/node2.php3
- Quattrochi D.A., and Goodchild, M.F.** 1997. Scale in Remote Sensing and GIS, Lewis Publishers, First edition.
- Richards, J.A.** 1995. Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer-Verlag, 2° Edition. Campbell, Australia.
- Russ, J.C.** 1999. The image Processing Handbook. Florida (USA). CRC Press; IEEE Press, Third Edition, p. 771.
- Santos, P., and Negri, A.J.** 1997. A Comparison of the Normalized Difference Vegetation Index and Rainfall for the Amazon and Northeastern Brazil. Journal of Applied Meteorology, 36 (7) p. 958-965.
- Stearn, S.D.** 2003. Digital Image Processing with examples in Matlab. CRC Press LLC, First Edition.
- Vetterli, M., and Herley, C.** 1992. Wavelets and Filter Banks: Theory and Design, IEEE Transactions on Signal Processing, 40 (9), p. 2207-2232

Tabla 1. 10 Estaciones del Altiplano Peruano – Puno. Fuente de datos: SENAMHI –Perú.

| | | | | | | |
|-----------|--------------------------|-------|----------|-------|-------|---------------|
| ESTACION | : MAZO CRUZ | LAT. | :16° 44' | "S" | DPTO. | : PUNO |
| PARAMETRO | : PRECIPITACION TOTAL | LONG. | :69° 42' | "W" | PROV. | : CHUCUITO |
| | DIARIA (mm) | ALT. | :4100 | msnm. | DIST. | : MAZO CRUZ |
| ESTACION | : MAÑAZO | LAT. | :15° 48' | "S" | DPTO. | : PUNO |
| PARAMETRO | : PRECIPITACION TOTAL | LONG. | :70° 20' | "W" | PROV. | : PUNO |
| | DIARIA (mm) | ALT. | :3920 | msnm. | DIST. | : MAÑAZO |
| ESTACION | : HUARAYA MOHO | LAT. | :15° 23' | "S" | DPTO. | : PUNO |
| PARAMETRO | : PRECIPITACION TOTAL | LONG. | :69° 29' | "W" | PROV. | : MOHO |
| | DIARIA (mm) | ALT. | : 3890 | msnm. | DIST. | : MOHO |
| ESTACION | : HUANCANE | LAT. | :15° 12' | "S" | DPTO. | : PUNO |
| PARAMETRO | : PRECIPITACION TOTAL | LONG. | :69° 45' | "W" | PROV. | : HUANCANE |
| | DIARIA (mm) | ALT. | :3890 | msnm. | DIST. | : HUANCANE |
| ESTACION | : AZANGARO | LAT. | :14° 54' | "S" | DPTO. | : PUNO |
| PARAMETRO | : PRECIPITACION TOTAL | LONG. | :70° 12' | "W" | PROV. | : AZANGARO |
| | DIARIA (mm) | ALT. | :3863 | msnm. | DIST. | : AZANGARO |
| ESTACION | : MACUSANI | LAT. | :14° 04' | "S" | DPTO. | : PUNO |
| PARAMETRO | : PRECIPITACION TOTAL | LONG. | :70° 25' | "W" | PROV. | : CARABAYA |
| | DIARIA (mm) | ALT. | :4341 | msnm. | DIST. | : MACUSANI |
| ESTACION | : CHUQUIBAMBILLA | LAT. | :14° 47' | "S" | DPTO. | : PUNO |
| PARAMETRO | : PRECIPITACION TOTAL | LONG. | :70° 44' | "W" | PROV. | : MELGAR |
| | DIARIA (mm) | ALT. | :3971 | msnm. | DIST. | : UMACHIRI |
| ESTACION | : DESAGUADERO | LAT. | :16° 34' | "S" | DPTO. | : PUNO |
| PARAMETRO | : PRECIPITACION TOTAL | LONG. | :69° 02' | "W" | PROV. | : CHUCUITO |
| | DIARIA (mm) | ALT. | :3860 | msnm. | DIST. | : DESAGUADERO |
| ESTACION | : TAHUACO YUNGUYO | LAT. | :16° 18' | "S" | DPTO. | : PUNO |
| PARAMETRO | : PRECIPITACION TOTAL | LONG. | :69° 04' | "W" | PROV. | : YUNGUYO |
| | DIARIA (mm) | ALT. | :3890 | msnm. | DIST. | : YUNGUYO |
| ESTACION | : ILAVE | LAT. | :16° 05' | "S" | DPTO. | : PUNO |
| PARAMETRO | : PRECIPITACION TOTAL | LONG. | :69° 39' | "W" | PROV. | : COLLAO |
| | DIARIA (mm) | ALT. | :3880 | msnm. | DIST. | : ILAVE |

Tabla 2. Desfase y Correlación de las Estaciones del Altiplano Peruano – Puno, datos procesados mediante la Técnica de Reconstrucción de Lluvia utilizando la TW con dos niveles de descomposición.

| T (Periodo de analisis) | MAZO CRUZ | | MAÑAZO | | HUARAYA MOHO | | HUANCANE | | AZANGARO | |
|--------------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|
| | <i>R</i> ² | <i>desfase</i> | <i>R</i> ² | <i>desfase</i> | <i>R</i> ² | <i>desfase</i> | <i>R</i> ² | <i>desfase</i> | <i>R</i> ² | <i>desfase</i> |
| Anual / 365días | 0.6965 | 108 | 0.7314 | 47 | 0.7311 | 174 | 0.7367 | 169 | 0.7566 | 19 |
| Semestral / 182días | 0.6538 | 143 | 0.6956 | 24 | 0.7332 | 161 | 0.7727 | 62 | 0.7446 | 9 |
| Cuatrimestral / 121días | 0.7210 | 56 | 0.7244 | 36 | 0.7612 | 86 | 0.7729 | 76 | 0.7407 | 3 |
| Trimestral / 91días | 0.7190 | 54 | 0.7220 | 34 | 0.7569 | 80 | 0.7724 | 54 | 0.7461 | 10 |
| Bimestral / 60días | 0.6959 | 35 | 0.6906 | 18 | 0.7490 | 50 | 0.7453 | 31 | 0.7418 | 6 |
| Mensual / 30días | 0.6646 | 17 | 0.6784 | 8 | 0.7370 | 23 | 0.7325 | 16 | 0.7407 | 3 |
| Quincenal / 15días | 0.6472 | 8 | 0.6770 | 4 | 0.7276 | 11 | 0.7335 | 8 | 0.7383 | 1 |

| T (Periodo de analisis) | MACUSANI | | CHUQUIBAMBILLA | | DESAGUADERO | | TAHUACO YUNGUYO | | ILAVE | |
|--------------------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|
| | <i>R</i> ² | <i>desfase</i> | <i>R</i> ² | <i>desfase</i> | <i>R</i> ² | <i>desfase</i> | <i>R</i> ² | <i>desfase</i> | <i>R</i> ² | <i>desfase</i> |
| Anual / 365días | 0.7798 | 180 | 0.7416 | 123 | 0.7368 | 51 | 0.6889 | 93 | 0.6651 | 109 |
| Semestral / 182días | 0.7879 | 169 | 0.7844 | 59 | 0.7210 | 26 | 0.6975 | 35 | 0.7104 | 76 |
| Cuatrimestral / 121días | 0.8491 | 95 | 0.7905 | 82 | 0.7378 | 57 | 0.7071 | 43 | 0.7104 | 76 |
| Trimestral / 91días | 0.8542 | 84 | 0.7847 | 63 | 0.7263 | 35 | 0.6903 | 29 | 0.6941 | 49 |
| Bimestral / 60días | 0.8476 | 55 | 0.7363 | 34 | 0.7147 | 18 | 0.6747 | 21 | 0.6617 | 30 |
| Mensual / 30días | 0.8230 | 26 | 0.7054 | 20 | 0.7152 | 8 | 0.6544 | 9 | 0.6237 | 18 |
| Quincenal / 15días | 0.8088 | 13 | 0.6792 | 9 | 0.7136 | 4 | 0.6502 | 5 | 0.6173 | 8 |



Misión del CIP

El Centro Internacional de la Papa (CIP) busca reducir la pobreza y alcanzar la seguridad alimentaria sobre bases sustentables en los países en desarrollo, mediante la investigación científica y actividades relacionadas en papa, camote y otras raíces y tubérculos y un mejor manejo de los recursos naturales en sistemas agrícolas basados en cultivos de papa y camote

Visión del CIP

El Centro Internacional de la Papa (CIP) contribuirá a reducir la pobreza y el hambre, a mejorar la salud humana, desarrollar sistemas de sustento rurales sostenibles y robustos, y a mejorar el acceso a los beneficios de los conocimientos y las tecnologías modernas. El CIP afrontará estos desafíos ejecutando y convocando investigaciones y alianzas que se centren en cultivos de raíces y tubérculos y en el manejo de los recursos naturales en sistemas de montaña y otras zonas menos favorecidas en donde el CIP puede contribuir a un desarrollo humano saludable y sostenible.

www.cipotato.org



El CIP es financiado por un grupo de gobiernos, fundaciones privadas y organizaciones internacionales y regionales que conforman el Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional, más conocido por sus siglas en inglés CGIAR.

www.cgiar.org

Centro Internacional de la Papa

Apartado 1558 Lima 12, Perú • Tel 51 1 349 6017 • Fax 51 1 349 5326 • email cip@cgiar.org