

Facultad de Ciencias

Departamento de Estadística

Carrera Ingeniería Estadística

PROYECTO DE TÍTULO II

Asignatura	:	Proyecto Título II (220068)
Título	:	Estudio de Correlación entre el Índice de Humedad de la Vegetación (NDVI) y la Temperatura Superficial de la Tierra (TST) en Escala Anual e Interanual.
Realizado por	:	Juan Omar Bascur Valencia Estudiante de Ingeniería Estadística.
Profesor Guía	:	Luis Soto Mardones Docente Departamento de Física. Isaac Maldonado Director Regional Instituto Nacional de Investigaciones agropecuarias (INIA)
Co - Patrocinador	:	Ricardo Pavez Fuentes Docente Departamento de Matemática
Semestre	:	1° Semestre 2012
Informante	:	Sergio Contreras Jefe Carrera Ingeniería Estadística
Fecha	:	25 de Julio de 2012



Estudio de Correlación entre el Índice de Humedad de la Vegetación (NDVI) y la Temperatura Superficial de la Tierra (TST) en Escala Anual e Interanual.

Juan Omar Bascur Valencia

Alumno de Ingeniería Estadística

Luis Soto Mardones

Profesor Guía

Departamento de Física

Facultad de Ciencias

Isaac Maldonado

Co – Patrocinador

Director Regional

Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA)

Ricardo Pavez Fuentes

Profesor Co – Patrocinador

Departamento de Matemáticas

Facultad de Ciencias

Concepción, Octubre de 2012

Contenido

1. Introducción.....	8
2. Justificación.....	9
3. Objetivos	10
3.1. Objetivo General.....	10
3.2. Objetivos Específicos.....	10
4. Marco Teórico	11
5. Marco Conceptual	12
6. Descripción de Materiales y Métodos.....	18
6.1. Caracterización de la Zona de Estudio, Región del Biobío	18
6.1.1. Clima	19
6.1.2. Hidrografía.....	19
6.1.3. Relieve	20
6.2. Variables de Estudio y Descripción de Datos	22
6.3. Metodología Aplicada	23
7. Resultados y Discusión	24
7.1. Recopilación de información Básica de Datos Satelitales	24
7.2. Programación con software Matlab 7.9.0 (R2009b).....	24
7.3. Interpolado de Matrices	24
7.4. Análisis de las Variables en la Escala Anual	25
7.4.1. Extracción de Series	25
7.4.2. Transformada Wavelet Continua series TST.....	26
7.4.2.1. Transformada Wavelet Continua de series TST – Zona Costera	26
7.4.2.2. Transformada Wavelet Continua series TST – Zona Valle Central	27
7.4.2.3. Transformada Wavelet Continua series TST – Zona Precordillerana.....	29
7.4.3. Transformada Wavelet Continua series NDVI.....	30
7.4.3.1. Transformada Wavelet Continua series NDVI – Zona Costera.....	30
7.4.3.2. Transformada Wavelet Continua series NDVI – Zona Valle Central.....	33

7.4.3.3. Transformada Wavelet Continua series NDVI – Zona Precordillerana	36
7.4.4. Transformada Wavelet Cruzada Series TST y NDVI en Escala Anual.....	38
7.4.4.1. Transformada Wavelet Cruzada Series TST y NDVI – Zona Costera	38
7.4.4.2. Transformada Wavelet Cruzada de Series TST y NDVI – Zona Valle Central	41
7.4.4.3. Transformada Wavelet Cruzada de Series TST y NDVI – Zona Precordillerana.....	44
7.4.5. Función de Autocorrelación.....	46
7.4.5.1. Función de Autocorrelación Series TST	46
7.4.5.2. Función de Autocorrelación Series NDVI.....	48
7.4.6. Función de Correlación Cruzada Series TST vs NDVI.....	51
7.4.6.1. Función de Correlación Cruzada Series TST vs NDVI – Zona Costera.....	51
7.4.6.2. Función de Correlación Cruzada Series TST vs NDVI – Zona Valle Central.....	52
7.4.6.3. Función de Correlación Cruzada Series TST vs NDVI – Zona Precordillerana	52
7.5. Análisis de las Variables en la Escala Interanual.....	53
7.5.1. Transformada Wavelet Continua sobre Anomalías de Series TST	56
7.5.1.1. Transformada Wavelet Continua Anomalías de Series TST – Zona Costera	56
7.5.1.2. Transformada Wavelet Continua Anomalías de Series TST – Zona Valle Central	59
7.5.1.3. Transformada Wavelet Continua Anomalías de Series TST – Zona Precordillerana ..	62
7.5.2. Transformada Wavelet Continua sobre Anomalías de Series NDVI	65
7.5.2.1. Transformada Wavelet Continua Anomalías de Series NDVI – Zona Costera	65
7.5.2.2. Transformada Wavelet Continua Anomalías de Series NDVI – Zona Valle Central	68
7.5.2.3. Transformada Wavelet Continua Anomalías de Series NDVI – Zona Precordillerana.	70
7.5.3. Transformada Wavelet Cruzada ATST vs ANDVI	73
7.5.3.1. Transformada Wavelet Cruzada ATST vs ANDVI – Zona Costera.....	73
7.5.3.2. Transformada Wavelet Cruzada ATST vs ANDI – Zona Valle Central	78
7.5.3.3. Transformada Wavelet Cruzada ATST vs ANDI – Zona Precordillerana.....	81
8. Conclusiones.....	84
9. Bibliografía	87

Índice de Figuras

Figura 1. Índice MEI.....	13
Figura 2. Áreas de afectación de los eventos El Niño y la Niña.....	15
Figura 3. Visión del espectro visible e infrarrojo cercano para el suelo y la vegetación.....	16
Figura 4. Representación de la reflectividad del infrarrojo.....	17
Figura 5. Mapa climático región del Biobío.....	18
Figura 6. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Costera (Punto 1).....	26
Figura 7. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Costera (Punto 2).....	26
Figura 8. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Costera (Punto 3).....	27
Figura 9. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Costera (Punto 4).....	27
Figura 10. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Valle Central (Punto 1).....	28
Figura 11. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Valle Central (Punto 2).....	28
Figura 12. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Valle Central (Punto 3).....	28
Figura 13. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Precordillerana (Punto 1).....	29
Figura 14. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Precordillerana (Punto 2).....	29
Figura 15. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Precordillerana (Punto 3).....	30
Figura 16. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Costera (Punto 1).....	31
Figura 17. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Costera (Punto 2).....	31
Figura 18. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Costera (Punto 3).....	32
Figura 19. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Costera (Punto 4).....	33
Figura 20. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Valle Central (Punto 1).....	34
Figura 21. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Valle Central (Punto 2).....	34
Figura 22. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Valle Central (Punto 3).....	35
Figura 23. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Precordillerana (Punto 1).....	36
Figura 24. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Precordillerana (Punto 2).....	37
Figura 25. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Precordillerana (Punto 3).....	37
Figura 26. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Costera (Punto 1).....	39
Figura 27. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Costera (Punto 2).....	39
Figura 28. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Costera (Punto 3).....	40
Figura 29. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Costera (Punto 4).....	41
Figura 30. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Valle Central (Punto 1).....	42
Figura 31. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Valle Central (Punto 2).....	42
Figura 32. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Valle Central (Punto 3).....	43
Figura 33. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Precordillerana (Punto 1).....	44
Figura 34. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Precordillerana (Punto 2).....	45
Figura 35. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Precordillerana (Punto 3).....	46
Figura 36. Función de Autocorrelación Series TST – Zona Costera.....	47
Figura 37. Función de Autocorrelación Series TST – Zona Valle Central.....	47
Figura 38. Función de Autocorrelación Series TST – Zona Precordillerana.....	48
Figura 39. Función de Autocorrelación Series NDVI – Zona Costera.....	49

Figura 40. Función de Autocorrelación Series NDVI – Zona Valle Central.....	50
Figura 41. Función de Autocorrelación Series NDVI – Zona Precordillerana	50
Figura 42. Función de Correlación Cruzada entre Series TST y NDVI Zona Costera	51
Figura 43. Función de Correlación Cruzada entre Series TST y NDVI Zona Valle Central	52
Figura 44. Función de Correlación Cruzada entre Series TST y NDVI Zona Precordillerana	53
Figura 45. Representación de una serie de anomalías TST.....	54
Figura 46. Índice del Niño-Niña MEI	54
Figura 47. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Costera (Punto 1).....	56
Figura 48. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Costera (Punto 2).....	57
Figura 49. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Costera (Punto 3).....	58
Figura 50. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Costera (Punto 4).....	58
Figura 51. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Valle Central (Punto 1).....	60
Figura 52. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Valle Central (Punto 2).....	60
Figura 53. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Valle Central (Punto 3).....	61
Figura 54. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Precordillerana (Punto 1)	62
Figura 55. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Precordillerana (Punto 2).....	63
Figura 56. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Precordillerana (Punto 3).....	64
Figura 57. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Costera (Punto 1).....	65
Figura 58. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Costera (Punto 2).....	66
Figura 59. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Costera (Punto 3).....	67
Figura 60. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Costera (Punto 4).....	67
Figura 61. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Valle Central (Punto 1)	68
Figura 62. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Valle Central (Punto 2)	69
Figura 63. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Valle Central (Punto 3)	70
Figura 64. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Precordillerana (Punto 1).....	71
Figura 65. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Precordillerana (Punto 2).....	71
Figura 66. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Precordillerana (Punto 3).....	72
Figura 67. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Costera (Punto 1)	74
Figura 68. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Costera (Punto 2).....	75
Figura 69. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Costera (Punto 3)	76
Figura 70. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Costera (Punto 4)	77
Figura 71. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Valle Central (Punto 1)	78
Figura 72. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Valle Central (Punto 2)	79
Figura 73. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Valle Central (Punto 3)	80
Figura 74. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Precordillerana (Punto 1).....	81
Figura 75. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Precordillerana (Punto 2).....	82
Figura 76. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Precordillerana (Punto 3).....	83

Resumen

Mediante imágenes satelitales extraídas sobre las variables, Índice de Humedad de la Vegetación y Temperatura Superficial de la Tierra, se analizaron las zonas: costera, valle central y precordillera pertenecientes a la Región del Biobío (VIII Región, Chile), que se encuentra aproximadamente entre 36°00' y 38°30' de latitud Sur y entre los 71° 00' de longitud oeste hasta el océano Pacífico.

A través de análisis estadístico se demostró, que en la escala anual, las variables presentan claras fluctuaciones estacionales y dependencias entre ellas, en lugares específicos de la región. Además, se observó la influencia del evento de El Niño con fase directa sobre el Índice de Humedad de la Vegetación y fase contraria sobre la Temperatura Superficial de la Tierra, para la escala interanual.

1. Introducción

Es conocido que el clima es uno de los factores determinantes en los sistemas productivos agrícolas. La falta de precipitaciones y las temperaturas extremas tienen incidencia directa en el éxito o fracaso de la empresa agrícola. Autores han analizado el impacto de las condiciones climáticas sobre la vegetación natural o sobre los cultivos a diferentes escalas mediante el Índice de Humedad de la Vegetación.

Dado lo anterior, esta tesis tiene por objetivo utilizar las aplicaciones de la Transformada Wavelet y Transformada Wavelet Cruzada para estudiar el comportamiento, relación existente y dominación entre las variables Índice de Humedad de la Vegetación (NDVI) y Temperatura Superficial de la Tierra (TST) en la Región del Biobío, tanto en la escala anual como interanual.

2. Justificación

Los resultados de Vargas [2010] y Baeza [2011] muestran claramente una conexión y una dependencia del NDVI con la TST. En este trabajo se postula que existe una relación directa entre el Índice de Humedad de la Vegetación con la Temperatura Superficial de la Tierra, por lo cual se pretende estudiar la correlación espacial y temporal en diferentes escalas (periodo anual y varios de años) que existe entre ambas variables.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Estudiar el grado de correlación espacial y temporal que existe entre el Índice de Humedad de la Vegetación con la Temperatura superficial de la Tierra en diferentes escalas.

3.2. Objetivos Específicos

- Completar series de datos históricos (datos faltantes) de la VIII región mediante la interpolación de datos.
- Estudiar el comportamiento de las variables TST y NDVI en diversas escalas mediante la Transformada Wavelet Continua.
- Aplicar el Método de Correlación Cruzada para identificar la relación existente entre las variables en estudio.

4. Marco Teórico

Para cumplir con los objetivos descritos anteriormente, se aplicaron metodologías asociadas a la Geo estadística y Análisis de Tendencia, las cuales son:

1. Interpolación Spline Cúbica Segmentaria
2. Transformada Wavelet Continua.
3. Función de Autocorrelación
4. Función de Correlación Cruzada.
5. Análisis Armónico.
6. Transformada Wavelet Cruzada.

La fundamentación teórica respectiva a cada metodología aplicada en este informe, se encuentra documentada en Proyecto de Título I, “Estudio de Correlación entre el Índice de Humedad de la Vegetación (NDVI) y la Temperatura Superficial de la Tierra (TST) en Frecuencia Anual e Interanual”, del mismo autor, Juan Omar Bascur Valencia, Alumno Tesista, Ingeniería Estadística, Departamento de Estadística, Facultad de Ciencias, Universidad del Bío-Bío.

5. Marco Conceptual

A continuación se definen algunos conceptos que deben manejarse, para que la información entregada sea de mayor comprensión:

- **Temperatura**

La temperatura atmosférica es el indicador de la cantidad de energía calórica acumulada en el aire. Aunque existen otras escalas para otros usos, la temperatura del aire se suele medir en grados centígrados (°C). La temperatura depende de diversos factores, por ejemplo, la inclinación de los rayos solares, la dirección y fuerza del viento, la latitud, la altura sobre el nivel del mar, la proximidad de masas de agua, etc.

- **Estacionalidad**

Es un componente que se presenta en series de frecuencia inferior a la anual (mensual, trimestral,...), y supone oscilaciones a corto plazo de periodo regular, inferior al año y amplitud regular. Se trata de la componente que introduce los matices más interesantes de cara a la predicción. En general, todas las series de frecuencia inferior a la anual presentan en mayor o menor medida estacionalidad.

- **Estacionariedad**

Se dice que un proceso es estrictamente estacionario si sus propiedades, no se ven afectadas por cambios de origen temporal, esto es, cuando al realizar un mismo desplazamiento en el tiempo de todas las variables de cualquier distribución conjunta finita, resulta que esta distribución no varía.

- **Índice MEI**

Para el análisis de la variable TST y NDVI en la escala interanual se ha utilizado un índice que permite cuantificar en el tiempo la ocurrencia de eventos como El Niño y La Niña, el indicador que se usó en este trabajo es el Índice del El Niño o también llamado Índice de MEI (Multivariate ENSO Index). A través de este índice (figura 1), las señales interanuales

son monitoreadas en la región ecuatorial el cual indica a través de un gráfico Tiempo (años) versus Índice El Niño, los eventos anómalos que han ocurrido durante el periodo 1985 hasta el 2009. Este índice considera seis variables incluyendo la presión del nivel del mar, los componentes zonales y meridionales del viento superficial, la temperatura superficial del mar, temperatura del aire superficial, y fracción del total del cielo cubierto por las nubes. Los valores positivos del MEI representan la fase caliente de ENSO (El Niño) mientras que los valores negativos de MEI representan la fase fría de ENSO, (La Niña).

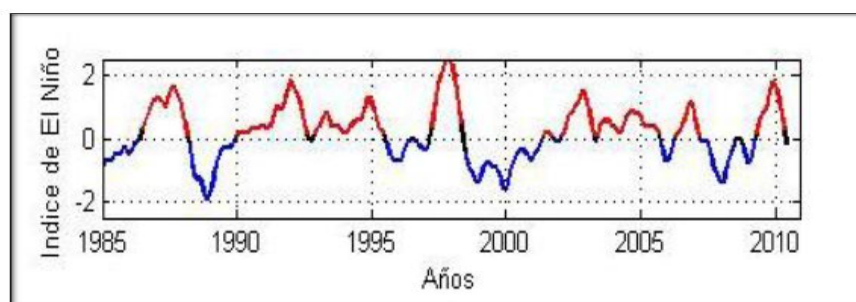


Figura 1. Índice MEI

- **Evento de El Niño**

Es un fenómeno natural de interacción océano-atmósfera que ocurre en la región del Pacífico intertropical cada cierta cantidad de años y que se caracteriza por presentar condiciones de la temperatura del mar más cálidas que lo normal en una extensa área entre las costas sudamericanas y de Oceanía.

La atmósfera es perturbada durante un evento del El Niño, debido que en condiciones normales los vientos alisios soplan en la región intertropical desde América hacia Oceanía, se debilitan y pueden llegar a cambiar de sentido, facilitando así el transporte de aguas calientes características del sector de Indonesia hacia las costas intertropicales sudamericanas y posteriormente hacia el istmo de Panamá y las costas norte de Chile. En la atmósfera media y alta del Pacífico ecuatorial, los vientos del este también se debilitan, permitiendo que la nubosidad convectiva del sudeste asiático se desplace hacia Sudamérica, produciendo intensas precipitaciones en Ecuador y Perú. Estas alteraciones atmosféricas, también hacen que la zona de altas presiones que se ubica sobre el

Océano Pacífico frente a la parte norte y central de Chile (anticiclón del Pacífico), se desplace hacia el oeste, debilitando sus efectos en Chile y permitiendo así que los sistemas frontales que provienen del Pacífico sur, alcancen la zona central y norte chico del país, incrementándose la cantidad e intensidad de las precipitaciones en estos sectores.

Durante algunos años, se presentan condiciones cálidas en el Pacífico ecuatorial y costas del norte de Chile, asociadas a disminución de la presión atmosférica, evidenciando así la presencia de un Fenómeno El Niño. Este calentamiento del agua marina inhibe el afloramiento de aguas frías, ricas en microorganismos, desde las profundidades marinas, aumentándose la temperatura del aire en 1 a 2° sobre lo normal, lo que es sensible en la costa norte de Chile durante el período de máxima intensidad del Niño.

El elemento climático más afectado por un Fenómeno El Niño es la precipitación. Desde la III hasta la VIII región del país, muchas veces se experimenta un importante aumento en los totales de precipitaciones y en su intensidad. En condiciones normales, la circulación atmosférica en Chile, que determina las características climáticas del país, está definida por las características de dos factores: el anticiclón subtropical del Pacífico suroriental y el cinturón de bajas presiones subpolares. El primero corresponde a un área de altas presiones semipermanentes que afecta la zona norte y central del país, con fluctuaciones norte-sur en la ubicación de su borde sur durante el invierno (30° a 35° de latitud) y en verano (35° a 40° de latitud). El segundo factor es el cinturón de bajas presiones que se localiza entre los 45° y 55° de latitud sur, cuyos desplazamientos hacia latitudes menores ocurren con frecuencia en invierno, originando el desarrollo de sistemas frontales que incursionan regularmente entre La Serena y Concepción.

En condiciones anómalas: En presencia de un evento de El Niño, el anticiclón subtropical del Pacífico se debilita en el sector oriental (frente a Chile) disminuyendo sus efectos en la zona central y norte chico del país y facilitando el desplazamiento de los sistemas frontales que provienen de la región oeste del Pacífico. Esta condición atmosférica, aumenta la frecuencia de bandas nubosas frontales y las intensifica, generándose así una mayor cantidad de precipitaciones. El desplazamiento del anticiclón subtropical del Pacífico hacia el oeste, facilita la presencia de capas atmosféricas inestables cercanas a la superficie, que se asocian a precipitaciones. Las precipitaciones más intensas que ocurrieron durante evento del El Niño 1997 (709 mm)

- **Evento de La Niña**

Es el fenómeno contrario a El Niño, este fenómeno se refiere a los eventos inusuales de enfriamiento (enfriamiento anómalo) de las aguas superficiales del Océano Pacífico Ecuatorial que ocurren interanual e irregularmente. Años en que se produjeron eventos de La Niña en Chile: 1988-89, 1996, 1999-2000 y 2007. Siendo la más intensa, La Niña 1988-89.



Figura 2. Áreas de afectación de los eventos El Niño y la Niña

- **Índice de vegetación**

Los índices de vegetación realzan la contribución de la vegetación en la respuesta espectral de las superficies, atenúan otros factores como el suelo, atmósfera, iluminación. Sirven como variable de entrada para modelos bio-físicos (rendimiento de cultivos, estrés hídrico, cobertura verde del suelo). Permiten el seguimiento multitemporal de la vegetación, como los cambios y dinámica.

- **NDVI**

El índice de vegetación normalizado (NDVI) es un parámetro utilizado principalmente en la teledetección para la identificación de vegetación verde y su seguimiento. Este indicador fue desarrollado por Rouse et al. (1973), después de la necesidad de la identificación de la vegetación con datos de satélites en la iluminación y diferentes condiciones de

observación. Este índice se ha utilizado en numerosos estudios de vegetación (Véase, por ejemplo Tucker, 1979; Tucker, 1980; Sellers, 1985; Sellers et al., 1994).

Descripción

La radiación solar es absorbida por las plantas en la región espectral, y se utiliza como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis. Las hojas reflejan y transmiten la radiación solar en el infrarrojo cercano, por lo que las plantas verdes aparecen oscuras en la región espectral y brillantes en el infrarrojo cercano (Gates, 1980). Por el contrario, las partes ricas en agua (nubes, nieve, mar) tienden a ser bastante oscuras en el infrarrojo cercano y brillantes en el espectro visible. La figura muestra la vegetación, así como vegetación seca y suelo espectro.

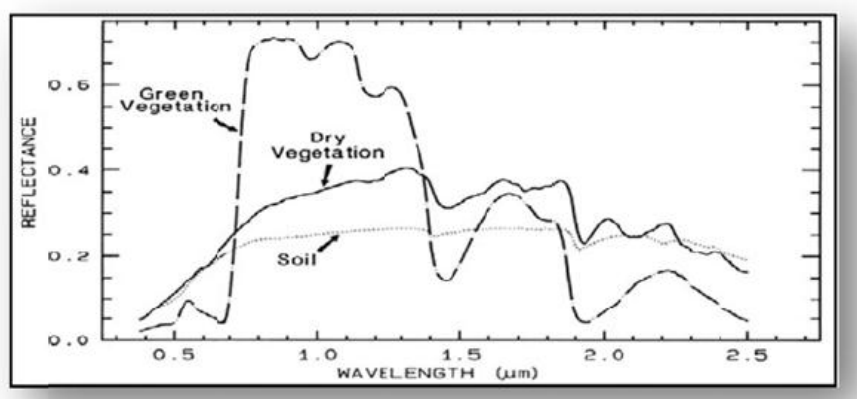


Figura 3. Visión del espectro visible e infrarrojo cercano para el suelo y la vegetación

Plataformas satelitales utilizan sensores (MODIS) para detectar longitudes de onda infrarrojas. Así, aprovechando las fuertes diferencias en la reflectancia de la planta en rojo y longitudes de onda del infrarrojo cercano la distribución espacial de la vegetación se puede determinar a partir de mediciones de teledetección. Aunque hay otras formas de obtener este índice, calculando los valores del NDVI de reflectancias (Goward et al. 1991) que se define como sigue:

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R}$$

IR = reflectividad del infrarrojo cercano

R = reflectividad del rojo

R y IR varían entre 0 y 1, en consecuencia NDVI varía entre -1 y 1, siendo los cercanos a 1 los que nos muestran una vegetación vigorosa, es aquí donde un pixel aparecerá rojo ya que presenta mayor reflectancia, los menores a 0.2 presentan baja densidad de vegetación y los menores a 0.15 la ausencia de masa vegetal. Diversos estudios han relacionado directamente con NDVI la capacidad fotosintética y por lo tanto la absorción de energía de los toldos de la planta (Sellers, 1985; Myneni et al, 1995).

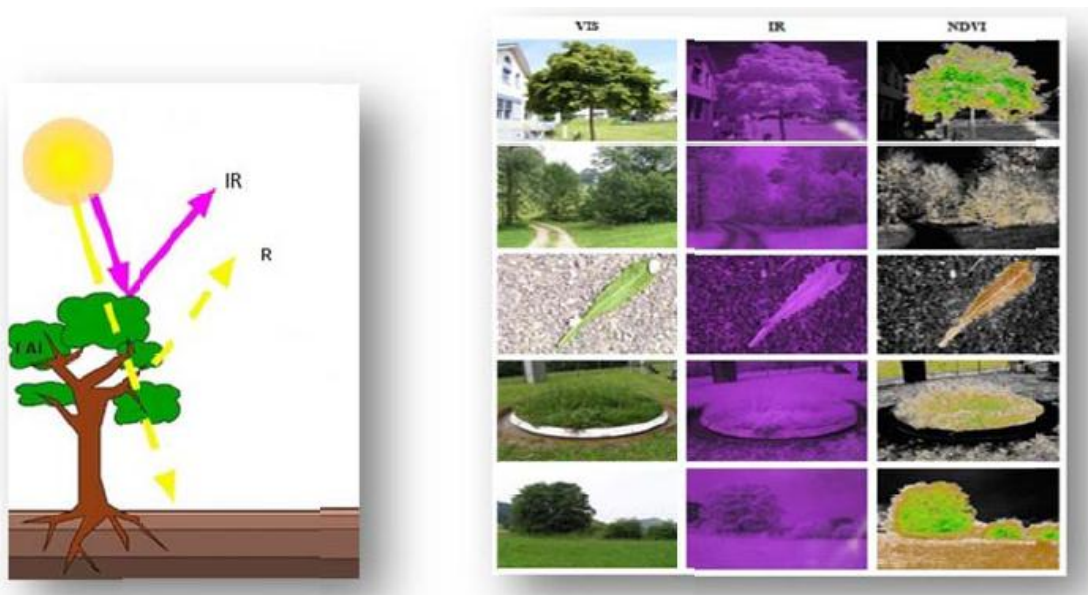


Figura 4. Representación de la reflectividad del infrarrojo

6. Descripción de Materiales y Métodos

6.1. Caracterización de la Zona de Estudio, Región del Biobío

La región del Biobío se localiza en el límite Sur de la zona central específicamente entre 36° 00' y 38° 30' de latitud sur y entre los 71° 00' de longitud oeste hasta el océano Pacífico, limita al Norte, con la región del Maule, al Sur con la región de la Araucanía, al Oeste con el océano Pacífico y al Este con la República Argentina. Su superficie es de 36.929,3 km² y comprende cuatro provincias, Ñuble, Biobío, Concepción y Arauco, que agrupan un total de cincuenta y dos comunas.

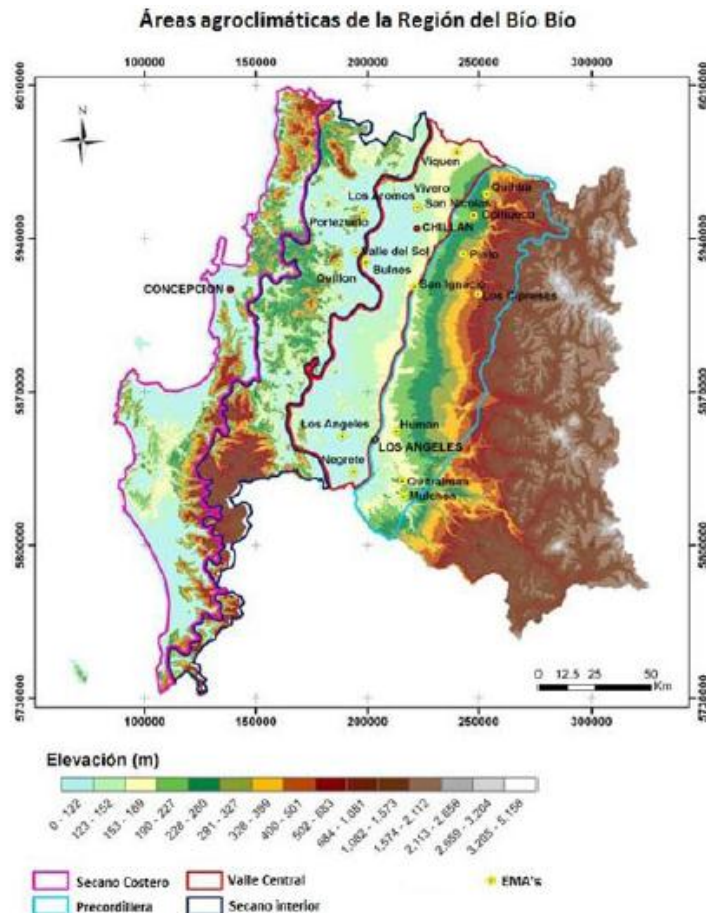


Figura 5. Mapa climático región del Biobío

6.1.1. Clima

Desde el punto de vista climático, la región marca la transición entre los climas templados secos de la zona central de Chile y los climas templados lluviosos que se desarrollan inmediatamente al sur del río Biobío.

En la franja costanera y en los sectores altos y ladera occidental de la Cordillera de la Costa se presenta un clima templado húmedo, con una humedad constante con precipitaciones que fluctúan entre 1.200 mm y 2.000 mm anuales de norte a sur de la región.

Hacia el interior, el clima templado costero húmedo posee también temperaturas menos extremas donde las precipitaciones alcanzan 1.330 mm anuales con un período seco de cuatro meses. En el valle longitudinal las temperaturas presentan un mayor contraste entre día y noche.

En la parte norte de la región predomina el clima Templado Mediterráneo abarcando toda la zona intermedia, bordes orientales de la Cordillera de la Costa y los sectores más bajos de la Pre cordillera.

En la Cordillera de los Andes por sobre los 1.500 m de altura se desarrolló el clima frío de altura con abundantes precipitaciones, más de 2.000 mm anuales, y las bajas temperaturas que permiten la presencia de nieves permanentes en las alturas de la cordillera.

6.1.2. Hidrografía

Los ríos de la región presentan un régimen pluvionivoso, registrándose el caudal mínimo entre enero y abril.

La región del Biobío presenta dos grandes hoyas hidrográficas; la del río Itata y la del río Biobío ambos nacidos en la cordillera de los Andes.

La hoya hidrográfica del río Itata alcanza una superficie de 11.100 km² y está formada por dos cursos principales de agua: los ríos Ñuble e Itata. Posee una longitud de 180 km incluyendo dos ríos formativos, el Cholguán y Huépil. Su régimen es mixto, ya que los principales afluentes nacen en la Cordillera y Pre cordillera de los Andes adquiriendo su aporte de los deshielos primaverales, además del aporte hecho por las precipitaciones

invernales. Este río cruza el Valle Longitudinal, y en su entrada presenta un gran salto de agua que muestra el desnivel del terreno.

En su parte inferior, su principal afluente es el río Lonquén, que drena el sector cordillerano costero norte. En total el río riega una superficie de más de 100.000 ha de suelos agrícolas y su caudal medio en la desembocadura es de $140\text{m}^3/\text{seg}$.

La gran característica del río Biobío es que posee una de las cuencas más extensas del país con 24.029 km^2 ; es de régimen mixto con crecidas en invierno-primavera y su longitud alcanza a los 380 km. Nace en la Cordillera de los Andes en la región de la Araucanía, siendo el desaguadero de dos lagos cordilleranos: Icalma y Galletué. En su curso medio recibe el aporte de los ríos Duqueco y Bureo.

En el paso por el Valle Longitudinal, el río Biobío cambia de curso al encontrarse con la Cordillera de la Costa y en la confluencia con el río Vergara vuelve a su curso normal. En la costa el río recibe al río Laja, su mayor afluente con un caudal medio de $173\text{m}^3/\text{seg}$. y desemboca en el río Biobío. En el curso inferior, desde la ciudad de Concepción, el río cambia de dirección para desembocar en el mar al sur de los cerros de Hualpén. Las dos grandes hoyas hidrográficas son las de los ríos Biobío y el Laja, los cuales permiten cubrir con riego una superficie de 100.000 ha de terrenos cultivables, además las aguas de estos ríos son utilizadas para la generación de energía por medio de las centrales Abanico de 136.000 kW de potencia, Central El Toro de 400.000 kW, Central Antuco con 300.000 kW; y para el uso humano de las grandes ciudades de la región. Además, existen hoyas hidrográficas menores como la del río Andalién que posee una superficie de 780 km^2 con un caudal de $10\text{m}^3/\text{seg}$.

Las costas de la VIII región son poco homogéneas y presentan significativos accidentes: la bahía de Concepción, la península de Tumbes, que cobija el puerto de Talcahuano, la bahía de San Vicente, la desembocadura del río Biobío, la bahía de Arauco, que culmina en la punta de Lavapié, y las islas Quiriquina, Santa María y Mocha. Las planicies litorales alcanzan su mayor extensión al sur del río Biobío (Arauco, Cañete).

6.1.3. Relieve

Desde el punto de vista morfológico, en la VIII región se distinguen las unidades tradicionales del relieve chileno como son la Cordillera de los Andes, Depresión Intermedia, Cordillera de la Costa y Planicies Litorales.

La Cordillera de los Andes se presenta más baja con características de cordones montañosos, con alturas promedio de 2.000 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Destacan algunas cimas que corresponden a conos volcánicos, tales como Chillán (3.212 metros), Antuco (2.985 m), Copahue (2.965 m) y Callaquén (3.164 m).

Otras cimas importantes son la Sierra Velluda, de 3.585 m, y de menor altura la Cordillera de Polcura. La cordillera adquiere gran relevancia como fuente acumuladora de nieve que alimenta a importantes cursos fluviales, como el Biobío, Laja, Polcura y Ñuble.

La unión entre la cordillera de los Andes y los Valles Longitudinales se hace a través de la llamada Pre cordillera o "La Montaña" cuya altura fluctúa entre los 400 y 600 m.s.n.m., angostándose hacia el Sur.

Los Valles Longitudinales se caracterizan por tener una topografía uniforme y se desarrollan desde el pie occidental de la precordillera, hasta hacer contacto con la Cordillera de la Costa. Se presenta como una llanura; que se torna más ondulada al sur del río Biobío, alcanzando su mayor anchura en el eje del río Laja, aproximadamente 60 km.

La Cordillera de la Costa muestra grandes diferencias al Norte y al Sur del río Biobío presentando dos sectores cordilleranos: mientras al Norte se presenta baja y ondulada, altura promedio inferior a 400 m y con cuencas interiores como la de Quirihue, al sur el cambio se da en la cordillera de Nahuelbuta que se levanta como un macizo imponente de más de 1.500 m.s.n.m. que se extiende desde el río Biobío por el norte hasta el río Imperial por el sur.

Estas características de la cordillera costera generan grandes diferencias climáticas entre el oriente y occidente del macizo costero, además de ser un obstáculo para las comunicaciones entre las localidades regionales.

Las Planicies Costeras o litorales tienen especial importancia y se presentan homogéneas, caracterizadas por planos costeros o terrazas. Pueden alcanzar hasta 60 km de anchura entre la cordillera de la Costa y el mar de Chile. Desde el límite regional norte hasta la desembocadura del río Andalién presenta un escaso desarrollo. En la desembocadura del río Biobío se presenta como una llanura inundable. Al sur de este río ha influido notoriamente en la morfología litoral.

En la zona del golfo de Arauco el ancho de las terrazas marinas alcanza los 35 km. Hay que destacar la existencia de lagos de contacto entre el faldeo occidental de Nahuelbuta y la llanura arenosa, estos lagos son Lanalhue y Lleulleu.

6.2. Variables de Estudio y Descripción de Datos

Las variables que se estudiaron en esta investigación están expresadas en un tiempo t y en una posición (x, y) donde x es la longitud e y la latitud. Las variables en estudio son las siguientes:

1. **Temperatura Superficial Terrestre** ($TST(x, y, t)$): Para describir y cuantificar los patrones superficiales, se utilizaron imágenes satelitales con promedios mensuales de TST (°C) con una resolución espacial de 1x1 km, las que abarcaran entre Abril del año 2000 y Abril del año 2010, donde las imágenes provienen del satélite Terra y Aqua.
2. **Índice de Humedad de Vegetación** ($NDVI(x, y, t)$): Para esta variable se consideraron datos a partir de abril del año 2000 a abril del año 2010, es decir 121 imágenes, cuya resolución espacial es de 250 metros y resolución temporal cada 15 días.

Las matrices de estudio fueron descritas de la siguiente forma:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1(1) & Y_1(2) & \dots & Y_1(N) \\ Y_2(1) & Y_2(2) & \dots & Y_2(N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_M(1) & Y_M(2) & \dots & Y_M(N) \end{bmatrix}_{M \times N}$$

Donde $\{Y_1(t), Y_2(t), \dots, Y_M(t)\}$ son las posiciones espaciales, con M = dimensión espacial (longitud×latitud) y $\{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ son las posiciones temporales, con N =dimensión temporal (número de meses según la variable en estudio).

6.3. Metodología Aplicada

La metodología Aplicada a la secuencia de imágenes satelitales de las variables anteriormente descritas fue la siguiente:

- Recopilación de base de datos satelitales (TST, NDVI).
- Programación mediante el software MATLAB (versión 2009 b), de tópicos descritos en el marco teórico de este informe, debido a la gran información recopilada.
- Diseño de sentencia que extrajo el área de estudio.
- Recuperación de datos faltantes mediante Interpolación Spline Cúbica.
- Análisis de las variables en la Escala Anual.
- Aplicar Análisis Armónico para extraer la estacionalidad de las series en estudio.
- Utilización de la Transformada Wavelet Continua para estudiar el comportamiento estacional e interanual de la serie de tiempo, para puntos específicos de la zona de estudio.
- Correlacionar las señales de las variables TST y NDVI, para ver las diferencias en su comportamiento mediante análisis de Transformada Wavelet Cruzada.

7. Resultados y Discusión

A continuación se presentan los resultados y discusiones, obtenidos mediante la metodología de esta investigación.

7.1. Recopilación de información Básica de Datos Satelitales

El resumen de la información básica de los Datos satelitales asociada a las variables en estudio es la siguiente:

	Período	Res. espacial	Res. temporal
TST	2000 – 2010	1x1 km	30 días
NDVI	2000 – 2010	250 m	15 días

7.2. Programación con software Matlab 7.9.0 (R2009b)

Se adquirieron los conocimientos necesarios para programar a través de software Matlab 7.9.0 versión R2009b y aplicarlo en esta investigación:

- Extraer área de estudio.
- Explorar las tendencias espaciales y temporales.
- Determinar un método para la Interpolación de datos Faltantes.
- Graficar las series de tiempo.
- Aplicación de análisis estadísticos a las variables meteorológicas.

7.3. Interpolado de Matrices

De acuerdo al análisis de imputación de datos, a lo informado en sección 7.1 (variables poseen resoluciones distintas, por lo tanto, dominios espaciales (número de posiciones para los ejes de latitud y longitud) distintos en términos de cardinalidad) las variables TST y NDVI se dejaron en el mismo dominio espacial.

El procedimiento utilizado es conocido como Grillado o Interpolado de matrices. Como se sabe, cada imagen satelital se puede expresar como una matriz que representa un tiempo (mes), donde sus filas estarían asociadas a las latitudes y sus columnas a las longitudes.

Luego se expande la matriz según las dimensiones requeridas o asociadas a la matriz más grande, en nuestro caso, la matriz que contiene a las imágenes satelitales de la TST, que es la variable con mayor resolución. Por último las posiciones nuevas se recuperaron o reemplazaron mediante Interpolación Spline Cúbica.

7.4. Análisis de las Variables en la Escala Anual

7.4.1. Extracción de Series

Con el fin de realizar los análisis propuestos, se extrajeron diez series temporales asociadas a cada variable en estudio, las que cubren la totalidad del dominio de tiempo. La metodología de extracción se basó en tomar muestras aleatorias de las zonas de interés, las cuales son: costa, valle central y precordillera, donde se tomaron 4, 3 y 3 series respectivamente de cada área antes mencionada.

A cada una de las series extraídas se les realizó un análisis de Transformada Wavelet Continua, con el fin de recalcar intervalos de tiempo en los cuales se ven mayores fluctuaciones relacionadas a algún evento en específico y también un análisis con el método Transformada Wavelet Cruzada, para profundizar las relaciones entre los pares de variables, especificar el dominio de tiempo en que se destacan y el comportamiento que adoptaron en dichos tiempos (fase o desfase).

7.4.2. Transformada Wavelet Continua series TST

7.4.2.1. Transformada Wavelet Continua de series TST – Zona Costera

Para la aplicación del análisis de Wavelet se extrajeron 4 series temporales de TST de Zona Costera, donde cada serie contiene 121 datos.

En las siguientes figuras se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Las figuras 6, 7, 8 y 9 muestran una marcada banda de alta potencia espectral ($\sim 16[^\circ C]^2$), asociada claramente a la señal estacional que cubre el tiempo total de estudio. Esta banda está en torno al período de un año.

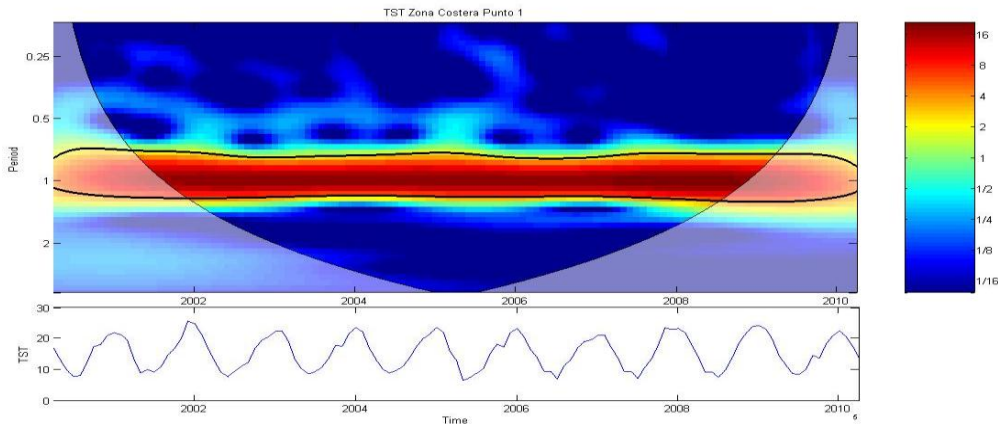


Figura 6. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Costera (Punto 1)

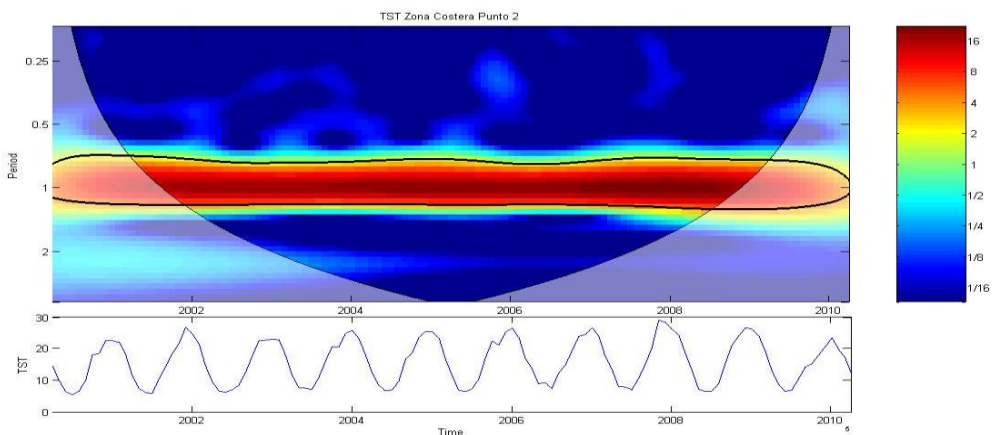


Figura 7. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Costera (Punto 2)

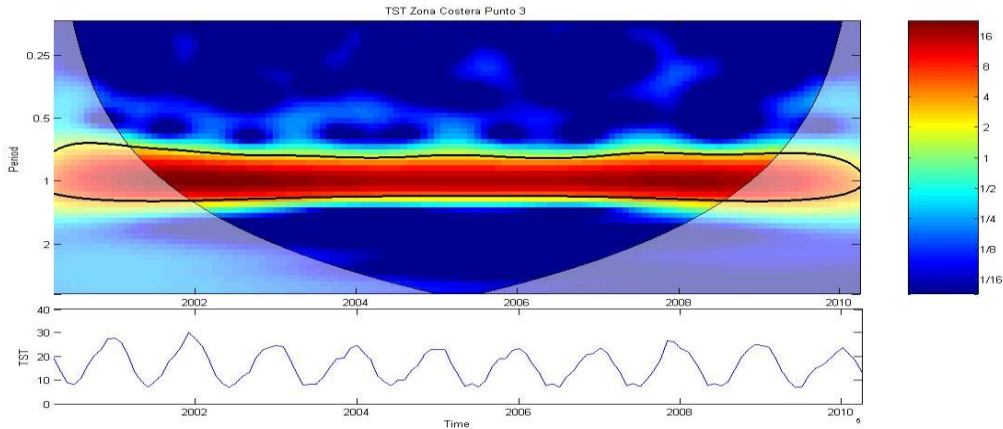


Figura 8. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Costera (Punto 3)

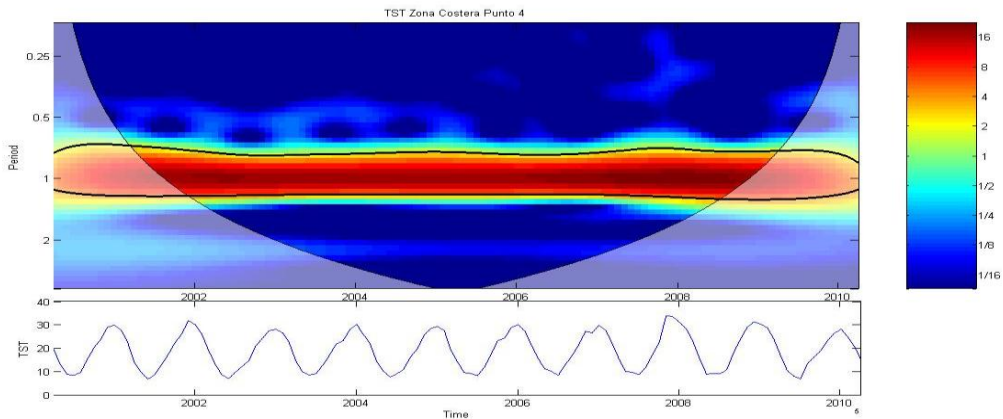


Figura 9. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Costera (Punto 4)

7.4.2.2. Transformada Wavelet Continua series TST – Zona Valle Central

Para la aplicación del análisis de Wavelet se extrajeron 3 series temporales de TST de Zona Valle Central, donde cada serie contiene 121 datos.

En las siguientes figuras se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Las figuras 10, 11 y 12, muestran una marcada banda de alta potencia espectral ($\sim 16[^\circ\text{C}]^2$), asociada claramente a la señal estacional que cubre el tiempo total de estudio. Esta banda está en torno al período de un año.

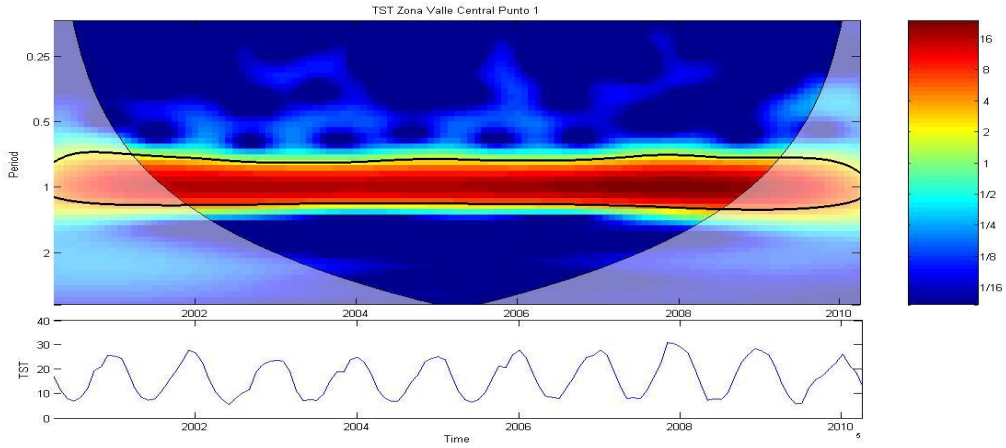


Figura 10. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Valle Central (Punto 1)

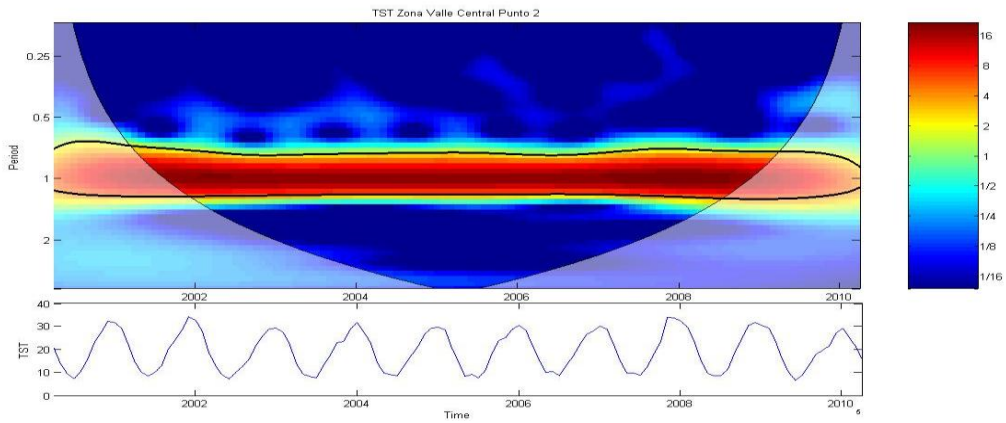


Figura 11. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Valle Central (Punto 2)

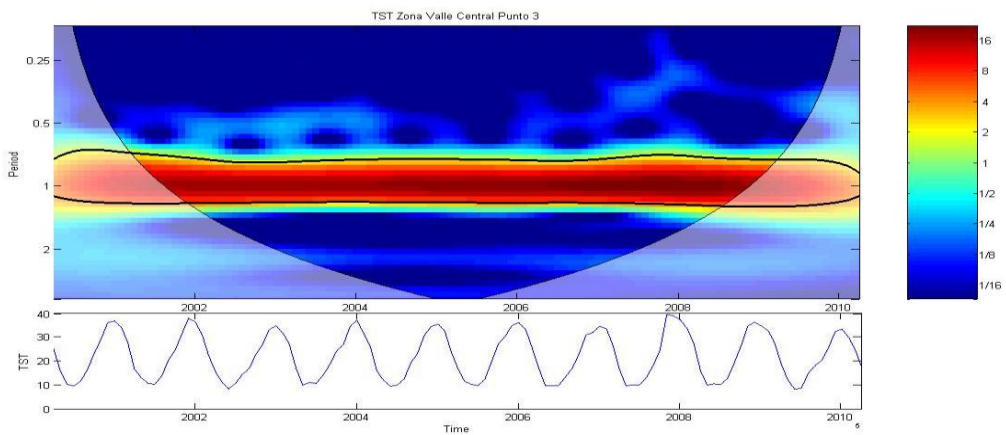


Figura 12. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Valle Central (Punto 3)

7.4.2.3. Transformada Wavelet Continua series TST – Zona Precordillerana

Para la aplicación del análisis de Wavelet se extrajeron 3 series temporales de TST de Zona Precordillerana, donde cada serie contiene 121 datos.

En las siguientes figuras se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Las figuras 13, 14 y 15, muestran una marcada banda de alta potencia espectral ($\sim 16[^\circ\text{C}]^2$), asociada claramente a la señal estacional que cubre el tiempo total de estudio. Esta banda está en torno al período de un año.

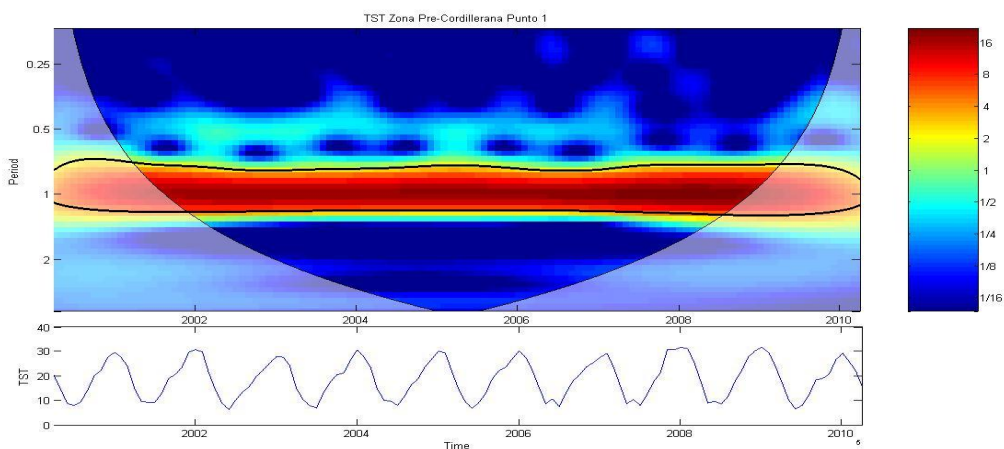


Figura 13. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Precordillerana (Punto 1)

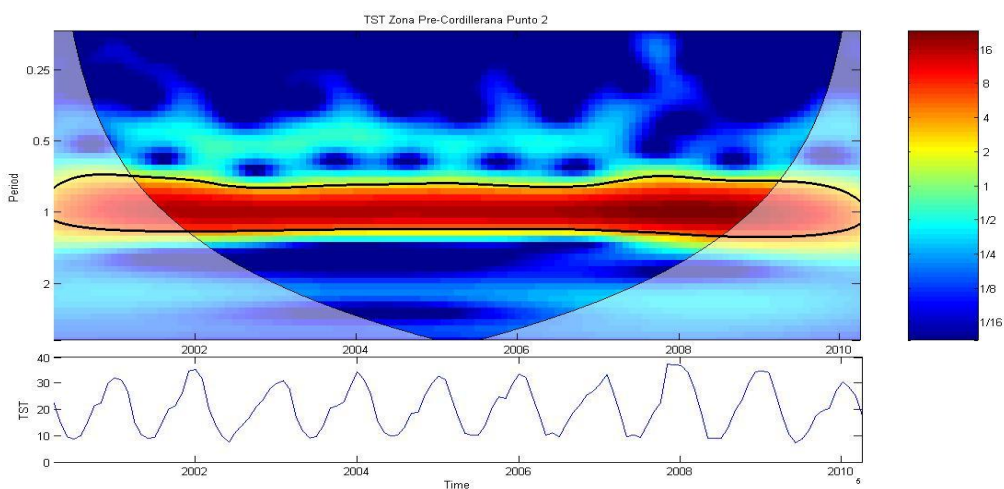


Figura 14. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Precordillerana (Punto 2)

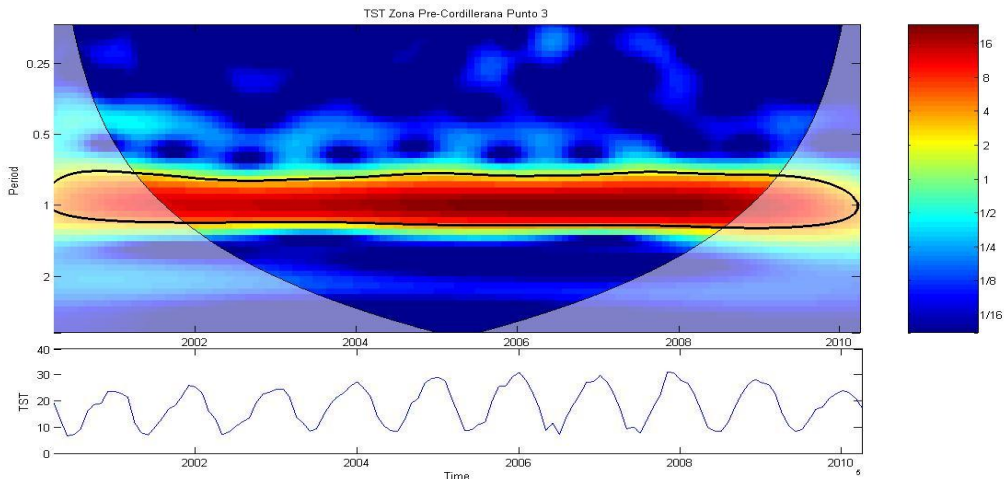


Figura 15. Transformada Wavelet Continua TST – Zona Precordillerana (Punto 3)

En síntesis, para el análisis Transformada Wavelet Continua de las series extraídas de TST para todas las zonas en estudio (Costa, Valle Central y Pre-cordillera), podemos destacar que todas muestran una marcada banda de alta potencia espectral ($\sim 16[^\circ C]^2$), asociada claramente a la señal estacional que cubre la totalidad del dominio de tiempo en estudio, la cual esta en torno al período de un año.

7.4.3. Transformada Wavelet Continua series NDVI

7.4.3.1. Transformada Wavelet Continua series NDVI – Zona Costera

Para la aplicación del análisis de Wavelet se extrajeron 4 series temporales de NDVI de Zona Costera, donde cada serie contiene 121 datos.

En la figura 16, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un marcado núcleo de alta potencia espectral ($\sim 8[r. h.]^2$) que cubre el dominio de tiempo de a fines del año 2006 a fines del año 2007 con periodo de 1 año. Además, hay otros 4 núcleos con periodos de 1 a 4 meses para los dominios de tiempo asociados a fines de los años 2002, 2003, 2006 y 2008.

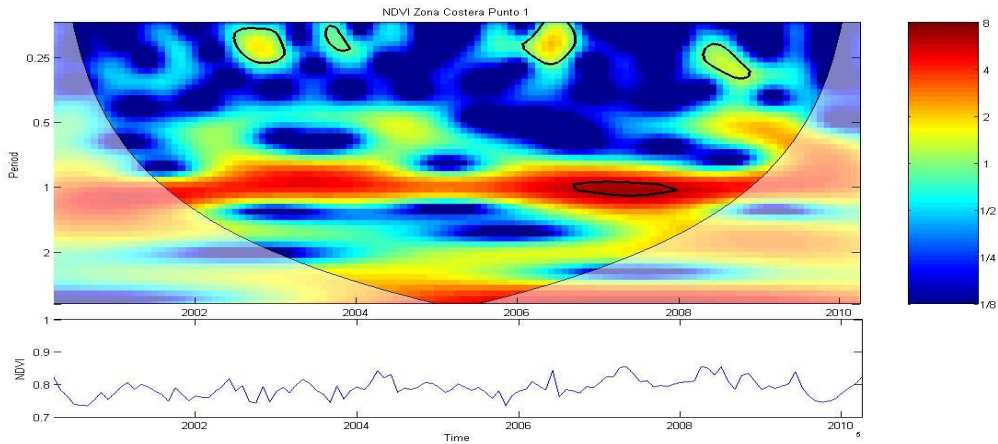


Figura 16. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Costera (Punto 1)

En la figura 17, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra una marcada banda de mediana potencia espectral ($\sim 2[r.h.]^2$), asociada posiblemente a la señal estacional que cubre el tiempo de estudio 2001 - 2009. Esta banda está en torno al período de un año. Además hay otro núcleo con periodos de 2 a 5 meses correspondiente al tiempo de a mediados del año 2009. Esta señal posiblemente esté asociada a fenómenos de escalas interanuales.

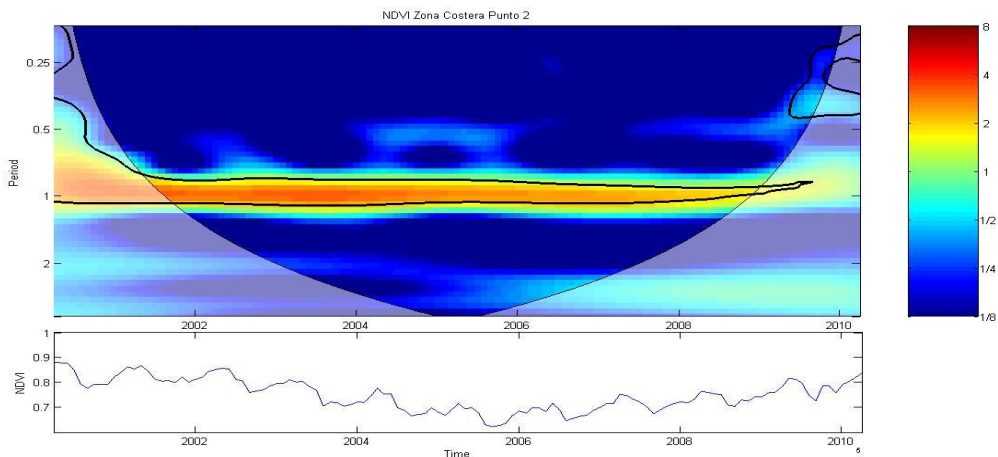


Figura 17. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Costera (Punto 2)

En la figura 18 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un marcado núcleo de mediana potencia espectral ($\sim 2[r.h.]^2$) que cubre el dominio de tiempo entre los años 2001-2002 con periodos de 6 meses. Además hay otros núcleos (~ 4) con periodos de 1 a 6 meses para los dominios de tiempo asociados a los años 2000, 2006, 2008 y 2009.

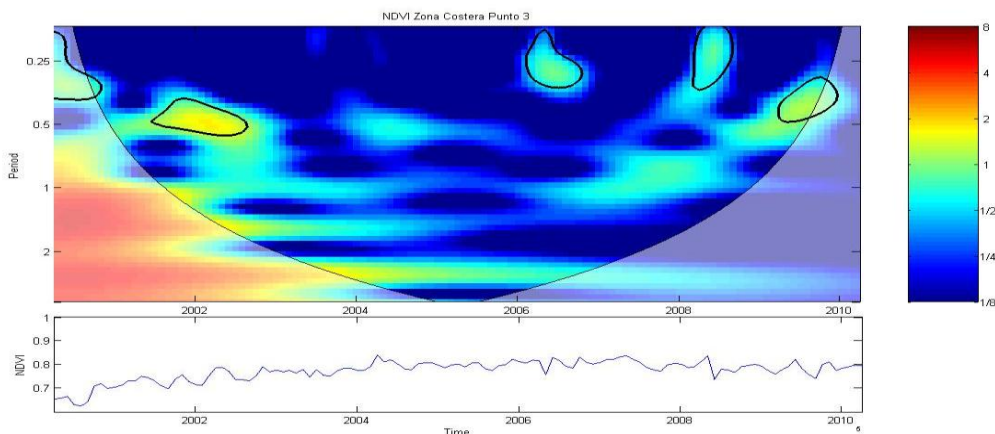


Figura 18. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Costera (Punto 3)

Para la figura 19 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra una marcada banda de alta potencia espectral ($\sim 8[r.h.]^2$), asociada posiblemente a la señal estacional que cubre el tiempo de estudio 2001 - 2009. Esta banda está en torno al periodo de 6 a 12 meses que cubre el dominio de tiempo de 2001 al 2009. Además, hay otros 5 núcleos con periodos de 4 a 9 meses y de 1 a 3 meses para los dominios de tiempo entre los años 2001, 2003, 2004 y 2007 a 2008. Esta señal posiblemente esté asociada a fenómenos de escalas interanuales.

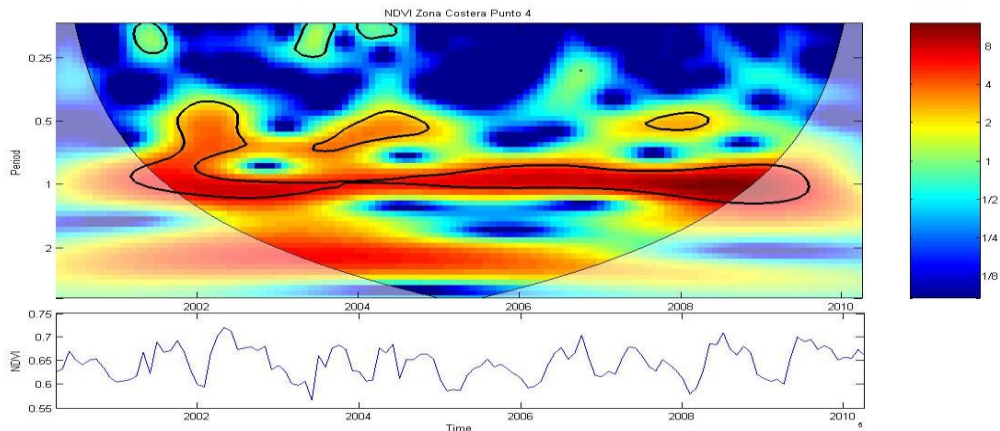


Figura 19. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Costera (Punto 4)

En síntesis, según el análisis de Transformada Wavelet Continua, para las series extraídas de NDVI Zona Costera, se destaca una importante banda de alta potencia espectral (8), que cubre los años 2000 – 2009 con periodos de un año y otra banda con menor potencia espectral (2) que cubre periodos de 6 meses. Además, existe un núcleo de alta potencia espectral (8) que asume una duración de un año para el año 2007 y otros núcleos con menor potencia espectral con duraciones que van desde 1 a 7 meses, pero que nunca superan el año. Para este conjunto de series, no se puede tomar un comportamiento generalmente estacional debido al comportamiento irregular de estas mismas.

7.4.3.2. Transformada Wavelet Continua series NDVI – Zona Valle Central

Para la aplicación del análisis de Wavelet se extrajeron 3 series temporales de NDVI de la Zona Valle Central, donde cada serie contiene 121 datos.

En la figura 20 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un marcado núcleo de alta potencia espectral ($\sim 8[r.h.]^2$) que cubre el dominio de tiempo 2007 – 2008 con periodo de 1 año. Además, hay otros núcleos (~ 6) de más baja potencia espectral de periodos de 1 a 6 meses para los dominios de tiempo asociados a los años 2000, 2001, 2002, 2008 y 2009.

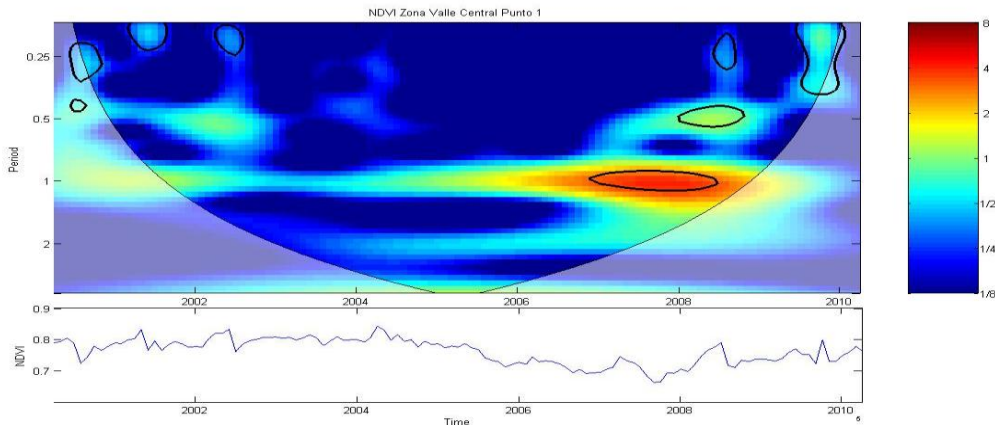


Figura 20. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Valle Central (Punto 1)

En la figura 21 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un marcado núcleo de alta potencia espectral ($\sim 8[r.h.]^2$) que cubre el dominio de tiempo 2001 – 2002 y con periodo de 6 meses. Además, hay otros 2 núcleos con periodos de 1 a 3 meses y 6 meses para los dominios de tiempo asociados a los años 2003, 2003 – 2004.

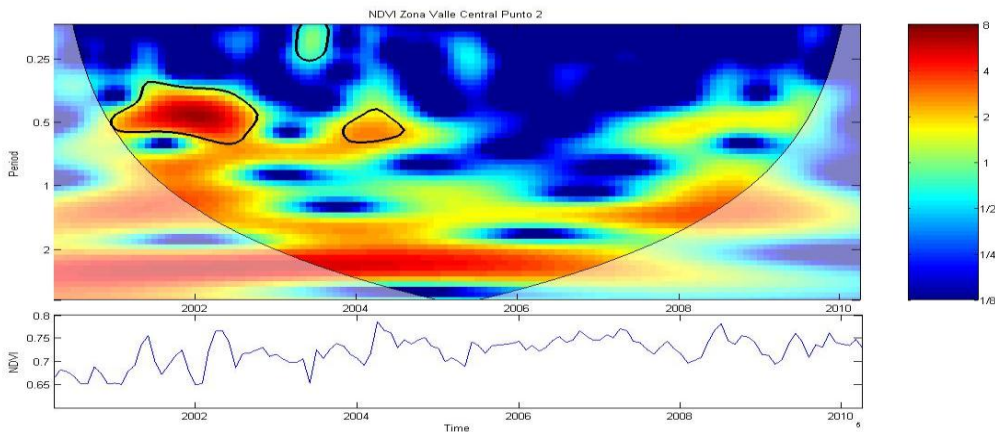


Figura 21. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Valle Central (Punto 2)

En la figura 22 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodos. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra una marcada banda de alta potencia espectral ($\sim 16[r.h.]^2$), asociada claramente a la señal estacional que cubre el tiempo de estudio. Esta banda está en torno al período de 1 año. Además, hay otros 2 núcleos con periodos de 5 a 7 meses y de 2 a 3 meses para los dominios de tiempo de los años 2002 y 2008. Esta señal posiblemente esté asociada a fenómenos de escalas interanuales.

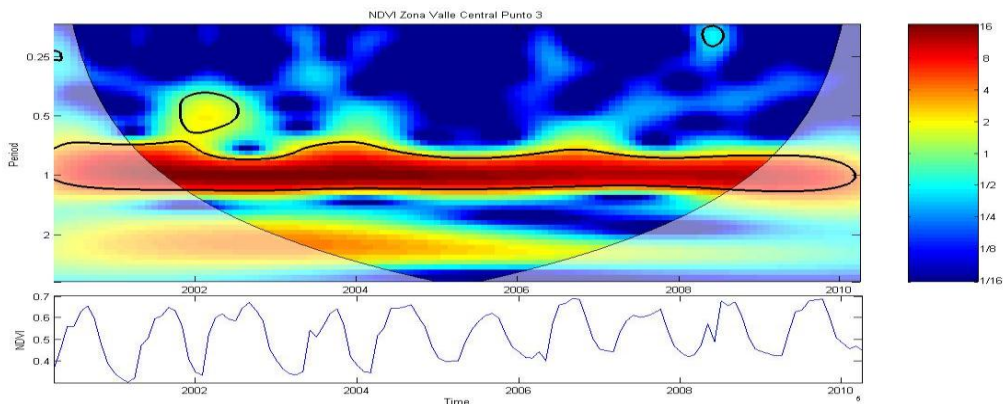


Figura 22. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Valle Central (Punto 3)

En síntesis, según el análisis de Transformada Wavelet Continua, para las series extraídas de NDVI Zona Valle Central, se destaca una importante banda de alta potencia espectral ($16[r.h.]^2$), que cubre los años 2000 – 2009 con periodos de un año. Además, existe 1 núcleo de alta potencia espectral ($8[r.h.]^2$) que asume una duración de 1 año para los años 2007-2008 y de 6 meses para el tiempo correspondiente a los años 2001 – 2002. Existen otros núcleos con menor potencia espectral con periodos que van desde 1 a 6 meses, pero que nunca superan el año. Para este conjunto de series, no se puede afirmar un comportamiento general estacional.

7.4.3.3. Transformada Wavelet Continua series NDVI – Zona Precordillerana

Para la aplicación del análisis de Wavelet se extrajeron 3 series temporales de NDVI de la Zona Valle Central, donde cada serie contiene 121 datos.

En la figura 23 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra una marcada banda de alta potencia espectral ($\sim 16[r.h.]^2$), asociada claramente a la señal estacional que cubre el tiempo de estudio 2001 - 2009. Esta banda está en torno al período de 1 año. Además, hay otra banda con periodo de 6 meses durante los años 2001 – 2005 y 3 núcleos con periodos de 2 meses y de 4 a 7 meses para los dominios de tiempo de los años 2007 - 2008 y 2009. Esta señal posiblemente esté asociada a fenómenos de escalas interanuales.

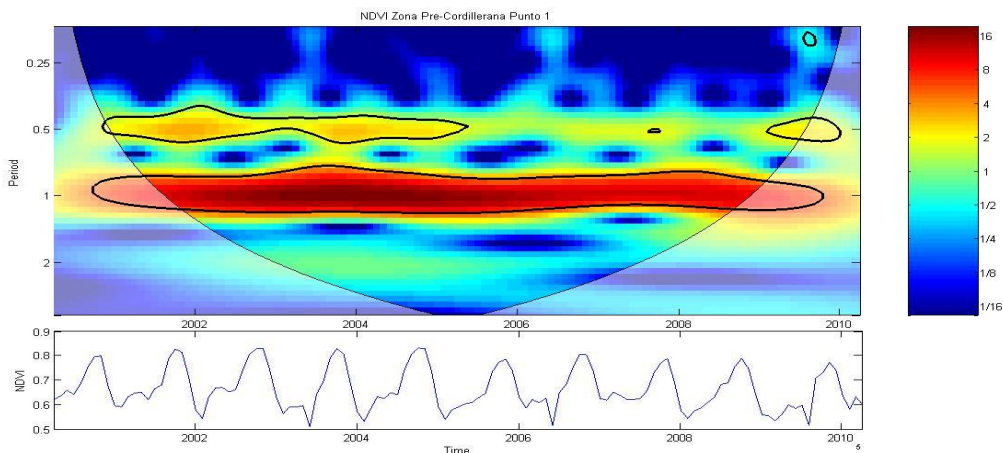


Figura 23. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Precordillerana (Punto 1)

En la figura 24 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra una marcada banda de alta potencia espectral ($\sim 16[r.h.]^2$), asociada claramente a la señal estacional que cubre el tiempo de estudio 2001 - 2009. Esta banda está en torno al período de 1 año. Además, hay otras 2 bandas con periodos de 6 meses durante los años 2001-2004 y 2007-2009. Esta señal posiblemente esté asociada a fenómenos de escalas interanuales.

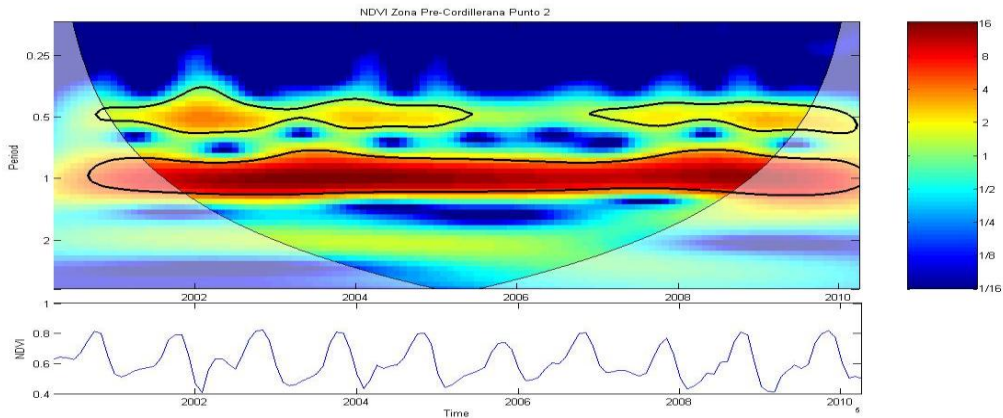


Figura 24. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Pre cordillerana (Punto 2)

En la figura 25 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra una marcada banda de mediana potencia espectral ($\sim 3[r.h.]^2$), con periodo de 1 año asociada claramente a la señal estacional que cubre el tiempo de estudio 2002 – 2009 y una banda de menor potencia espectral con periodo de 6 meses correspondiente a los años 2007 - 2009. Además, hay 1 núcleo con periodo de 1 a 4 meses para el dominio de tiempo de mediados del 2003. Esta señal posiblemente esté asociada a fenómenos de escalas interanuales.

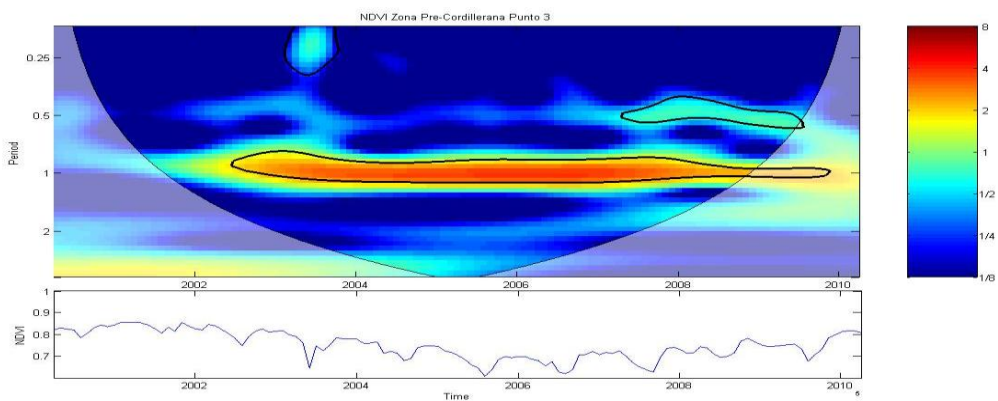


Figura 25. Transformada Wavelet Continua NDVI – Zona Pre cordillerana (Punto 3)

En síntesis, según el análisis de Transformada Wavelet Continua, para las series extraídas de NDVI Zona Precoordinerana, se destacan importantes bandas de alta potencia espectral ($16[r. h.]^2$), que cubren los años 2000 – 2009 con periodos de un año y otras bandas con menor potencia espectral ($3[r. h.]^2$) que cubren periodos de 6 meses. Además, existen otros núcleos de menor potencia espectral que asumen una duración de 1 a 4 meses y de 4 a 7 meses, pero que nunca superan el año. Para este conjunto de series extraídas, no se puede revelar un comportamiento generalmente estacional.

7.4.4. Transformada Wavelet Cruzada Series TST y NDVI en Escala Anual

En esta sección se aplicara la metodología de la Transformada Wavelet Cruzada, sobre las series de tiempo extraídas de cada zona en estudio. El fin de este análisis es evaluar la relación entre pares de series (fase o desfase), visualizar el periodo de tiempo-frecuencia en que la relación es importante en términos de potencia espectral y el posible dominio o influencia de una variable sobre la otra.

7.4.4.1. Transformada Wavelet Cruzada Series TST y NDVI – Zona Costera

En la figura 26 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra una marcada banda de alta potencia espectral, asociada claramente a la relación estacional entre las dos variables, ya que esta banda está en torno al período de un año y recorre todo el dominio del tiempo. Además se observa que las dos variables presentan una relación de desfase entre ellas, donde se identifica una dominación del NDVI sobre la TST, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa, con respecto al eje coordinado del tiempo y del periodo. Además, hay un núcleo de menor potencia espectral, que posee un periodo de 1 a 2 meses, a mediados del año 2006, donde se destaca la relación de fase entre las variables y se identifica una dominación de la TST sobre el NDVI, ya que el ángulo de fase posee una dirección positiva, con respecto al eje coordinado del tiempo y del periodo.

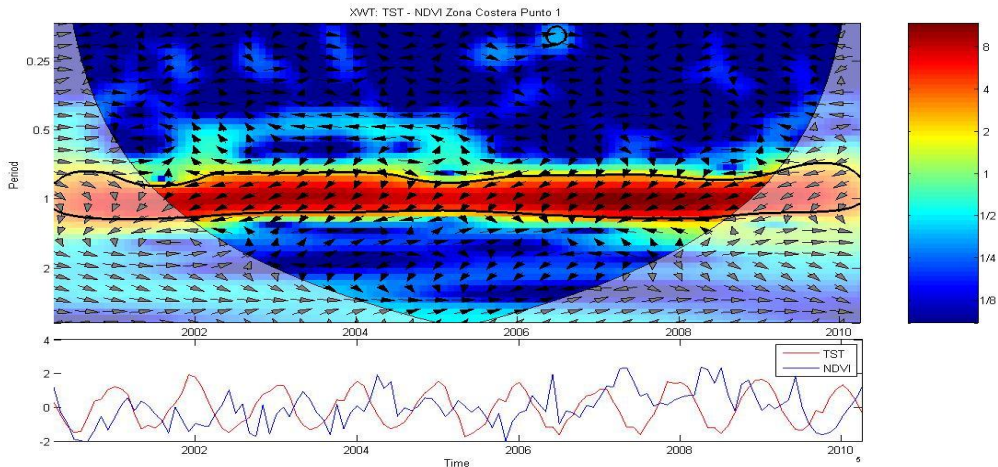


Figura 26. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Costera (Punto 1)

En la figura 27 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra una marcada banda de alta potencia espectral, asociada claramente a la relación estacional entre las dos variables, ya que esta banda está en torno al período de un año y recorre todo el dominio del tiempo. Además se observa que las dos variables presentan una relación de desfase entre ellas, donde se identifica una dominación del NDVI sobre la TST, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa, con respecto al eje coordenado del tiempo y del periodo.

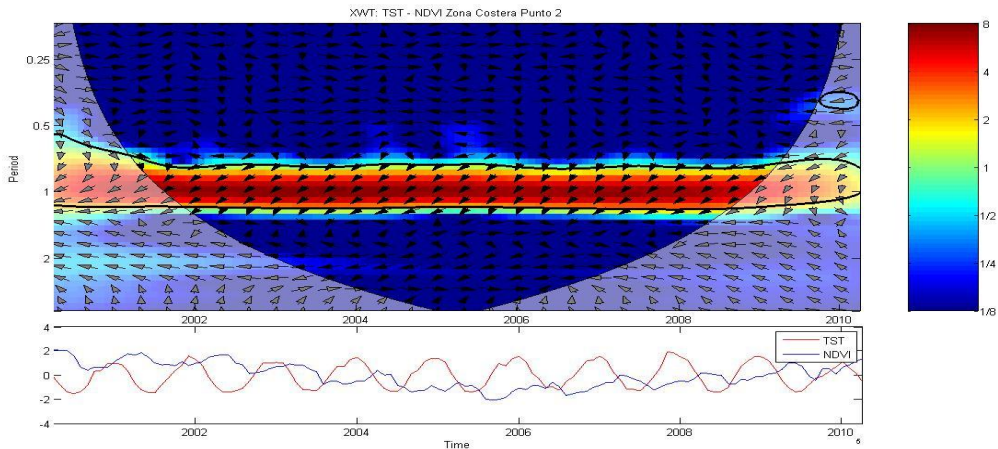


Figura 27. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Costera (Punto 2)

En la figura 28 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra dos marcadas bandas de mediana potencia espectral, asociadas a los tiempos de los años 2001-2004 y 2006-2009, con períodos de un año. Además se observa que en la primera banda las variables presentan una relación de fase en el año 2003 y de desfase en el año 2002 y 2004 y en la segunda banda presenta una relación de fase en los años 2006 y 2008 y de desfase en el año 2007. Pero en la totalidad de dominio de tiempo en las que se encuentran las 2 bandas la variable NDVI domina a la TST. También se aprecia un núcleo de mas baja potencia espectral con periodos de 4 a 5 meses para fines del año 2009, en donde la relación existente entre ambas variables es de desfase, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa, con respecto al eje coordenado del tiempo y del periodo.

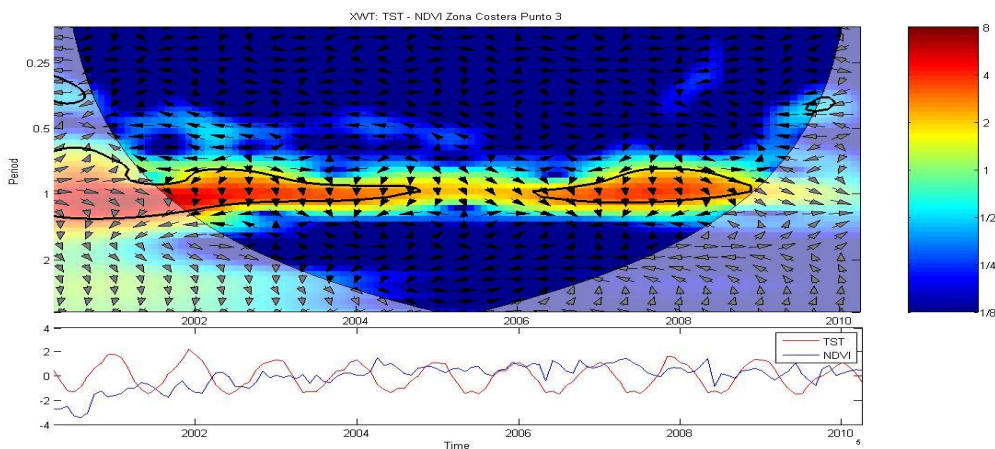


Figura 28. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Costera (Punto 3)

En la figura 29 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra una marcada banda de alta potencia espectral, asociada claramente a la relación estacional entre las dos variables, ya que esta banda está en torno al período de un año y recorre todo el dominio del tiempo. Además se observa que las dos variables presentan una relación de desfase entre ellas, donde se identifica una dominación de la TST sobre el NDVI, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa con respecto al eje coordenado del tiempo y una dirección positiva con respecto al eje coordenado del periodo.

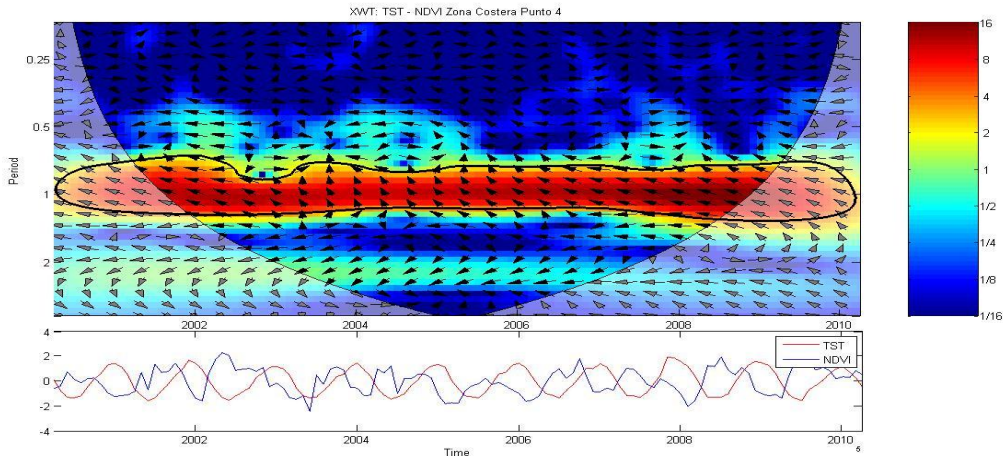


Figura 29. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Costera (Punto 4)

En síntesis, la relación existente entre las series de TST y NDVI, asociadas a las posiciones en estudio de Zona Costera, evidencia que dicha asociación es generalmente valida a nivel estacional, ya que se encuentra alrededor de 1 año en términos de periodo, donde predomina el comportamiento en conjunto de desfase entre las variables y se evidencia generalmente la dominación de el NDVI sobre la TST.

7.4.4.2. Transformada Wavelet Cruzada de Series TST y NDVI – Zona Valle Central

En la figura 30 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Esta figura muestra una marcada banda de mediana potencia espectral, asociada claramente a la relación estacional entre las dos variables, ya que esta banda está en torno al período de un año y recorre el dominio del tiempo año 2001 - 2009, presentando su mas alta potencia espectral entre los años 2007 – 2009. Además se observa que las dos variables presentan una relación de desfase entre ellas, donde se identifica una dominación del NDVI sobre la TST, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa, con respecto al eje coordenado del tiempo y del periodo.

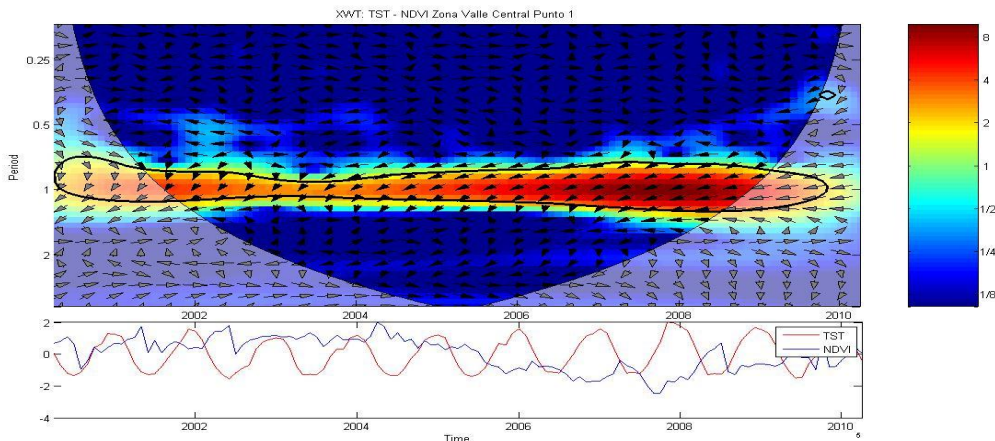


Figura 30. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Valle Central (Punto 1)

En la figura 31 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra dos marcadas bandas de alta potencia espectral, asociadas a los tiempos 2001-2006 y 2007-2009, con períodos de un año. Además se observa que en ambas bandas las variables presentan una relación de desfase, pero en la mayoría de dominio de tiempo en las que se encuentran las 2 bandas la variable TST domina al NDVI. También se aprecia un núcleo de más baja potencia espectral con periodo de 5 a 7 meses entre los años 2001 – 2002, en donde se destaca la relación de desfase existente entre ambas variables, donde se identifica una dominación de la TST sobre el NDVI, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa, con respecto al eje coordinado del tiempo y una dirección levemente positiva con respecto al eje coordinado del periodo.

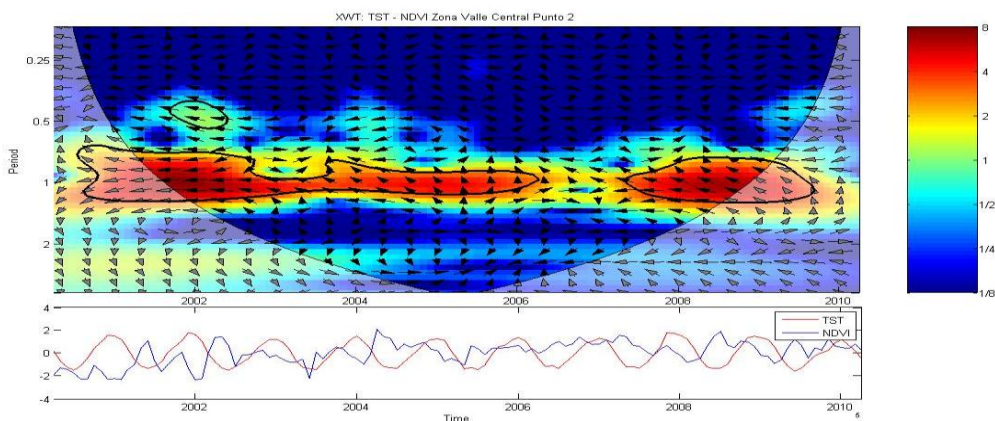


Figura 31. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Valle Central (Punto 2)

En la figura 32 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra una marcada banda de alta potencia espectral, asociada claramente a la relación estacional entre las dos variables, ya que esta banda está en torno al período de un año y recorre todo el dominio del tiempo. Además se observa que las dos variables presentan una relación de desfase entre ellas, donde se identifica una dominación de la TST sobre el NDVI, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa con respecto al eje coordenado del tiempo y una dirección positiva con respecto al eje coordenado del periodo.

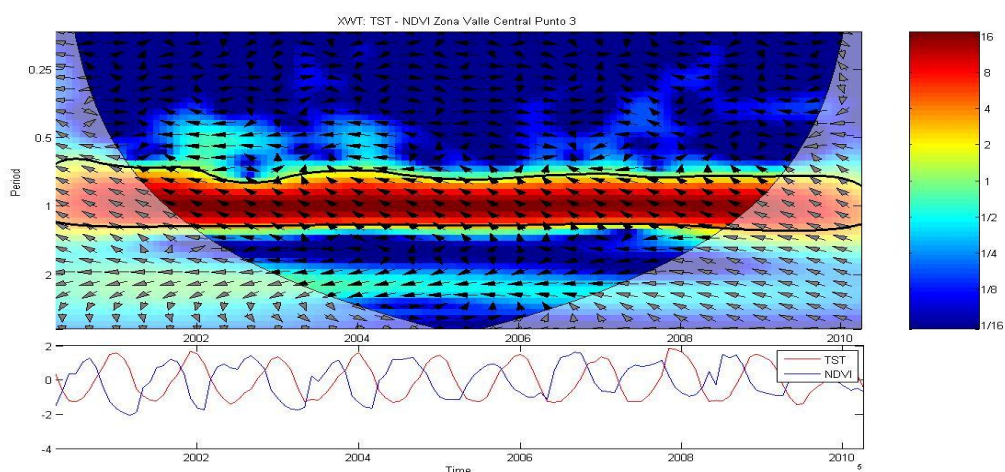


Figura 32. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Valle Central (Punto 3)

En síntesis, la relación existente entre las series de TST y NDVI, asociadas a las posiciones en estudio de Zona Valle Central, evidencia que dicha asociación es generalmente valida a nivel estacional, ya que se encuentra alrededor de 1 año en términos de periodo. Además, predomina el comportamiento en conjunto de desfase entre las variables y se evidencia generalmente la dominación de la TST sobre el NDVI.

7.4.4.3. Transformada Wavelet Cruzada de Series TST y NDVI – Zona Precordillerana

En la figura 33 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra una marcada banda de alta potencia espectral, asociada claramente a la relación estacional entre las dos variables, ya que esta banda está en torno al período de un año y recorre todo el dominio del tiempo. Además se observa que las variables presentan generalmente una relación de fase y en la totalidad de dominio de tiempo la variable TST domina al NDVI ya que el ángulo de fase posee una dirección positiva, con respecto al eje coordenado del tiempo como del periodo. También se aprecia una banda en el periodo de tiempo entre los años 2001-2004 y un núcleo en el periodo de tiempo de a principios del año 2005, ambos, de más baja potencia espectral con periodos de 6 meses y en donde se destaca la relación de desfase existente entre ambas variables, dominando la variable NDVI sobre la TST, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa, con respecto al eje coordenado del tiempo como del periodo.

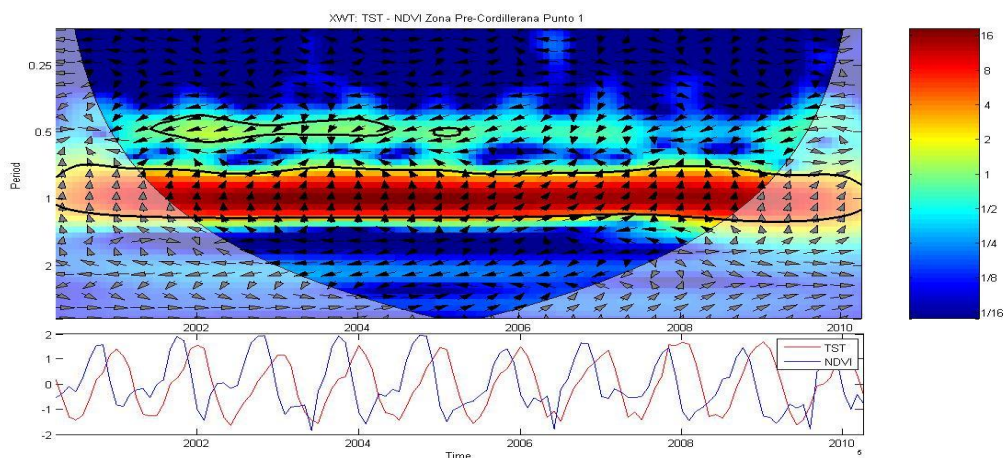


Figura 33. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Precordillerana (Punto 1)

En la figura 34 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra una marcada banda de alta potencia espectral, asociada claramente a la relación estacional entre las dos variables, ya que esta banda

está en torno al período de un año y recorre todo el dominio del tiempo. Además se observa que las variables presentan generalmente una relación de fase y en la totalidad de dominio de tiempo la variable TST domina al NDVI ya que el ángulo de fase posee una dirección positiva, con respecto al eje coordenado del tiempo como del periodo. También se aprecia una banda en el periodo de tiempo entre los años 2001 – 2005 y un núcleo en el periodo de tiempo de a fines del año 2009, ambos de más baja potencia espectral con periodos de 6 meses y en donde se destaca la relación de desfase existente entre ambas variables, dominando la variable NDVI sobre la TST, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa, con respecto al eje coordenado del tiempo como del periodo.

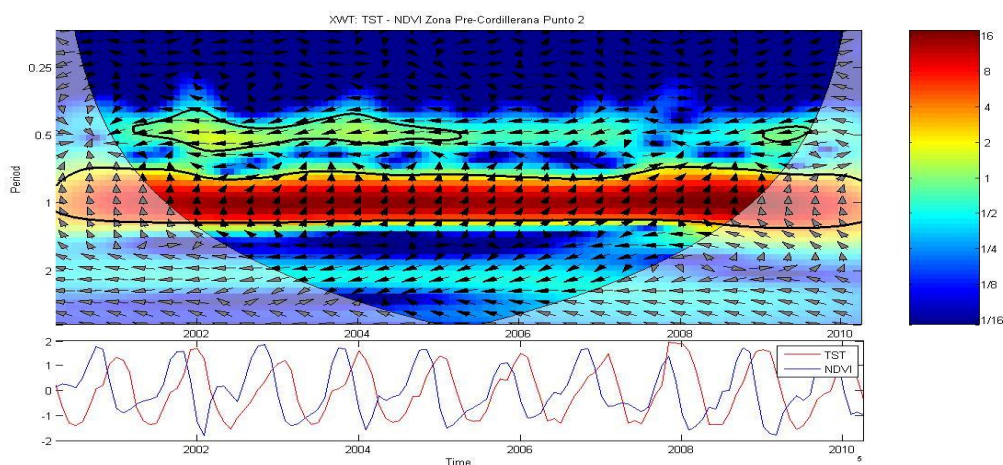


Figura 34. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Precordillerana (Punto 2)

En la figura 35 se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra una marcada banda de alta potencia espectral, asociada claramente a la relación estacional entre las dos variables, ya que esta banda está en torno al período de un año y recorre todo el dominio del tiempo. Además se observa que las dos variables presentan una relación de fase entre ellas, donde se identifica una dominación leve del NDVI sobre la TST, ya que el ángulo de fase posee una dirección positiva, con respecto al eje coordenado del tiempo y una dirección levemente negativa con respecto al eje coordenado del periodo.

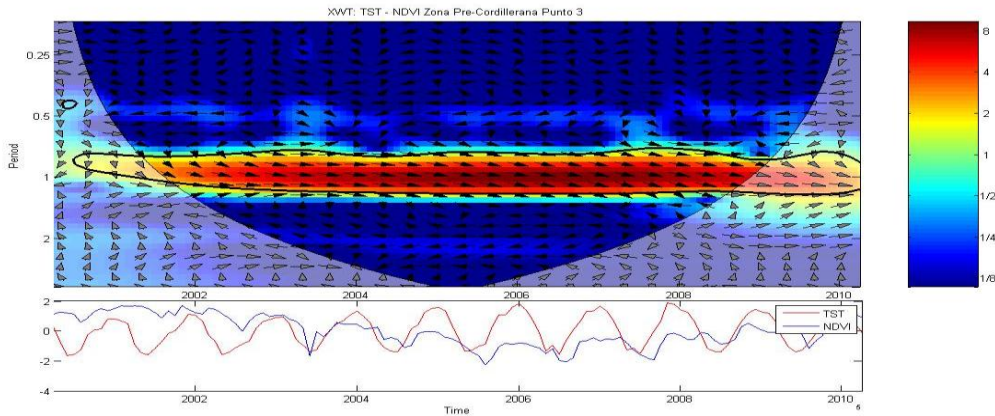


Figura 35. Transformada Wavelet Cruzada TST vs NDVI – Zona Precordillerana (Punto 3)

En síntesis, la relación existente entre las series de TST y NDVI, asociadas a las posiciones en estudio de Zona Precordillerana, evidencian que dicha asociación es generalmente válida a nivel estacional, ya que se encuentra alrededor de 1 año en términos de frecuencia. Además, predomina el comportamiento en conjunto de fase entre las variables y se evidencia generalmente la dominación de la TST sobre el NDVI.

7.4.5. Función de Autocorrelación

A fin de verificar los efectos estacionales presentes en las variables en estudio, se aplicará la función de autocorrelación sobre las series de tiempo extraídas de las zonas de estudio.

7.4.5.1. Función de Autocorrelación Series TST

En la figura 36, se muestra la función de autocorrelación para las 4 series de tiempo TST Zona Costera, en donde se observa evidencia del efecto estacional en ellas, ya que se verifica la forma ondulatoria con periodo de retardos de 12 meses, asociado a un comportamiento estacional.

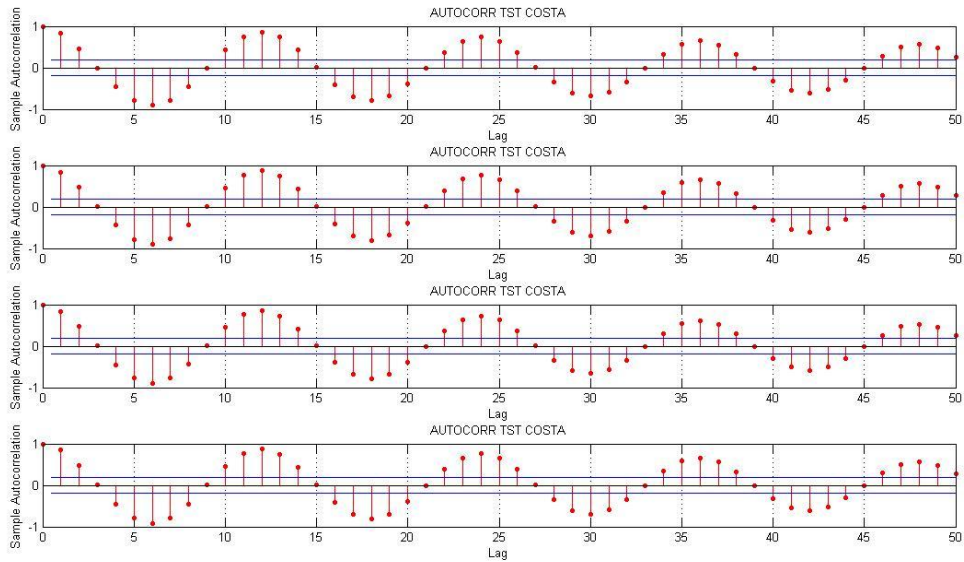


Figura 36. Función de Autocorrelación Series TST – Zona Costera

En la figura 37, se muestra la función de autocorrelación para las 3 series de tiempo TST Zona Valle Central, en donde se observa evidencia del efecto estacional en ellas, ya que se verifica la forma ondulatoria con periodo de retardos de 12 meses, asociado a un comportamiento estacional.

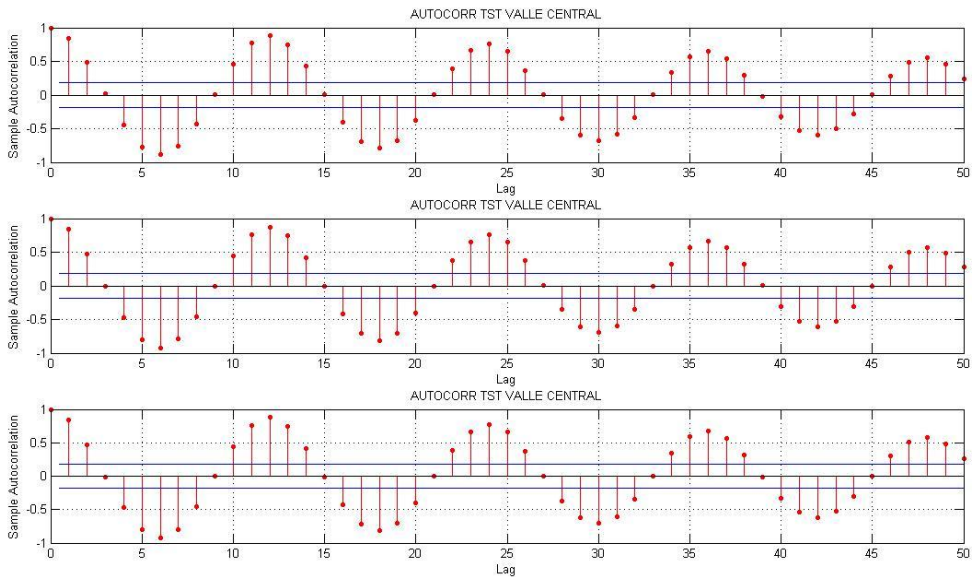


Figura 37. Función de Autocorrelación Series TST – Zona Valle Central

En la figura 38, se muestra la función de autocorrelación, para las 4 series de tiempo TST Zona Pre-cordillera. Se observa evidencia del efecto estacional en ellas, puesto que se verifica la forma ondulatoria con periodo de retardos de 12 meses, asociado a un comportamiento estacional.

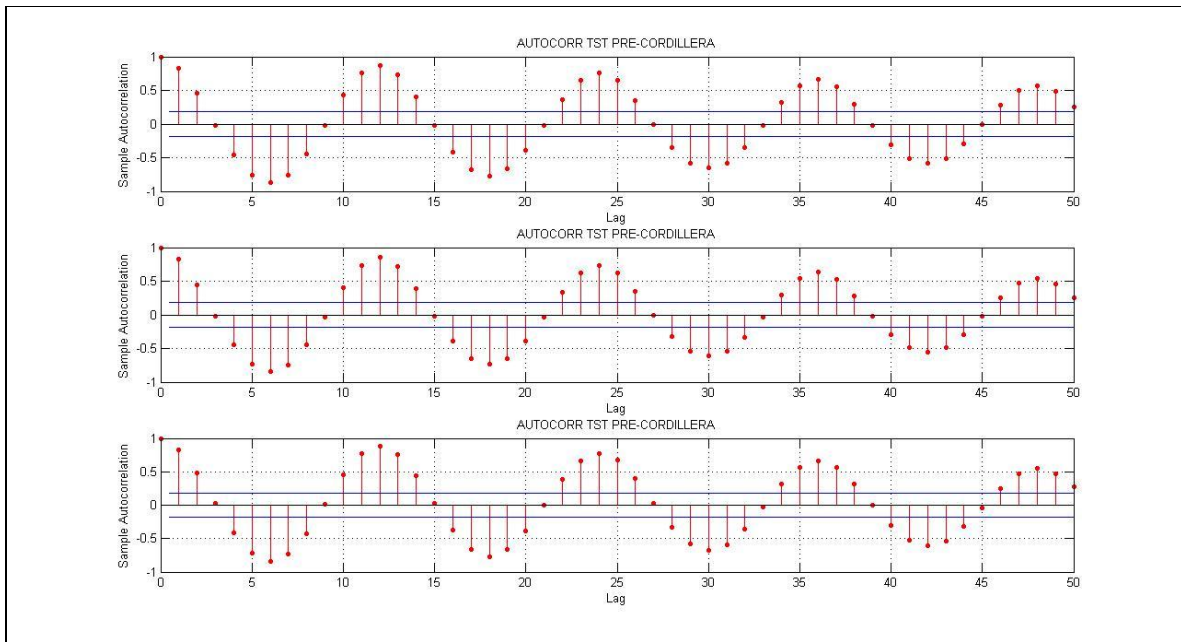


Figura 38. Función de Autocorrelación Series TST – Zona Precordillerana

En síntesis, para el total de series extraídas de TST (10 series extraídas), se observó claramente el comportamiento estacional presente en cada una de las series.

Con el fin de resaltar las variaciones de las series más allá del comportamiento estacional presente en la TST de cada zona, posteriormente se estudiarán las mismas series, pero desde el punto de vista interanual.

7.4.5.2. Función de Autocorrelación Series NDVI

La figura 39, muestra la función de autocorrelación, para las 4 series de tiempo NDVI Zona Costera. En la primera y cuarta serie se observa evidencia del efecto estacional en ellas, puesto que se verifica la forma ondulatoria con periodo de retardos de 12 meses, asociado a un comportamiento estacional. En cambio, en la segunda serie se observa una trayectoria ondulatoria con una tendencia descendente que podría tener un efecto

estacional y en la tercera serie se observa que el efecto estacional no esta presente en ellas, aunque existe una trayectoria levemente ondulatoria, de igual manera no se puede verificar algún comportamiento periódico.

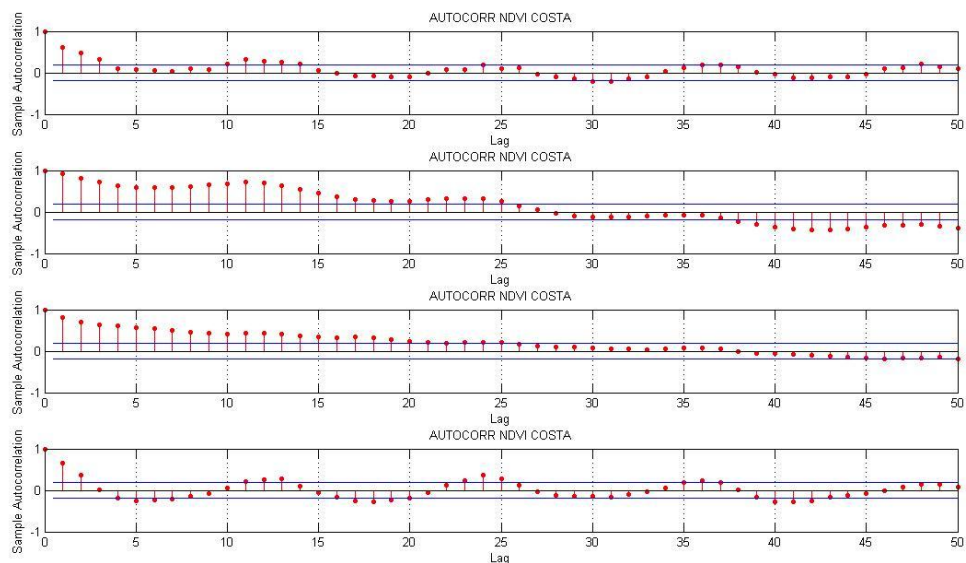


Figura 39. Función de Autocorrelación Series NDVI – Zona Costera

La figura 40, muestra la función de autocorrelación, para las 3 series de tiempo NDVI Zona Valle Central. En la tercera serie se observa evidencia del efecto estacional en ella, puesto que se verifica la forma ondulatoria con periodo de retardos de 12 meses, asociado a un comportamiento estacional. En cambio, en la primera serie se observa una trayectoria ondulatoria con una tendencia descendente que podría tener un efecto estacional y en la segunda serie se observa que el efecto estacional no esta presente en ella, aunque existe una trayectoria levemente ondulatoria, de igual manera no se puede verificar algún comportamiento periódico.

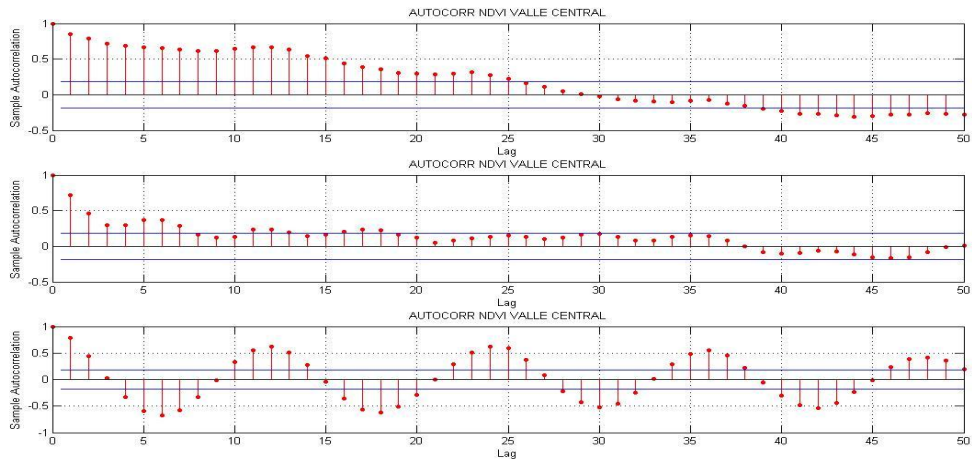


Figura 40. Función de Autocorrelación Series NDVI – Zona Valle Central

La figura 41, muestra la función de autocorrelación, para las 3 series de tiempo NDVI Zona Precondillera. En la primera y segunda serie se observa evidencia del efecto estacional en ella, puesto que se verifica la forma ondulatoria con periodo de retardos de 12 meses, asociado a un comportamiento estacional. En cambio, en la tercera serie se observa una trayectoria ondulatoria con una tendencia descendente que podría tener un efecto estacional.

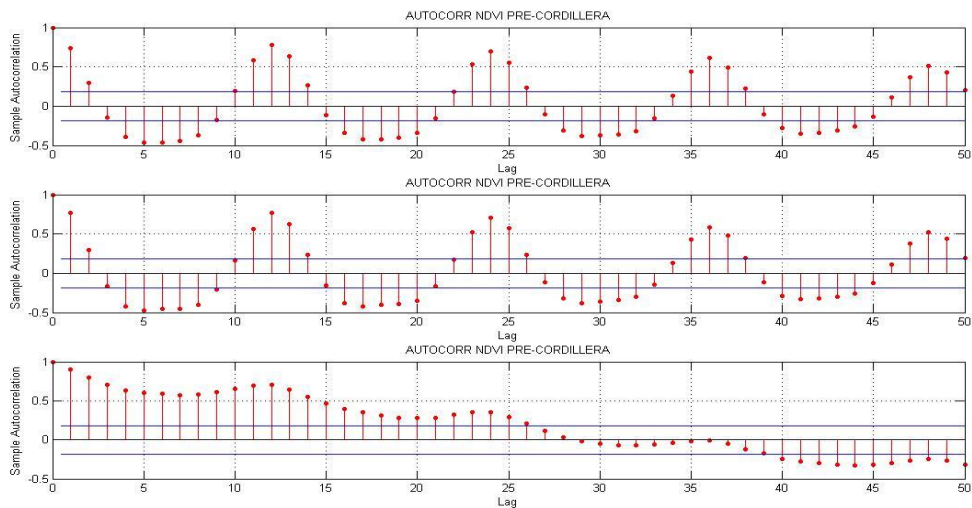


Figura 41. Función de Autocorrelación Series NDVI – Zona Precondillera

En síntesis, el análisis de la función de autocorrelación sobre las 10 series de tiempo extraídas para la variable NDVI, se observó que algunas series presentan un comportamiento estacional y en otras, no se verifica ningún comportamiento estacional en ellas, aunque en ciertos intervalos de periodos se observan posibles relaciones de autocorrelación, no es posible afirmar un comportamiento ondulatorio permanente y periódico.

7.4.6. Función de Correlación Cruzada Series TST vs NDVI

En esta sección se aplicó la función de correlación cruzada sobre los pares de series de tiempo extraídas de las zonas de estudio. El objetivo de este análisis es profundizar las relaciones periódicas existentes entre las 2 variables: TST y NDVI.

7.4.6.1. Función de Correlación Cruzada Series TST vs NDVI – Zona Costera

En la figura 42, la Función de Correlación Cruzada entre las 4 series TST y NDVI Zona Costera, hace notar la dependencia estacional de las dos variables entre si, puesto que se verifica la forma ondulatoria con un periodo de retardos de 12 meses.

Las relaciones mas relevantes entre estas dos variables (en las posiciones donde se produjo la extracción de estas series temporales) están presentes dentro de un periodo anual que se repite durante todo el dominio de tiempo en concordancia.

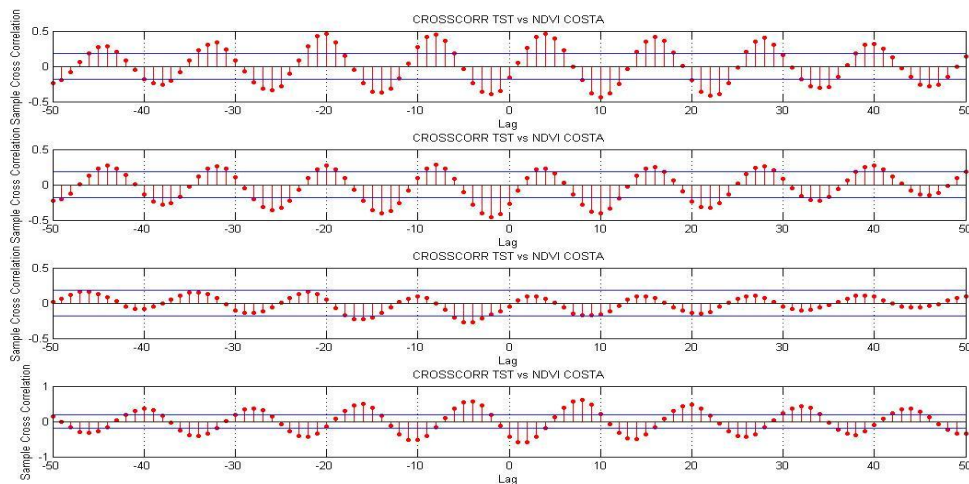


Figura 42. Función de Correlación Cruzada entre Series TST y NDVI Zona Costera

7.4.6.2. Función de Correlación Cruzada Series TST vs NDVI – Zona Valle Central

En la figura 43, la Función de Correlación Cruzada entre las 3 series TST y NDVI Zona Valle Central, hace notar la dependencia estacional de las dos variables entre si, puesto que se verifica la forma ondulatoria con un periodo de retardos de 12 meses.

Las relaciones mas relevantes entre estas dos variables (en las posiciones donde se produjo la extracción de estas series temporales) están presentes dentro de un periodo anual que se repite generalmente durante todo el dominio de tiempo en concordancia.

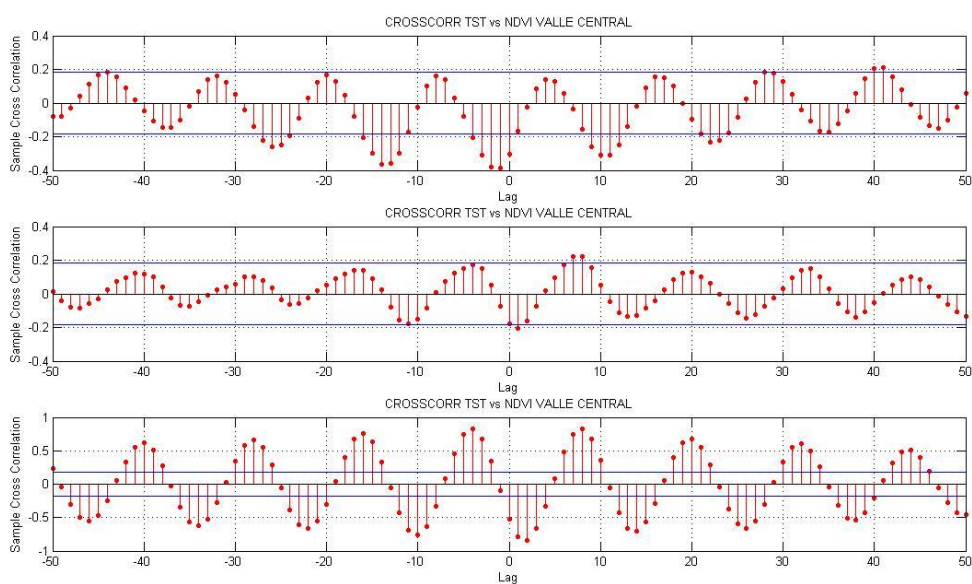


Figura 43. Función de Correlación Cruzada entre Series TST y NDVI Zona Valle Central

7.4.6.3. Función de Correlación Cruzada Series TST vs NDVI – Zona Precordillerana

En la figura 44, la Función de Correlación Cruzada entre las 3 series TST y NDVI Zona Precordillerana, hace notar la dependencia estacional de las dos variables entre si, puesto que se verifica la forma ondulatoria con un periodo de retardos de 12 meses.

Las relaciones mas relevantes entre estas dos variables (en las posiciones donde se produjo la extracción de estas series temporales) están presentes dentro de un periodo anual que se repite durante todo el dominio de tiempo en concordancia.

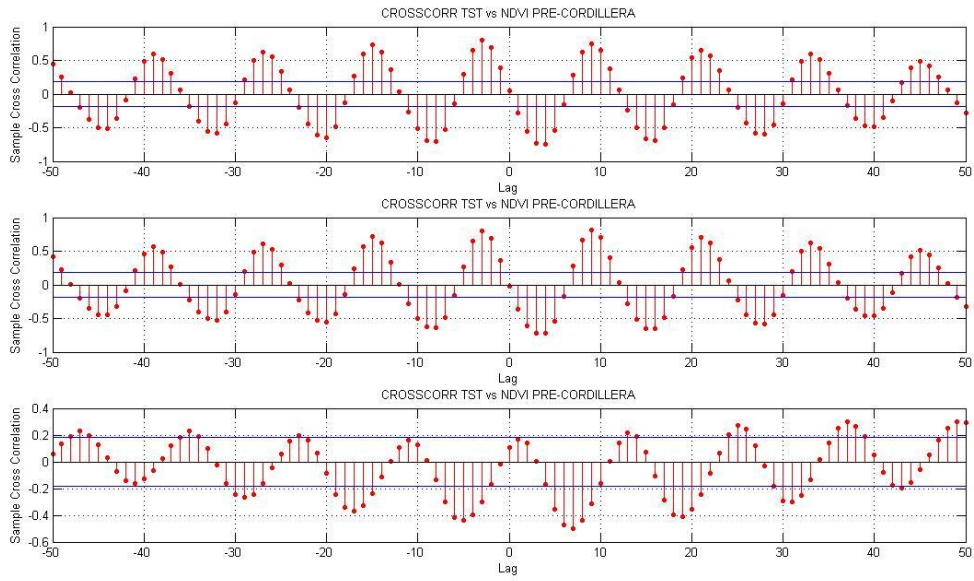


Figura 44. Función de Correlación Cruzada entre Series TST y NDVI Zona Precordillerana

En síntesis, las funciones de correlación cruzada aplicadas entre las series de tiempo asociadas a la TST y NDVI, extraídas de las zonas de estudio, arrojan que dicha dependencia es importante a nivel estacional, por lo que sería recomendable, realizar un análisis interanual para ver fluctuaciones relevantes que escapen del dominio de tiempo estacional.

7.5. Análisis de las Variables en la Escala Interanual

En esta sección y las posteriores se analizarán los comportamientos de los fenómenos o variables en estudio, desde el punto de vista interanual. Con este objetivo, se ha realizado un análisis de anomalías de las variables, tomando como modelos de predicción el Análisis Armónico (para el total de las posiciones, en el dominio espacio-tiempo, de cada variable en estudio). En la figura 45, se muestra una representación del análisis de anomalías para una serie de tiempo de la variable TST.

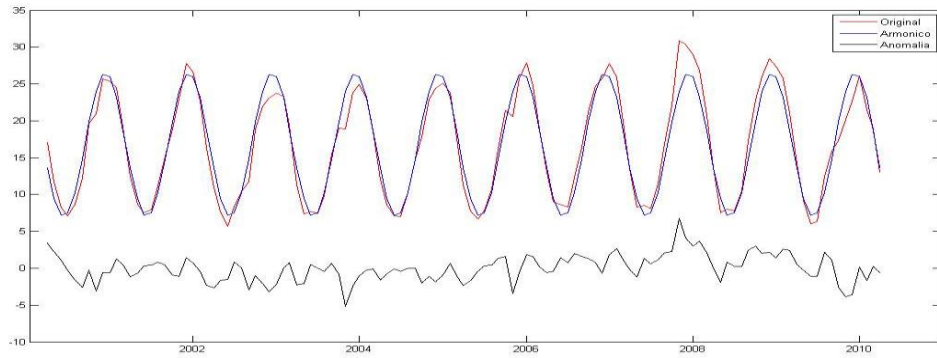


Figura 45. Representación de una serie de anomalías TST.

Para el análisis de las variables TST y NDVI se ha desarrollado un índice que permite cuantificar en el tiempo la ocurrencia de eventos como El Niño y La Niña, el indicador que se uso en este trabajo es el índice de El Niño o también llamado índice de MEI (Multivariate ENSO Index, Wolter ,1987; Wolter & Timlin, 1993). A través de este índice (figura 56), las señales interanuales son monitoreadas en la región ecuatorial el cual indica a través de un gráfico Tiempo (años) versus Índice El Niño, los eventos anómalos que han ocurrido durante el período abril de 2000 hasta abril de 2010.

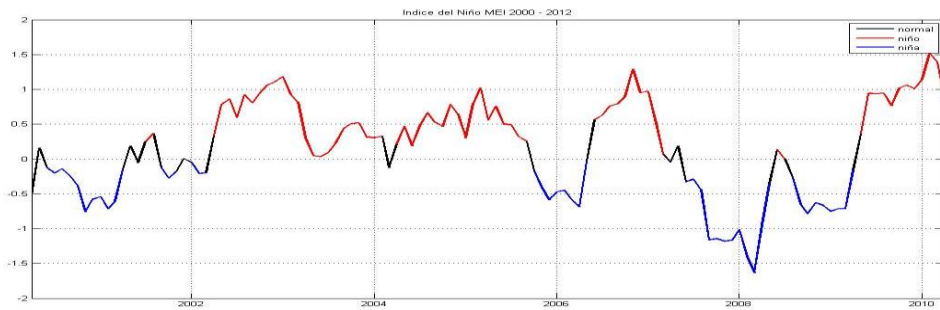


Figura 46. Índice del Niño-Niña MEI

En esta serie se observo el impacto del evento El Niño para los periodos en los cuales las puntuaciones son mayores a 0 (color rojo, fase positiva), donde los periodos son los siguientes:

- Mayo del 2000
- Mayo, Julio, Agosto y Diciembre del 2001
- De abril del 2002 a febrero del 2004
- De abril del 2004 a septiembre del 2005
- De junio del 2006 a marzo del 2007
- Mayo del 2007
- Junio y Julio del 2008
- De mayo del 2009 a abril del 2010.

Además en esta serie se observó el impacto del evento La Niña para los periodos en los cuales las puntuaciones son menores a 0 (color azul, fase negativa), donde los periodos son los siguientes:

- Abril del 2000
- De junio del 2000 a abril del 2001
- Junio del 2001
- De septiembre a noviembre del 2001
- De enero a marzo del 2002
- Marzo del 2004
- De octubre del 2005 a mayo del 2006
- Abril del 2007
- De junio del 2007 a mayo del 2008
- De agosto del 2008 a abril del 2009

Mediante este historial, tanto para el evento de El Niño como el evento de La Niña, se procederán a buscar relaciones entre las variables en estudio y los dos fenómenos, en términos interanuales, es decir, sobre las anomalías calculadas para cada variable.

7.5.1. Transformada Wavelet Continua sobre Anomalías de Series TST

En esta sección se aplicara la Trasformada Wavelet Continua sobre las anomalías calculadas en base al Análisis Armónico aplicado a las Series TST extraídas de las zonas de estudio.

7.5.1.1. Transformada Wavelet Continua sobre Anomalías de Series TST – Zona Costera

En la figura 47, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra tres núcleos de alta potencia espectral ($\sim 6[^\circ C]^2$), donde el primero cubre el intervalo de tiempo de mediados de 2000 hasta el año 2003 con periodos de 5 a 7 meses, el segundo cubre el año 2005 con periodos de 5 a 7 meses y el tercero cubre mediados del año 2008 con periodos de 14 a 18 meses. Además, hay otros 3 núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 2 a 4 meses para dominios de tiempo de los años 2001, 2005 y 2007. Además se puede identificar que 4 núcleos son influenciados por el efecto de El Niño (3 en fase opuesta y 1 en fase directa), 1 núcleo es influenciado por el efecto de la niña (fase opuesta) y 1 núcleo comparte la influencia de ambos efectos (mayormente en fase opuesta).

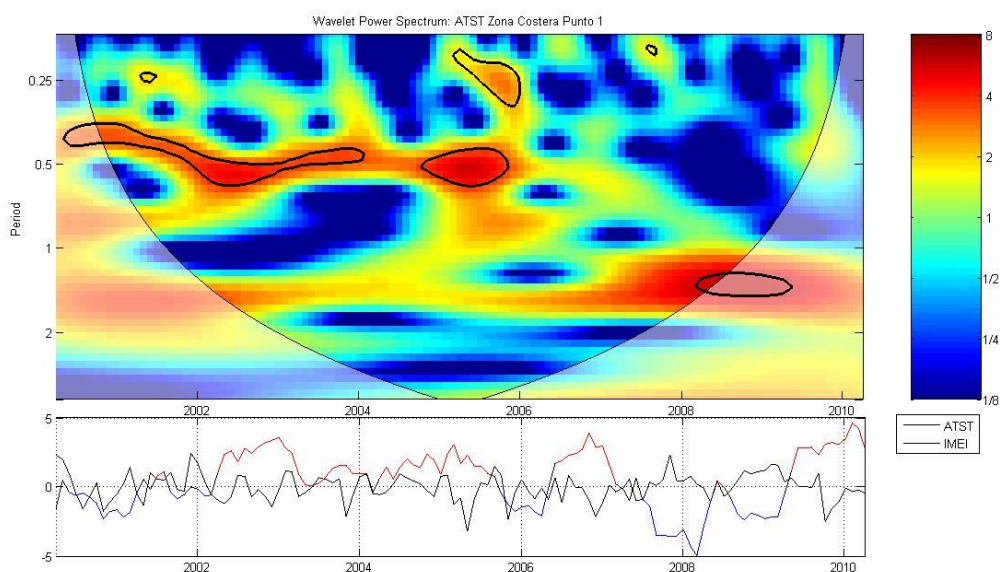


Figura 47. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Costera (Punto 1)

En la figura 48, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un núcleo de mediana potencia espectral ($\sim 3[^\circ C]^2$), donde cubre el intervalo de tiempo de a fines del año 2005 hasta principios del año 2006 con periodos de 2 a 5 meses. Además, hay otros 3 núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 1 a 4 meses para dominios de tiempo de los años 2000, 2006 y 2007. Además se puede identificar que 3 núcleos son influenciados por el efecto de La Niña (2 en fase directa y 1 en fase contraria) y 1 núcleo es influenciado por el efecto de El Niño.

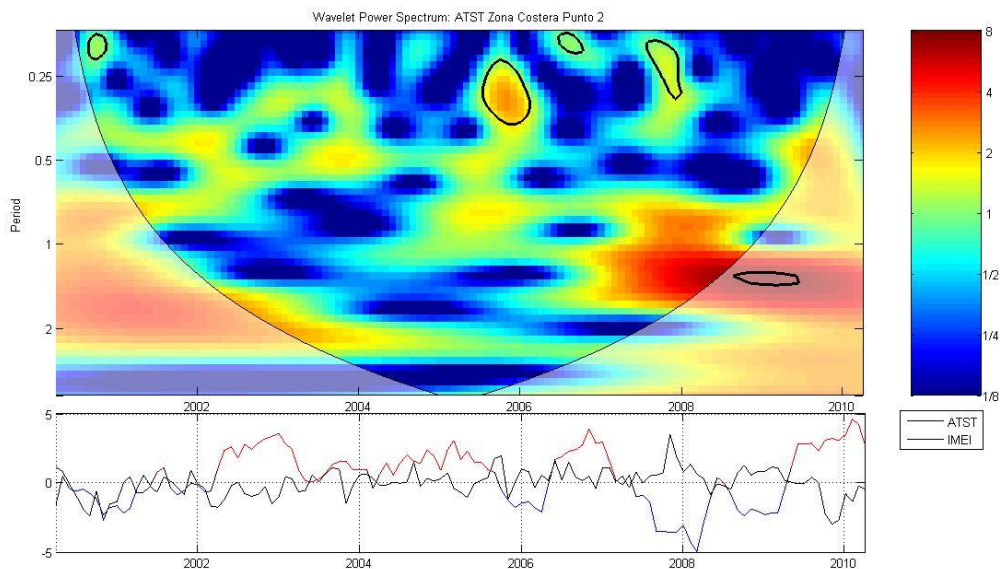


Figura 48. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Costera (Punto 2)

En la figura 49, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un núcleo de alta potencia espectral ($\sim 8[^\circ C]^2$), el cual cubre el intervalo de tiempo de mediados del año 2001 con periodos de 9 a 11 meses. Además, hay otros 3 núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 3 a 4 meses para a mediados de 2005, periodos de 2 a 5 meses para a fines de 2007 y principios de 2008 y periodos de 5 a 6 meses para a mediados del 2009. Además se puede identificar que 3 núcleos son influenciados por el efecto de El Niño (2 en fase contraria y 1 en fase directa) y 1 núcleo es influenciado por el efecto de la niña (fase contraria).

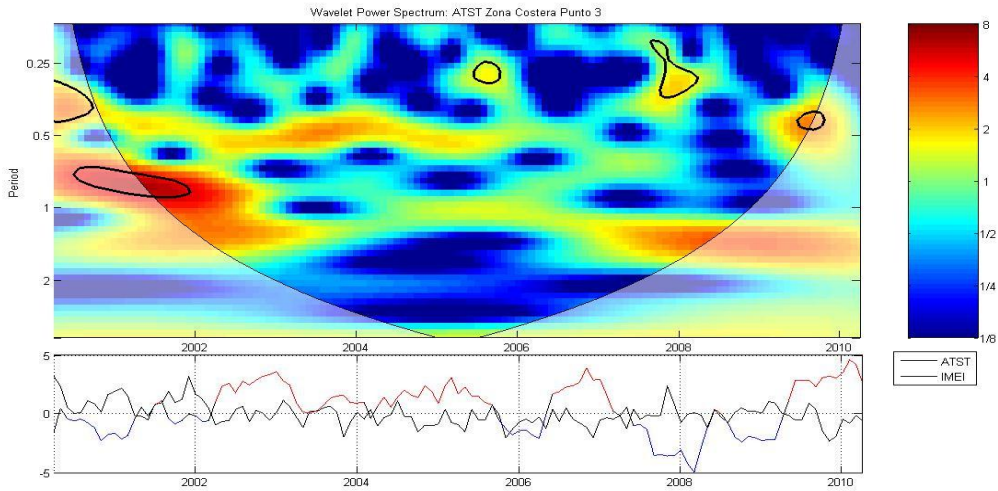


Figura 49. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Costera (Punto 3)

En la figura 50, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un núcleo de alta potencia espectral ($\sim 8[^\circ C]^2$), el cual cubre el intervalo de tiempo de a principios del año 2008 con periodos de 14 a 18 meses. Además, hay otros núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 1 a 5 meses (3 núcleos) y de 5 a 7 meses (1 núcleo), para los dominios de tiempo de los años 2003 a principios de 2004, final de 2006, final del 2007 y mediados del 2009. Además se puede identificar que 4 núcleos son influenciados por el efecto de El Niño (3 en fase contraria y 1 en fase directa) y 1 núcleo es influenciado por el efecto de la niña (fase opuesta).

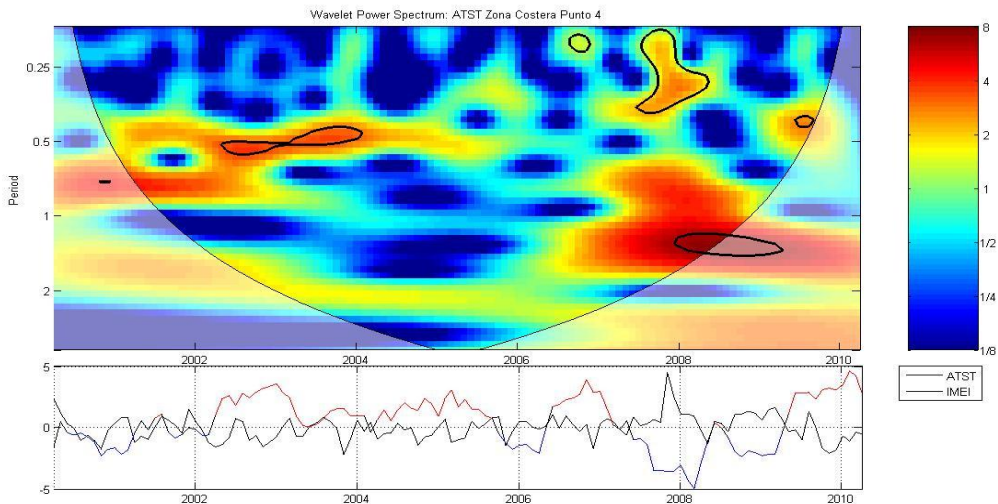


Figura 50. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Costera (Punto 4)

En síntesis, según el análisis de Transformada Wavelet Continua, para las anomalías de las series extraídas de la TST Zona Costera, se destaca generalmente un importante núcleo por análisis de alta potencia espectral. Los núcleos de mayor potencia espectral son de $\sim 8[^\circ C]^2$, catalogados por dos tipos de periodos de aparición: de 14 a 18 meses, para los dominios de tiempo de mediados del 2008 y entre 9 a 11 meses, para los dominios de tiempo de mediados del año 2001. Para este conjunto de anomalías TST, se observó mayormente la influencia del evento de El Niño (~ 4 de 5 núcleos por análisis) a excepción del punto 2 (Figura 48) donde domina el evento de La Niña. Por lo tanto, en términos interanuales el comportamiento de la TST se ve afectado generalmente según el impacto del Niño (fase contraria) en zona costera y en los núcleos de mayor potencia espectral.

7.5.1.2. Transformada Wavelet Continua sobre Anomalías de Series TST – Zona Valle Central

En la figura 51, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un núcleo de alta potencia espectral ($\sim 8[^\circ C]^2$), el cual cubre el intervalo de tiempo de fines del 2007 hasta principio del año 2008 con periodos de 11 a 13 meses. Además, hay otros 7 núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 2 a 6 meses para los dominios de tiempo de los años: final del 2002, 2003, final del 2005, principios del 2006, final del 2007, principios del 2008 y mediados del 2009. Además se puede identificar que 5 núcleos son influenciados por el efecto de La Niña (3 en fase contraria, 1 en fase directa y 1 comparte ambas fases) y 3 núcleos son influenciados por el efecto de El Niño (fase opuesta).

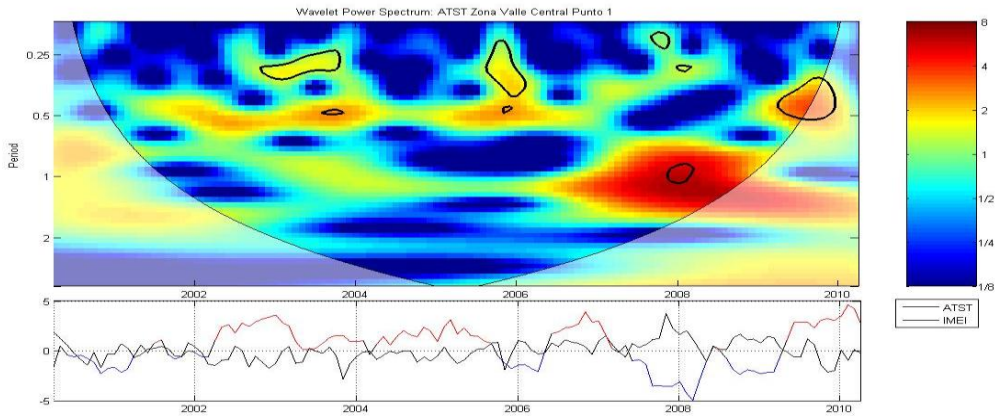


Figura 51. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Valle Central (Punto 1)

En la figura 52, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra cuatro núcleos de mediana potencia espectral ($\sim 4[^\circ\text{C}]^2$), donde el primero cubre el intervalo de tiempo de principios de 2001 con periodos de 10 meses, el segundo cubre el año 2002 con periodos de 5 a 8 meses, el tercero cubre de mediados de 2003 hasta principios del 2004 con periodos de 5 a 6 meses y el cuarto cubre el año 2009 con periodos de 4 a 6 meses. Además, hay otros 2 núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 1 a 4 meses para los dominios de tiempo de los años de final del 2005 y final del 2007. Además se puede identificar que ~ 4 núcleos son influenciados por el efecto de El Niño (3 en fase contraria y 1 en fase directa) y 2 núcleos son influenciados por el efecto de la niña (1 en fase opuesta y 1 en fase directa).

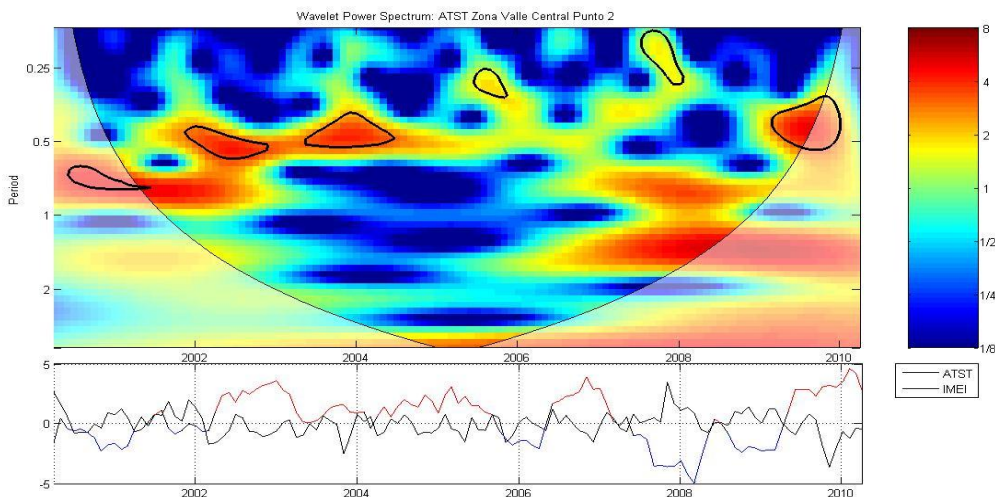


Figura 52. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Valle Central (Punto 2)

En la figura 53, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un núcleo de alta potencia espectral ($\sim 8[^\circ\text{C}]^2$), el cual cubre el intervalo de tiempo de a principios del año 2002 hasta principios del año 2004 con periodos de 5 a 8 meses. Además, hay otros 2 núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 1 a 6 meses para los dominios de tiempo de los años de a principios del 2007 hasta principios del 2008 y mediados del 2009. Además se puede identificar que 2 núcleos son influenciados por el efecto de El Niño (fase contraria) y 1 núcleo es influenciado por el efecto de la niña (fase opuesta).

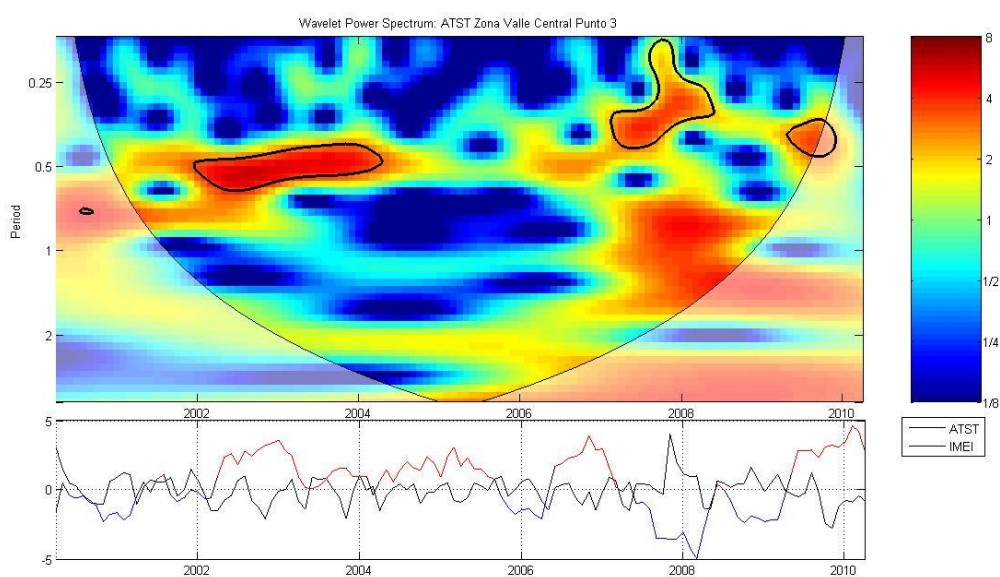


Figura 53. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Valle Central (Punto 3)

En síntesis, según el análisis de Transformada Wavelet Continua, para las anomalías de las series extraídas de la TST Zona Valle Central, generalmente se destaca un importante núcleo por análisis de alta potencia espectral. Los núcleos de mayor potencia espectral son de $\sim 8[^\circ\text{C}]^2$, catalogados por dos tipos de periodos de aparición: de 11 a 13 meses, para los dominios de tiempo de a fines del 2007 hasta principio del año 2008 y entre 5 a 8 meses, para los dominios de tiempo de principios del año 2002 hasta principios del año 2004. Para este conjunto de anomalías TST, en las Figuras 52 y 53 se observó principalmente la influencia del evento de El Niño (fase contraria) y a su vez; en la Figura 51 domino la influencia del evento de La Niña en los núcleos de las ATST. Por lo tanto, en términos interanuales el comportamiento de la TST se ve afectado mayormente según el impacto del Niño (fase contraria) en zona valle central.

7.5.1.3. Transformada Wavelet Continua sobre Anomalías de Series TST – Zona Precordillerana

En la figura 54, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un gran núcleo de alta potencia espectral ($\sim 8[^\circ\text{C}]^2$), el cual cubre el intervalo de tiempo de a principios del año 2001 hasta principios del año 2007 con periodos de 4 a 8 meses. Además, hay otros núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 1 a 2 meses (2 núcleos) para mediados del año 2006 y mediados de año 2007 y periodos de 4 a 6 meses para fines del 2009. Además se puede identificar que 3 núcleos son influenciados por el efecto de El Niño (mayormente en fase contraria) en donde uno de estos núcleos (banda), también se encuentra influenciada por el efecto de La Niña, pero solamente en ciertos periodos de tiempo. A la vez 1 núcleo es influenciado por el efecto de la niña (fase contraria).

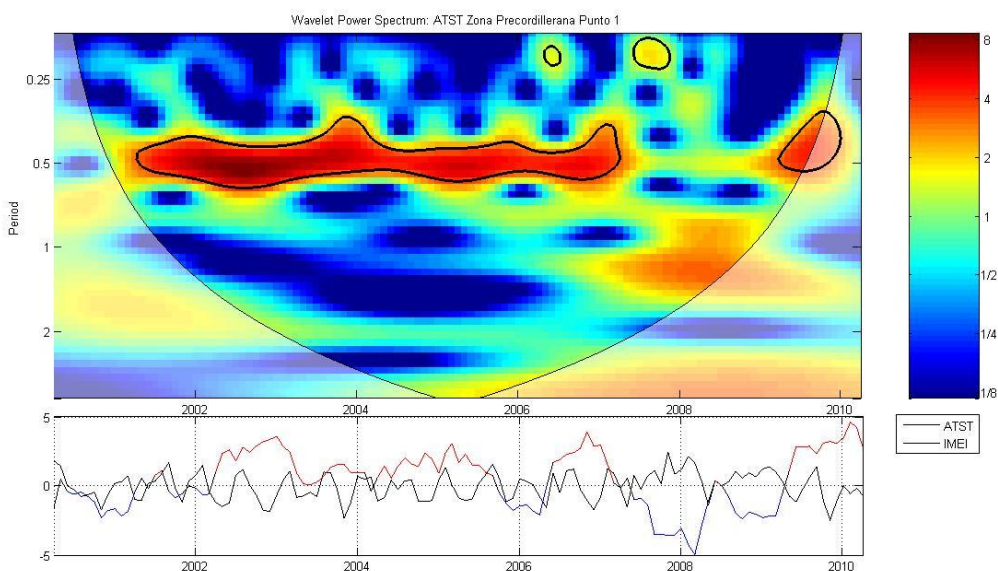


Figura 54. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Precordillerana (Punto 1)

En la figura 55, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un gran núcleo de alta potencia espectral ($\sim 8[^\circ\text{C}]^2$), el cual cubre el intervalo de tiempo de a fines del año 2000 hasta principios del año 2007 con periodos de 4 a 8 meses. Además, hay otros 2 núcleos de menor potencia

espectral, con periodos de 1 a 3 meses para a fines del año 2007 y periodos de 5 a 7 meses para fines del año 2009. Además se puede identificar que 2 núcleos son influenciados por el efecto de El Niño (mayormente en fase contraria) en donde uno de estos núcleos (banda), también se encuentra influenciada por el efecto de La Niña, pero solamente en ciertos periodos de tiempo. A la vez 1 núcleo es influenciado por el efecto de la niña (fase opuesta).

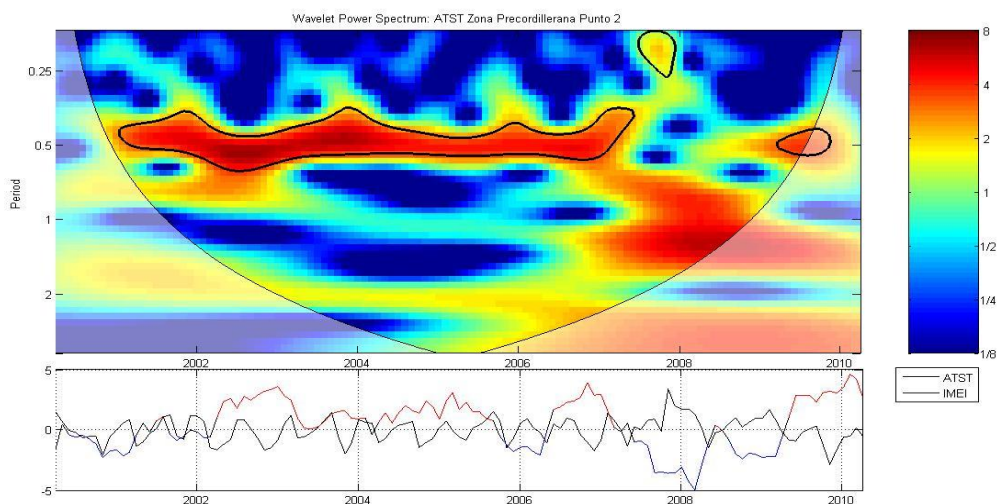


Figura 55. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Precordillerana (Punto 2)

En la figura 56, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un núcleo de mediana potencia espectral ($\sim 4[^\circ\text{C}]^2$), el cual cubre el intervalo de tiempo de a fines del año 2000 hasta fines del año 2001 con periodos de 4 a 6 meses. Además, hay otros 4 núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 1 a 4 meses para los dominios de tiempo de los años de final del 2000, final del 2005, principios del 2006 y final del 2007. Además se puede identificar que un núcleo es influenciado por el efecto de El Niño (fase contraria), 3 núcleos son influenciados por el efecto de La Niña (2 en fase contraria y 1 en fase directa). A la vez, existe un núcleo el de mayor potencia espectral el cual presenta ambas influencias y efectos.

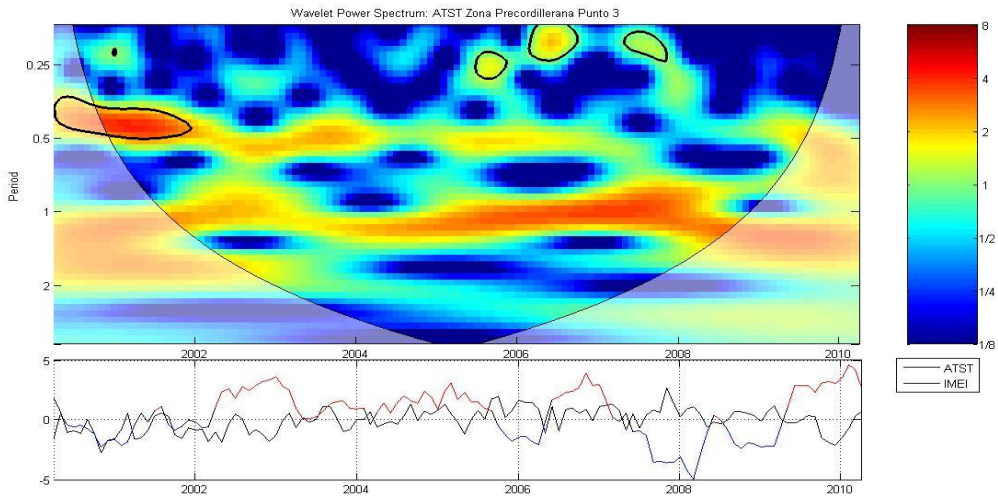


Figura 56. Transformada Wavelet Continua ATST – Zona Precordillerana (Punto 3)

En síntesis, según el análisis de Transformada Wavelet Continua, para las anomalías de las series extraídas de la TST Zona Precordillerana, se destaca generalmente un importante núcleo por análisis de alta potencia espectral, donde los núcleos de mayor potencia espectral son de $\sim 8[^\circ\text{C}]^2$, catalogados por dos tipos de periodos de aparición: de 4 a 8 meses, para los dominios de tiempo de a principios del año 2001 hasta principios del año 2007. Para este conjunto de anomalías TST, en las Figuras 54 y 55 se observó principalmente la influencia del evento de El Niño (fase contraria) y a su vez; en la Figura 56 domino la influencia del evento de La Niña en los núcleos de las ATST. Por lo tanto, en términos interanuales el comportamiento de la TST se ve afectado mayormente según el impacto del Niño (fase opuesta) en zona precordillerana.

7.5.2. Transformada Wavelet Continua sobre Anomalías de Series NDVI

En esta sección se aplicara la Transformada Wavelet Continua sobre las anomalías calculadas en base al Análisis Armónico aplicado a las Series NDVI que fueron extraídas de las zonas de estudio.

7.5.2.1. Transformada Wavelet Continua sobre Anomalías de Series NDVI – Zona Costera

En la figura 57, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra dos núcleos de mediana potencia espectral ($\sim 3[r.h.]^2$), los cuales cubren los intervalos de tiempo de fines del año 2002 con periodos de 2 a 4 meses y principios del año 2006 con periodos de 1 a 4 meses. Además, hay otros 3 núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 1 a 5 meses para los dominios de tiempo de los años a fines del año 2003, fines del 2005 y fines del 2008. También se puede identificar que 3 núcleos son influenciados por el efecto de El Niño (fase directa) y 2 núcleos son influenciados por el efecto de la niña (fase directa).

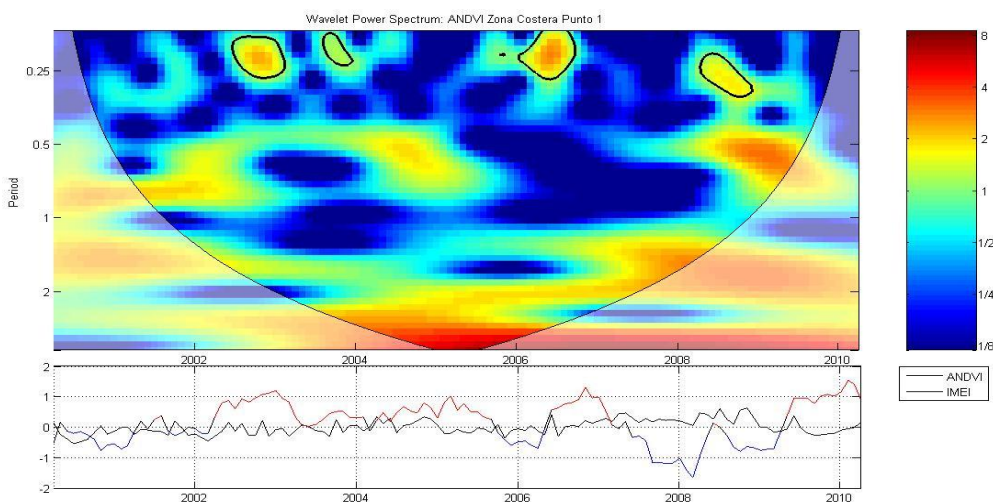


Figura 57. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Costera (Punto 1)

En la figura 58, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra núcleos de baja potencia espectral, siendo el que posee mayor potencia espectral el núcleo con $\sim 0,5[r. h.]^2$, la cual cubre el intervalo de tiempo de a mediados del año 2004 hasta principios del 2005 con periodos de 6 meses y de 2 a 6 meses para a mediados del 2008 hasta el año 2009. Además, hay otros 3 núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 1 a 4 meses para los dominios de tiempo de los años de mediados del 2003, mediados del 2004, principios del 2006. También se puede identificar que 3 núcleos son influenciados por el efecto de El Niño (fase opuesta) y 2 núcleos son influenciados por ambos efectos y fases.

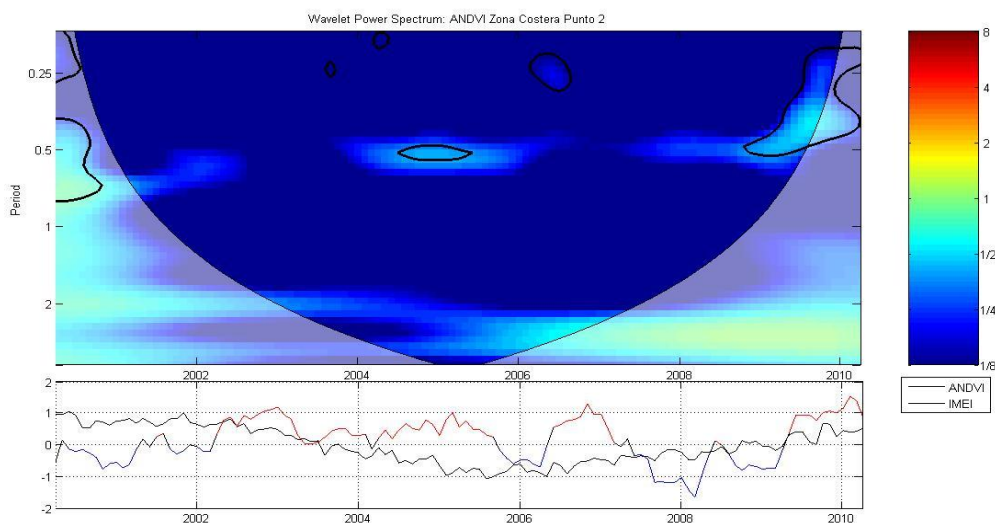


Figura 58. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Costera (Punto 2)

En la figura 59, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un núcleo de mediana potencia espectral ($\sim 2[r. h.]^2$), la cual cubre el intervalo de tiempo de a fines del año 2001 hasta principios del año 2002 con periodos de 5 a 7 meses. Además, hay otros 4 núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 1 a 6 meses para los dominios de tiempo de los años de mediados del año 2000, principio del 2006, principios del 2008 y 2009. También se puede identificar que hay 1 núcleo para cada efecto con fase contraria para La Niña y fase directa para El Niño. A su vez hay 3 núcleos que son influenciados por ambos efectos donde predomina la fase contraria con respecto a las ANDVI.

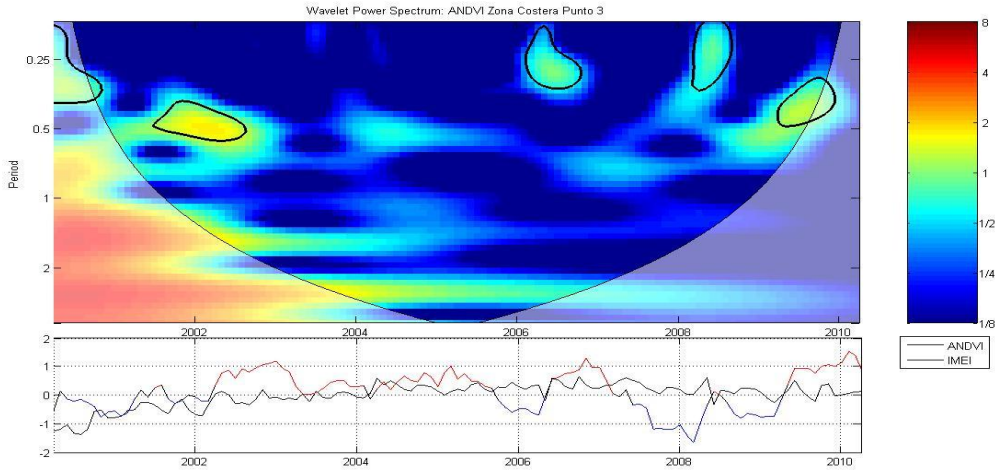


Figura 59. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Costera (Punto 3)

En la figura 60, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un gran núcleo de alta potencia espectral ($\sim 8[r.h.]^2$), la cual cubre el intervalo de tiempo del año 2003 con periodos de 25 a 27 meses. Además, hay otros núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 1 a 4 meses (4 núcleos) para los dominios de tiempo de los años de principios del 2001, mediados del año 2003, principios del año 2004 y mediados del año 2006 y con periodos de 5 a 10 meses (2 núcleos) para final del año 2001 hasta fines del 2004 y mediados del 2007 hasta principios del 2008. También se puede identificar que 6 núcleos son influenciados por el efecto de El Niño (5 en fase directa y 1 en fase contraria) y 1 núcleo es influenciado por el efecto de La Niña (fase directa).

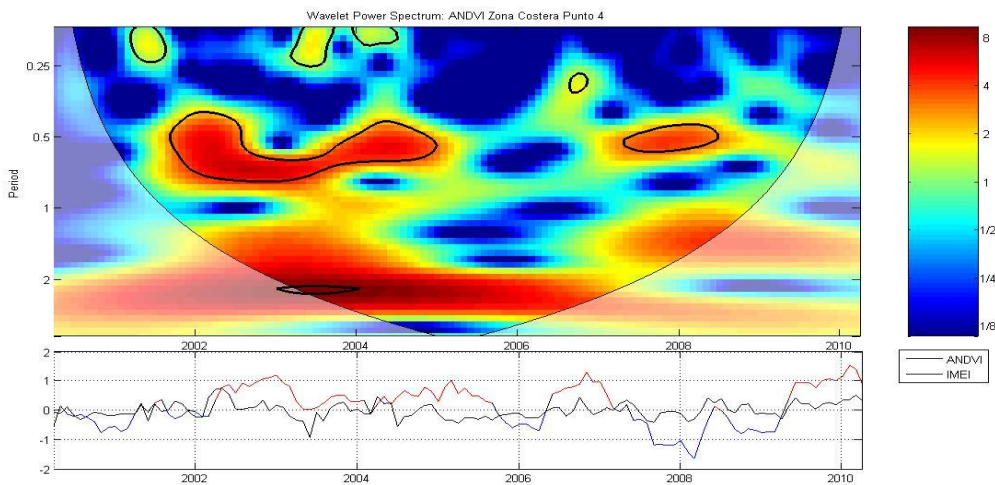


Figura 60. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Costera (Punto 4)

En síntesis, según el análisis de Transformada Wavelet Continua, para las anomalías de las series NDVI Zona Costera, se destacan ~ 1 ó 2 núcleos importantes por análisis ya sean de baja, mediana y alta potencia espectral; donde el núcleo de mayor potencia espectral tiene periodos de 25 a 27 meses para el año 2003. Para este conjunto de anomalías NDVI, se observó mayormente la influencia del evento de El Niño. Por lo tanto, en términos interanuales el comportamiento de la NDVI se ve afectado generalmente según el impacto del Niño (fase directa) en zona costera.

7.5.2.2. Transformada Wavelet Continua sobre Anomalías de Series NDVI – Zona Valle Central

En la figura 61, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un núcleo de mediana potencia espectral ($\sim 2[r.h.]^2$), la cual cubre el intervalo de tiempo del año 2008 con periodos de 5 a 7 meses. Además, hay otros núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 1 a 5 meses (5 núcleos) para mediados del año 2000, principios del 2001, mediados del 2002, mediados del 2008 y final del año 2009 y con periodos de 6 meses (1 núcleo) para principios del año 2002. También se puede identificar que 2 núcleos son influenciados por el efecto de El Niño (fase directa), 3 núcleos son influenciados por el efecto de La Niña (2 en fase directa y 1 en fase contraria) y 2 núcleos se ven influenciados por ambos efectos y en fase directa.

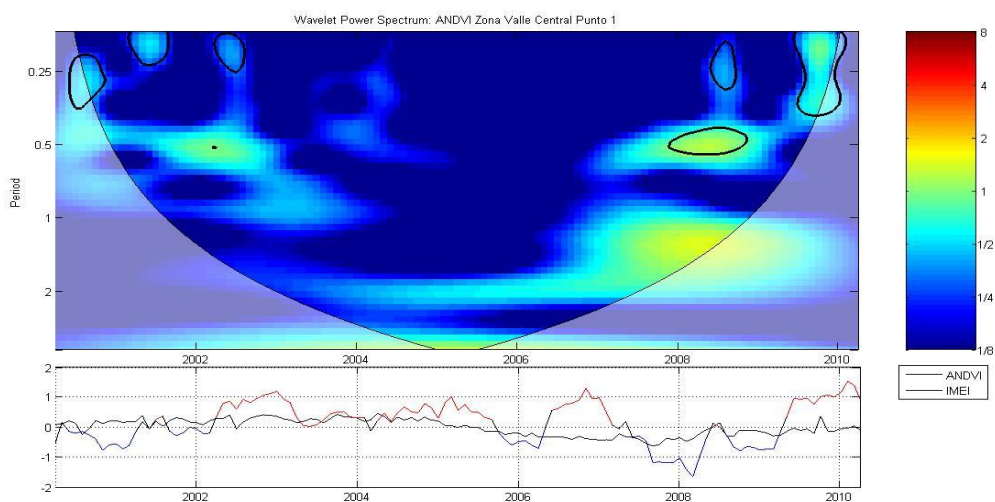


Figura 61. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Valle Central (Punto 1)

En la figura 62, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un núcleo de alta potencia espectral ($\sim 8[r.h.]^2$), la cual cubre el intervalo de tiempo de a fines del año 2000 hasta mediados de año 2002 con periodos de 4 a 9 meses. Además, hay otros núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 1 a 3 meses (1 núcleo) para mediados del año 2003 y con periodos de 5 a 8 meses (2 núcleos) para los dominios de tiempo de los años de principios del 2004 y fines del 2008. También se puede identificar que 2 núcleos son influenciados por el efecto de El Niño (fase directa), 1 núcleo es influenciado por el efecto de La Niña (fase contraria) y 1 núcleo se ve influenciado por ambos efectos de fase directa (El Niño) y fase contraria (La Niña).

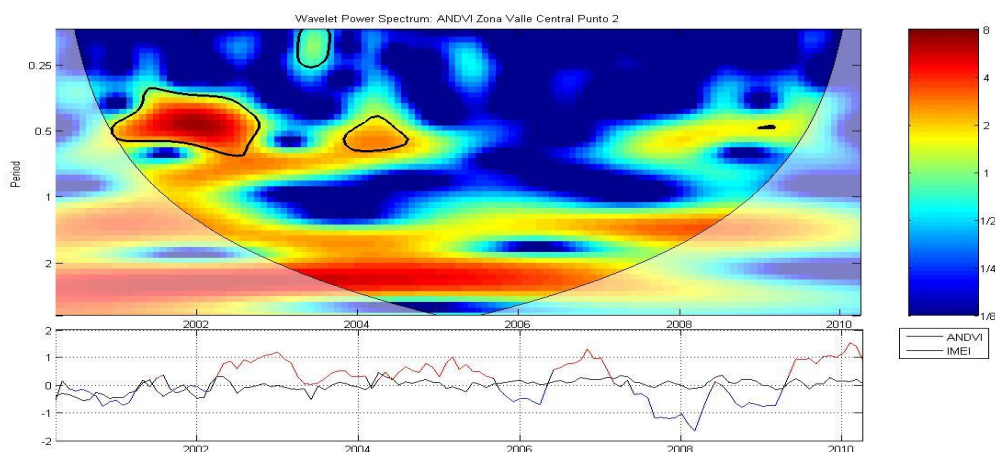


Figura 62. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Valle Central (Punto 2)

En la figura 63, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un núcleo de alta potencia espectral ($\sim 8[r.h.]^2$), la cual cubre el intervalo de tiempo de a fines del año 2002 hasta principio del año 2005 con periodos de 24 a 30 meses. Además, hay otros núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 1 a 4 meses (3 núcleos) para los dominios de tiempo de los años de mediados del 2003, mediados del 2006, mediados del 2008 y con periodos de 4 a 10 meses (1 núcleo) para fines del año 2001 hasta principios del año 2003. También se puede identificar que 3 núcleos son influenciados por el efecto de El Niño (2 con fase directa y 1 núcleo con fase directa y con fase contraria), y 1 núcleo es influenciado por el efecto de La Niña (fase contraria).

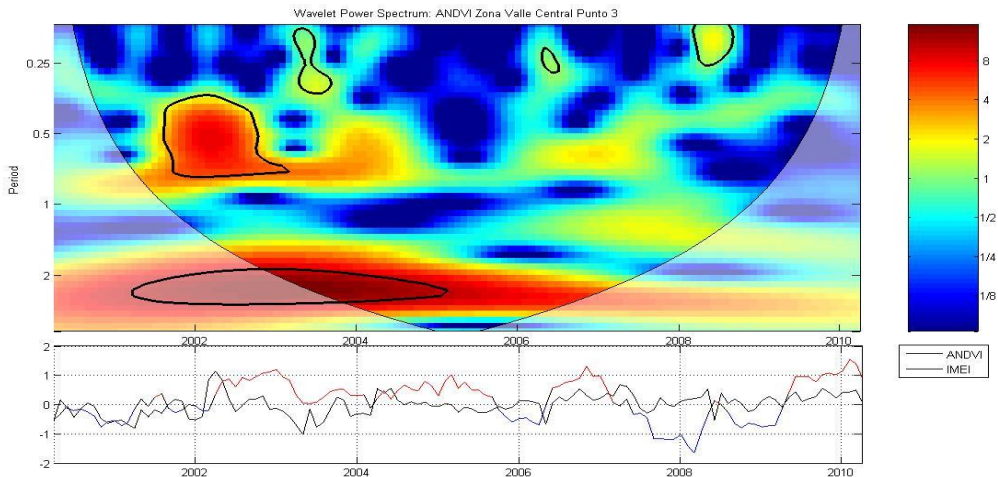


Figura 63. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Valle Central (Punto 3)

En síntesis, según el análisis de Transformada Wavelet Continua, para las anomalías de las series NDVI Zona Valle Central, se destaca 1 núcleo importante por análisis ya sean de mediana y alta potencia espectral. El núcleo de mediana potencia espectral posee un periodo de aparición de 5 a 8 meses para el año 2008 y el de alta potencia espectral ($\sim 8[r.h.]^2$) tiene como periodo de aparición: de 4 a 9 meses para los dominios de tiempo de a fines del 2000 hasta a mediados de 2002 y de 24 a 30 meses para el dominio de tiempo de a fines del 2002 hasta principio de 2005. Para este conjunto de anomalías NDVI, en las Figuras 62 y 63 se observó principalmente la influencia del evento de El Niño (fase directa) y a su vez; en la Figura 61 domino la influencia del evento de La Niña en los núcleos de las ANDVI. Por lo tanto, en términos interanuales el comportamiento de la NDVI se ve afectado mayormente según el impacto del Niño (fase directa) en zona valle central.

7.5.2.3. Transformada Wavelet Continua sobre Anomalías de Series NDVI – Zona Precordillerana

En la figura 64, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra una banda de alta potencia espectral ($\sim 8[r.h.]^2$), la cual cubre el intervalo de tiempo de a fines del año 2000 hasta fines del año 2009 con periodos de 5 a 7 meses. Además, hay otros 2 núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 1 a 3 meses para los dominios de tiempo de los años de mediados del 2006 y

mediados del 2009. También se puede identificar que 2 núcleos son influenciados por el efecto de El Niño (fase contraria), y 1 núcleo es influenciado por ambos efectos y fases.

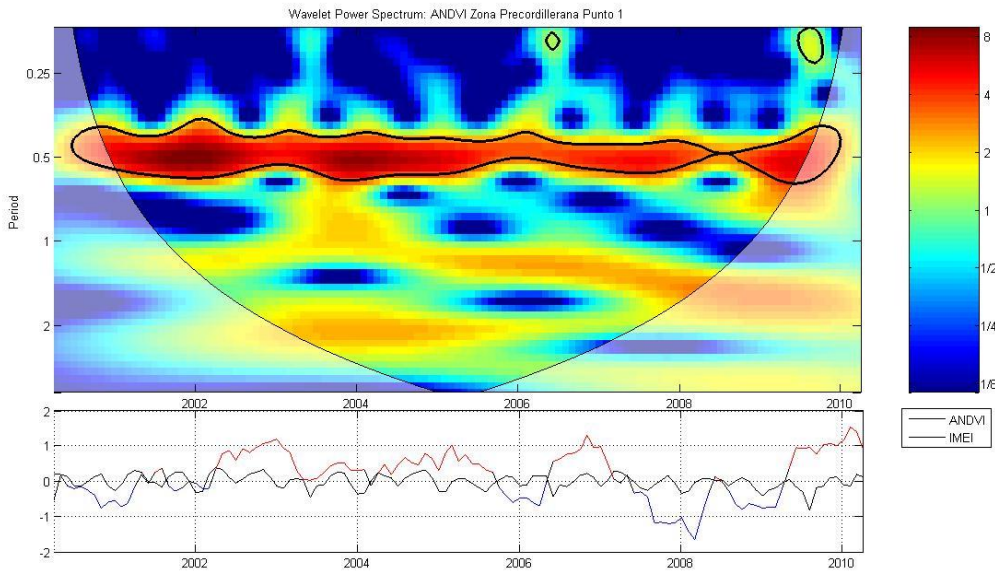


Figura 64. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Precordillerana (Punto 1)

En la figura 65, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra una banda de alta potencia espectral ($\sim 8[r. h.]^2$), la cual cubre el intervalo de tiempo de fines del 2000 hasta fines de 2009 con periodos de 4 a 9 meses. También se puede identificar un gran núcleo que es influenciado por ambos efectos y fases.

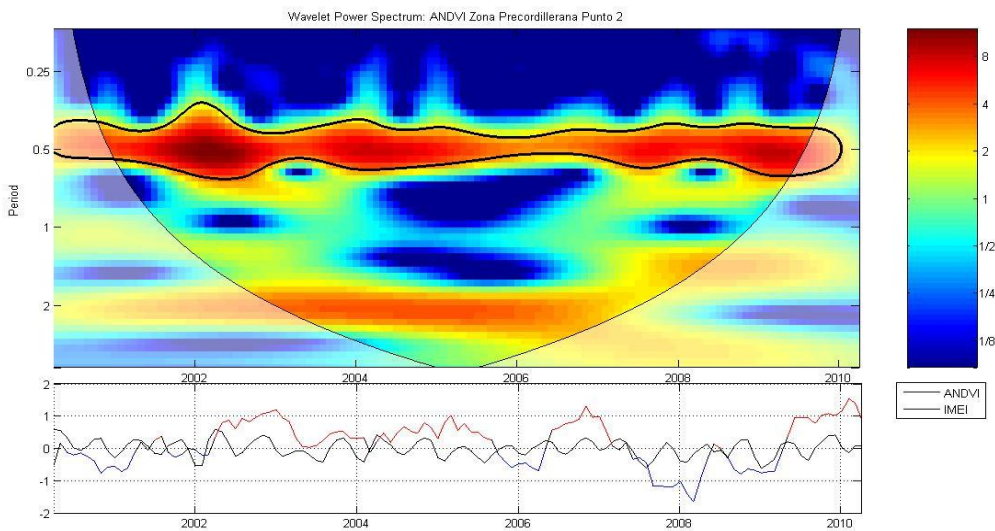


Figura 65. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Precordillerana (Punto 2)

En la figura 66, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un núcleo de mediana potencia espectral ($\sim 1[r. h.]^2$), la cual cubre el intervalo de tiempo de fines del año 2006 hasta mediados del año 2009 con periodos de 5 a 9 meses. Además, hay otros núcleos de menor potencia espectral, con periodos de 1 a 4 meses (2 núcleos) para principios del año 2003, mediados del 2004 y periodos de 5 a 6 meses (1 núcleo) para fines del año 2002 y principios del año 2003. También se puede identificar que 3 núcleos son influenciados por el efecto de El Niño (2 en fase contraria y 1 en fase directa), y 1 núcleo es influenciado por ambos efectos con fase contraria.

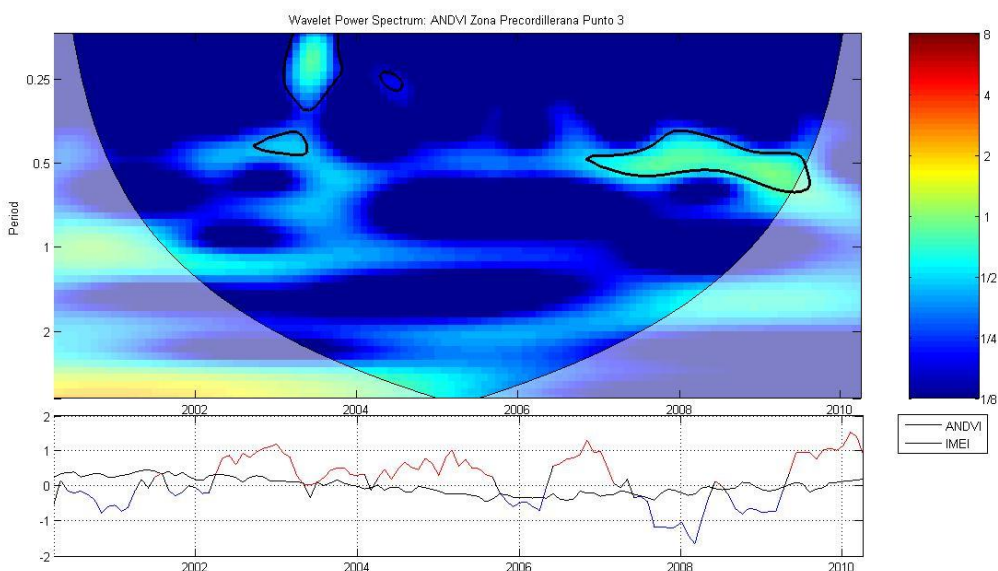


Figura 66. Transformada Wavelet Continua ANDVI – Zona Precordillerana (Punto 3)

En síntesis, según el análisis de Transformada Wavelet Continua, para las anomalías de las series NDVI Zona Precordillerana, se destaca 1 núcleo importante por análisis ya sean de mediana y alta potencia espectral. El núcleo de mediana potencia espectral posee un periodo de aparición de 5 a 9 meses para principios del año 2003 y para fines del año 2006 hasta mediados del año 2009; y el de alta potencia espectral ($\sim 8[r. h.]^2$) tiene como periodo de aparición: de 5 a 7 meses y de 4 a 9 meses para los dominios de tiempo de a fines del año 2000 hasta a fines del año 2009. Para este conjunto de anomalías NDVI, en las bandas de mayor poder espectral se observó que presentan los efectos de El Niño y La Niña como también las fases directas y contrarias. Se destaca de igual manera que los núcleos de menor potencia espectral son generalmente influenciados por el efecto de El

Niño (fase contraria). Por lo tanto, en términos interanuales el comportamiento de la NDVI se ve afectado por los impactos ya sea de El Niño y La Niña, mayormente con fase contraria en zona precordillerana.

7.5.3. Transformada Wavelet Cruzada ATST vs ANDVI

En esta sección se aplicara la metodología de la Transformada Wavelet Cruzada, sobre las Anomalías asociadas a las series de tiempo de las variables TST y NDVI, extraídas de las zonas de estudio. El fin de este análisis es evaluar la relación entre pares de Anomalías, en términos de tiempo-frecuencia, y dominación de una variable sobre otra en términos interanuales, es decir, visualizar el periodo de tiempo y frecuencia en que la relación es importante en términos de potencia espectral, identificar si las anomalías de las variables están en fase o desfase (crecen, decrecen juntas o poseen comportamientos inversos) y la posible dominación o influencia de una variable sobre la otra en los pares de series.

7.5.3.1. Transformada Wavelet Cruzada ATST vs ANDVI – Zona Costera

En la figura 67, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra dos núcleos de mediana potencia espectral, en torno a periodos de 6 a 7 meses, para el dominio de tiempo de a principios del 2002 y en periodos de 5 a 7 meses para el dominio de tiempo de a fines del 2003 hasta principio del 2005. Además, se observa que las dos anomalías de las variables presentan una relación de desfase entre ellas, donde se identifica una dominación de las ATST sobre ANDVI, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa con respecto al eje coordenado del tiempo y una dirección positiva con respecto al eje del periodo. Además, hay otros núcleos (~4 núcleos), de menor potencia espectral, con periodos entre 1 a 4 meses, para los años 2001, 2002, 2003 y 2005-2006, donde 3 de ellos, destacan la relación de fase entre las anomalías, con una dominación ejercida por las ANDVI sobre las ATST, ya que el ángulo de fase posee una dirección positiva, con respecto al eje coordenado del tiempo, y una dirección negativa con respecto al eje del periodo. El núcleo restante tiene

una relación de desfase entre las anomalías evaluadas, destacando la dominación de las ANDVI sobre las ATST.

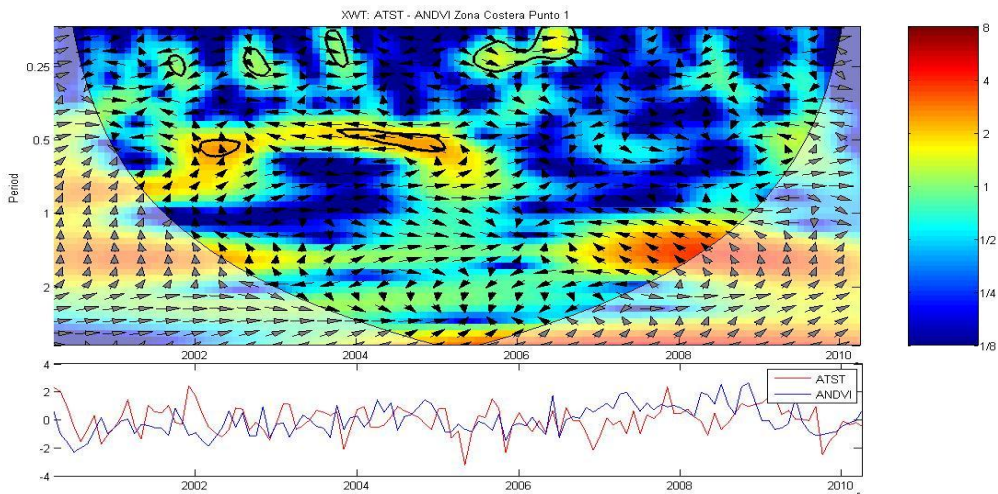


Figura 67. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Costera (Punto 1)

En la figura 68, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un núcleo de mediana potencia espectral, en torno a periodos de 3 a 6 meses, para el dominio de tiempo del año 2009. Además, se observa que las dos anomalías de las variables presentan una relación de desfase entre ellas, donde se identifica una dominación de las ATST sobre las ANDVI, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa con respecto al eje coordenado del tiempo y una dirección positiva con respecto al eje del periodo. Además, hay otros núcleos (~4 núcleos), de menor potencia espectral, con periodos entre 2 a 4 meses, para los años 2003, 2005 y 2006, donde en 2 de ellos, se destaca la relación de fase entre las anomalías, con una dominación ejercida por las ANDVI sobre las ATST (año 2003) y una dominación ejercida por las ATST sobre las ANDVI (año 2005).

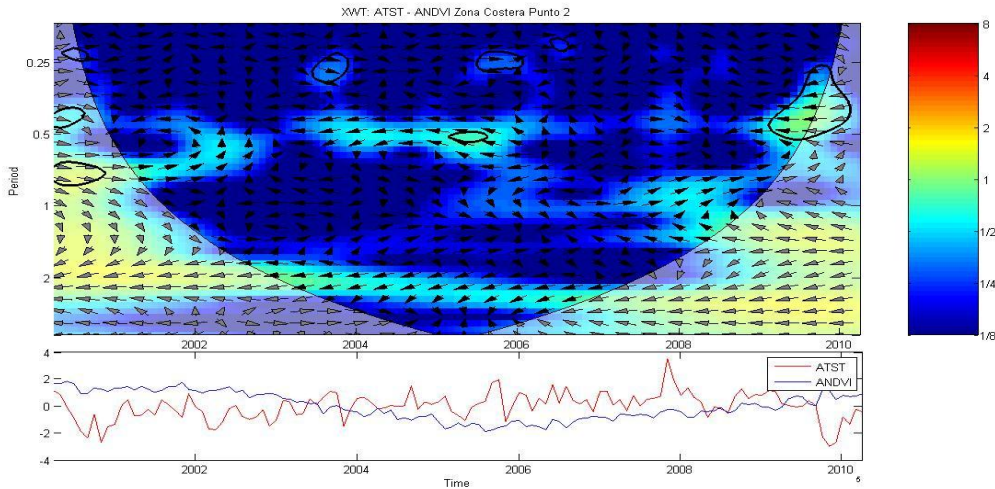


Figura 68. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Costera (Punto 2)

En la figura 69, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra dos núcleos de mediana potencia espectral, en torno a periodos de 4 a 7 meses, para el dominio de tiempo de a fines del 2001 hasta mediados del 2002 y en periodos de 5 a 7 meses para el dominio de tiempo de principios del 2009. Además, se observa que las dos anomalías de las variables presentan una relación de desfase entre ellas, donde se identifica una dominación de las ATST sobre las ANDVI (año 2001-2002) y una dominación de las ANDVI sobre las ATST (año 2009). Además, hay otros núcleos (~3 núcleos), de menor potencia espectral, con periodos entre 1 a 5 meses, para los años 2000, 2006 y 2008, donde en 1 de ellos, destaca la relación de fase entre las anomalías, con una dominación ejercida por las ANDVI sobre las ATST, ya que el ángulo de fase posee una dirección positiva, con respecto al eje coordenado del tiempo, y una dirección levemente negativa con respecto al eje del periodo. Los núcleos restantes tienen una relación de desfase entre las anomalías evaluadas, destacando la dominación de las ANDVI sobre las ATST.

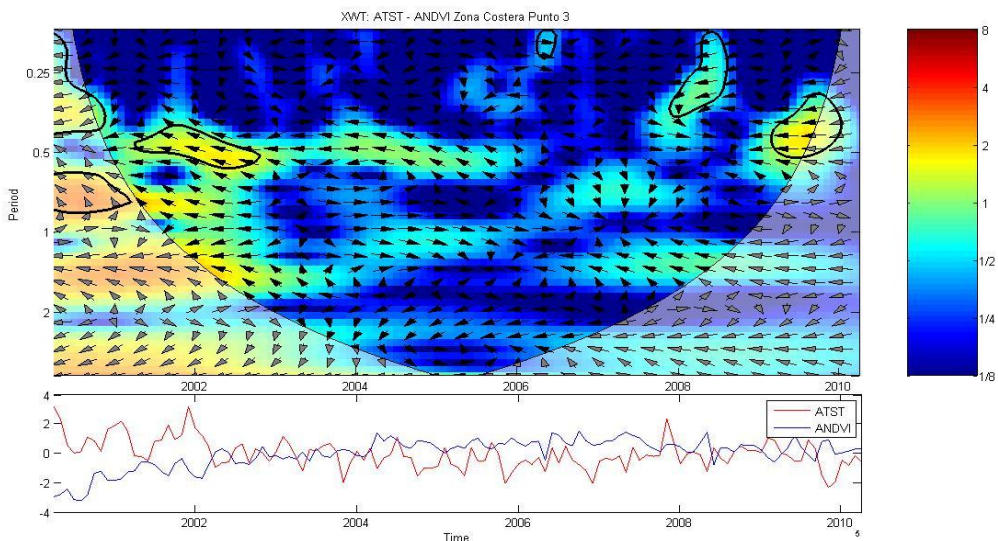


Figura 69. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Costera (Punto 3)

En la figura 70, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un núcleo de alta potencia espectral, en torno a periodos de 14 a 18 meses, para el dominio de tiempo de principios del año 2008. Además, se observa que las dos anomalías de las variables presentan una relación de desfase entre ellas, donde se identifica una dominación de las ATST sobre las ANDVI, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa con respecto al eje coordenado del tiempo y una dirección positiva con respecto al eje del periodo. Además, hay otros núcleos (~4 núcleos), de menor potencia espectral, con periodos entre 1 a 2 meses, para los años 2001 y 2004 y periodos de 5 a 10 meses para los años 2001-2002, 2003-2004. Se destaca la relación de fase entre las anomalías, con una dominación ejercida por las ATST sobre las ANDVI y relación de desfase en los núcleos restante con una dominación ejercida por las ATST sobre las ANDVI (1 núcleo) y una dominación ejercida por las ANDVI sobre las ATST (2 núcleos).

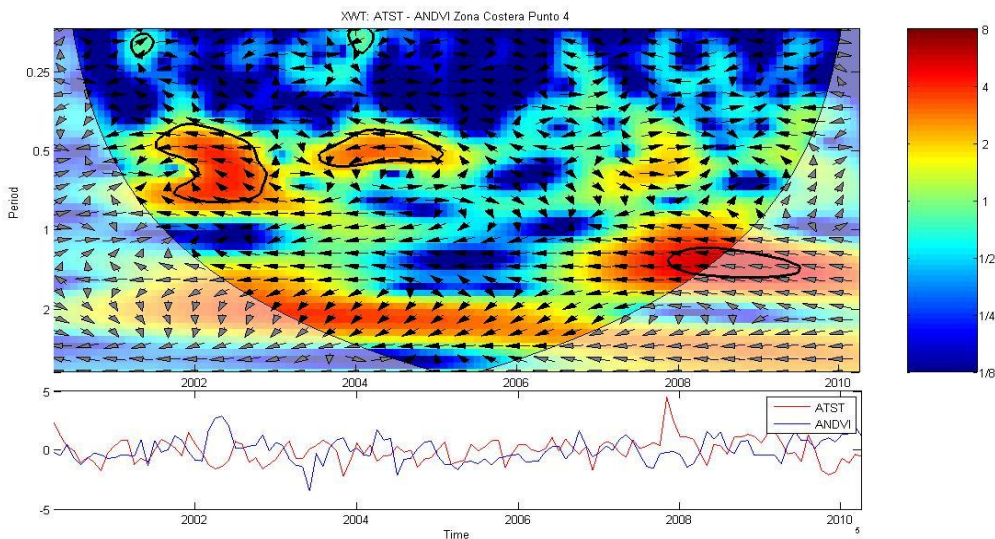


Figura 70. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Costera (Punto 4)

En síntesis, la relación existente entre las anomalías de las series extraídas de TST y NDVI, asociadas a las posiciones de la Zona Costera, evidencia que dicha correlación, converge en núcleos de mediana potencia espectral (~ 1 o 2 por análisis) en torno a periodos de 3 a 7 meses para dominios de tiempo de los años de fines del 2001 hasta mediados del 2002, principios del 2002, fines del 2003 hasta principio del 2005 y 2009; y un núcleo de alta potencia espectral, en torno a periodos de 14 a 18 meses, para el dominio de tiempo de principios del año 2008. Además, se observa que las anomalías presentan una relación de desfase, donde se identifica generalmente una dominación de las ATST sobre las ANDVI. También se logró identificar la existencia de otros núcleos, de menor poder espectral, donde siguen teniendo el patrón de desfase, con dominación de parte de las ATST sobre las ANDVI y viceversa. Solo para periodos muy bajos, se evidencio la relación de fase entre las anomalías (~ 1 a 3 núcleos por análisis), donde sigue reiterándose, el patrón de dominación de las ATST sobre las ANDVI. Por lo tanto, la relación existente entre la TST y el NDVI, en escala interanual, se reduce a un comportamiento de desfase entre las variables, y presunta dominación de la TST, destacándose en el dominio de tiempo de principios del 2008, con un periodo de 14 a 18 meses.

7.5.3.2. Transformada Wavelet Cruzada ATST vs ANDI – Zona Valle Central

En la figura 71, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un núcleo de mediana potencia espectral, en torno a periodos de 4 a 8 meses, para el dominio de tiempo de fines del año 2001 y mediados del año 2002. Además, se observa que las dos anomalías de las variables presentan una relación de desfase entre ellas, donde se identifica una dominación de las ATST sobre las ANDVI, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa con respecto al eje coordinado del tiempo y una dirección positiva con respecto al eje del periodo. Además, hay otros núcleos (~6 núcleos), de menor potencia espectral, con periodos entre 1 a 6 meses, en los dominios de tiempo para los años 2000, 2002, 2003, 2008 y 2009, donde en ~4 de ellos, se destaca la relación de fase entre las anomalías, con una dominación ejercida por las ANDVI sobre las ATST (año 2002 y 2008) y una dominación ejercida por las ATST sobre las ANDVI (año 2000 y 2009). Los 2 núcleos restantes tienen una relación de desfase entre las anomalías evaluadas, destacando la dominación de las ANDVI sobre las ATST.

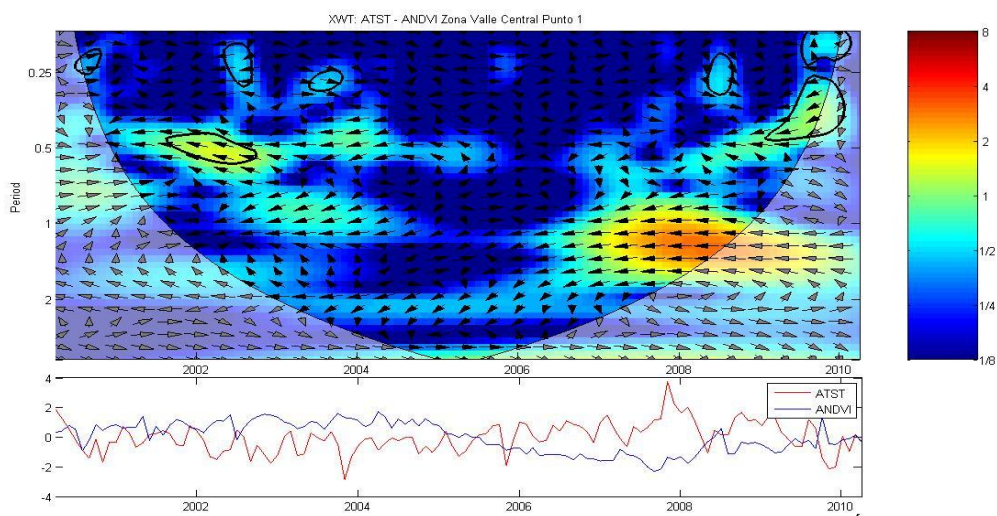


Figura 71. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Valle Central (Punto 1)

En la figura 72, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un núcleo de mediana potencia espectral, en torno a periodos de 4 a 11 meses, para el dominio de tiempo de fines del año 2001 y mediados del año 2002. Además, se observa que las dos anomalías de las variables presentan una relación de desfase entre ellas, donde se identifica una dominación de las ATST sobre las ANDVI, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa con respecto al eje coordenado del tiempo y una dirección positiva con respecto al eje del periodo. Además, hay otros núcleos (~4 núcleos), de menor potencia espectral, con periodos entre 1 a 4 meses (2 núcleos) y de 5 a 8 meses (2 núcleos) para los dominios de tiempo de mediados del año 2003 y fines del año 2004, mediados del año 2005 y año 2009, donde en ~1 de ellos, se destaca la relación de fase entre las anomalías, con una dominación ejercida por las ANDVI sobre las ATST (mediados del 2003 y 2005). Los 3 núcleos restantes tienen una relación de desfase entre las anomalías evaluadas, destacando la dominación de las ANDVI sobre las ATST.

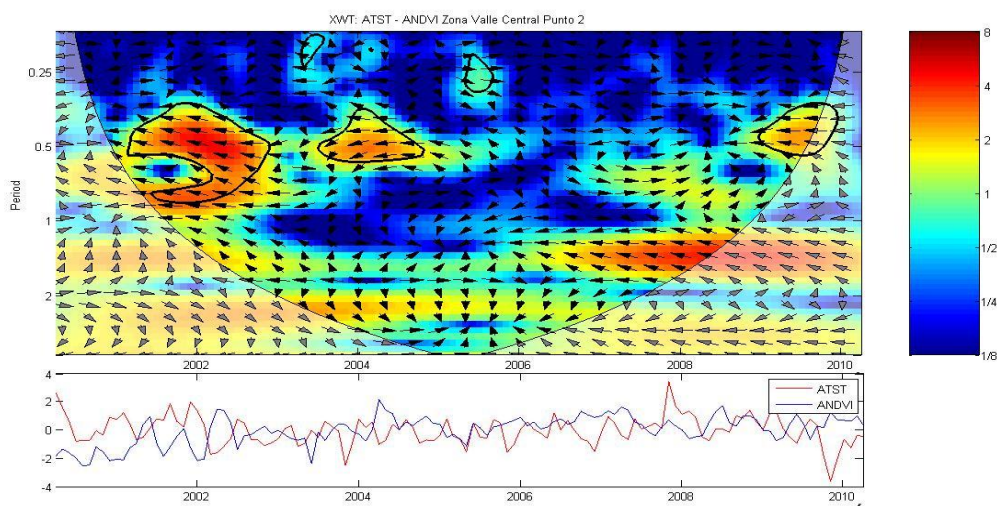


Figura 72. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Valle Central (Punto 2)

En la figura 73, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra un núcleo de alta potencia espectral, en torno a periodos de 4 a 11 meses, para el dominio de tiempo de fines del año 2001 y mediados del año 2002. Además, se observa que las dos anomalías de las variables presentan una

relación de desfase entre ellas, donde se identifica una dominación de las ATST sobre las ANDVI, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa con respecto al eje coordinado del tiempo y una dirección positiva con respecto al eje del periodo. Además, hay otros núcleos (~5 núcleos), de menor potencia espectral, con periodos entre 2 a 7 meses para los dominios de tiempo de los años 2003, 2004, 2005 y 2009, donde en ~4 de ellos, se destaca la relación de desfase entre las anomalías, con una dominación ejercida generalmente por las ANDVI sobre las ATST. El núcleo restante tiene una relación de fase entre las anomalías evaluadas, destacando la dominación de las ATST sobre las ANDVI.

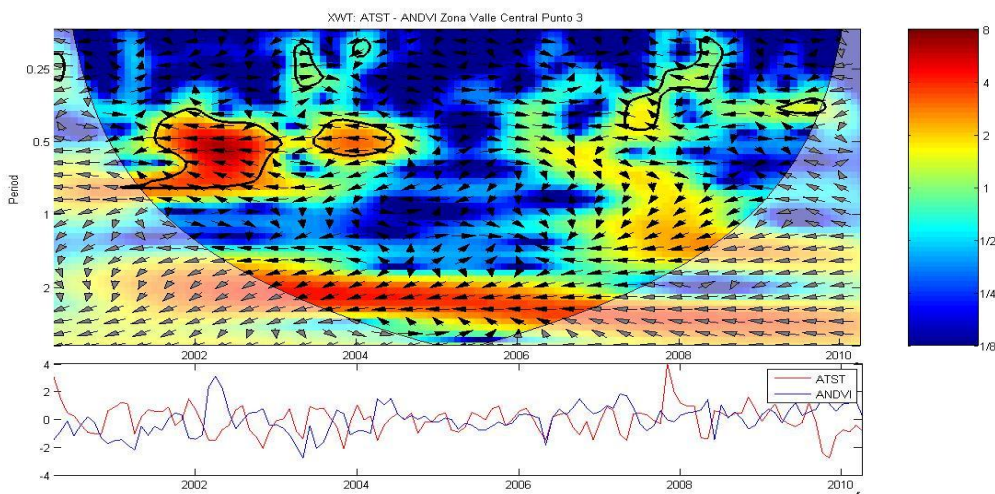


Figura 73. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Valle Central (Punto 3)

En síntesis, la relación existente entre las anomalías de las series extraídas de TST y NDVI, asociadas a las posiciones de la Zona Valle Central, evidencia que dicha correlación, converge en un núcleo ya sea de mediana o alta potencia espectral en torno a periodos de 4 a 11 meses para dominios de tiempo de los años de fines del año 2001 y mediados del año 2002. Además, se observa que las anomalías presentan una relación de desfase, donde se identifica una dominación de las ATST sobre las ANDVI. También se logró identificar la existencia de otros núcleos, de menor poder espectral, donde siguen teniendo el patrón de desfase, generalmente con dominación de parte de las ATST sobre las ANDVI. Solo para periodos muy bajos, se evidencio la relación de fase entre las anomalías (~ 1 a 4 núcleos por análisis), donde la mayoría posee un patrón de dominación de las ATST sobre las ANDVI. Por lo tanto, la relación existente entre la TST y el NDVI, en escala interanual, se reduce a un comportamiento de desfase entre las

variables, y presunta dominación de la TST, destacándose en el dominio de tiempo de fines del año 2001 y mediados del año 2002, con periodo de 4 a 11 meses.

7.5.3.3. Transformada Wavelet Cruzada ATST vs ANDI – Zona Precordillerana

En la figura 74, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra una banda de alta potencia espectral, en torno a periodos de 5 a 7 meses, para el dominio de tiempo de fines del año 2000 hasta a mediados del año 2009. Además, se observa que las dos anomalías de las variables presentan una relación de desfase entre ellas, donde se identifica una dominación de las ANDVI sobre las ATST, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa con respecto al eje coordenado del tiempo y del periodo. Además, hay un núcleo de menor potencia espectral, con periodos entre 1 a 3 meses para los dominios de tiempo de los años 2006, donde se destaca la relación de desfase entre las anomalías, con una dominación ejercida levemente por las ATST sobre las ANDVI.

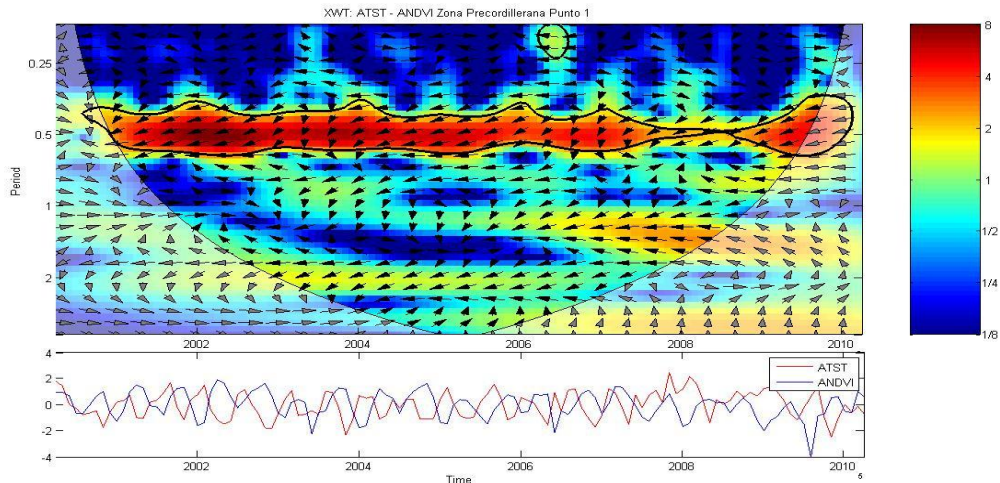


Figura 74. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Precordillerana (Punto 1)

En la figura 75, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra dos marcadas bandas de alta potencia espectral, en torno a periodos de 4 a 9 meses y de 4 a 7 meses, para el dominio de tiempo de fines del año 2000 hasta mediados del año 2007 y principios del año 2008 hasta el año 2009. Además, se observa que las dos anomalías de las variables presentan en los núcleos una relación de desfase entre ellas, donde se identifica una dominación de las ANDVI sobre las ATST, ya que el ángulo de fase posee una dirección negativa con respecto al eje coordenado del tiempo y del periodo.

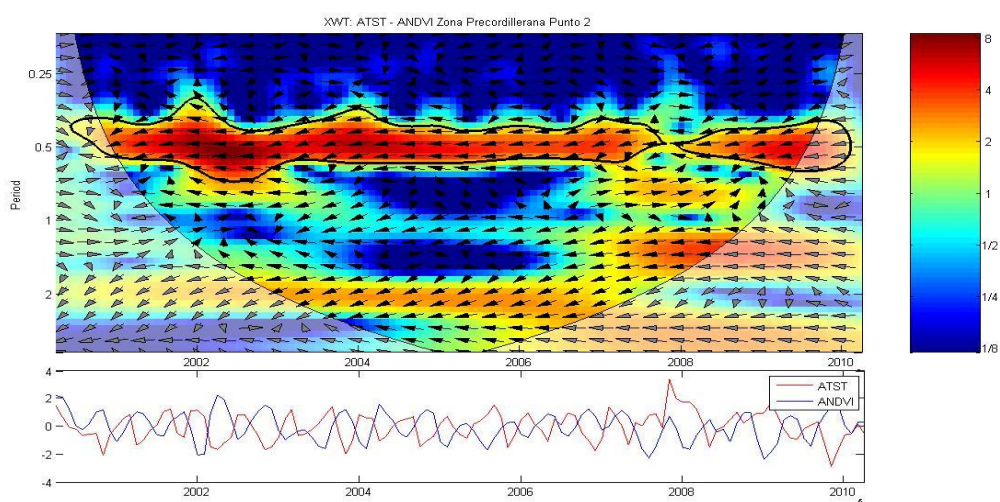


Figura 75. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Precordillerana (Punto 2)

En la figura 76, se obtuvo un mapa espectral en el espacio del tiempo y periodo. Donde el contorno grueso negro designa el 5% de nivel de significación tanto contra el ruido y el cono de influencia. Esta figura muestra dos núcleos de mediana potencia espectral, en torno a periodos de 5 a 7 meses, para el dominio de tiempo del año 2003 y 2008-2009. Además, se observa que las dos anomalías de las variables presentan una relación de fase (año 2003) y desfase (2008-2009) entre ellas, donde se identifica una dominación de las ANDVI sobre las ATST. Además, hay otros núcleos (~5 núcleos), de menor potencia espectral, con periodos entre 1 a 4 meses, para los años 2003, 2005 y 2006 y periodos de 4 a 6 meses para los años 2000 y 2001-2002, donde en 2 de ellos, se destaca la relación de fase entre las anomalías, con una dominación ejercida por las ANDVI sobre las ATST, en un núcleo (año 2003) existe una relación de fase y desfase con dominación de las

ATST sobre las ANDVI. Los dos núcleos restantes tienen una relación de desfase entre las anomalías evaluadas, destacando la dominación de las ANDVI sobre las ATST.

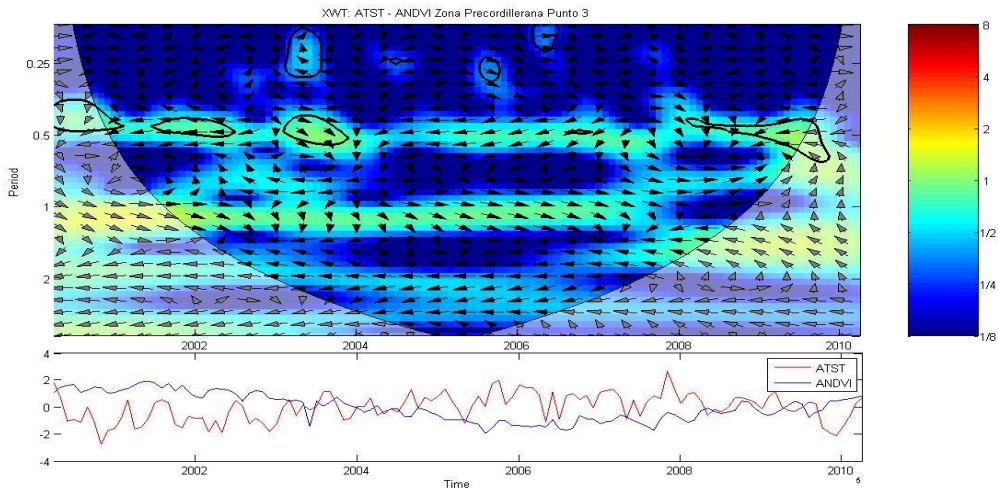


Figura 76. Transformada Wavelet Cruzada Interanual ATST vs ANDVI Zona Precordillerana (Punto 3)

En síntesis, la relación existente entre las anomalías de las series extraídas de TST y NDVI, asociadas a las posiciones, evidencia que dicha correlación, converge en ~ 1 o 2 núcleos ya sea de mediana o alta potencia espectral en torno a periodos de 4 a 9 meses para dominios de tiempo de los años de fines del 2000 hasta a mediados del 2009, fines del 2000 hasta a mediados del 2007, año 2003 y principios del año 2008 hasta el año 2009. Además, se observa que las anomalías presentan una relación de desfase, donde se identifica una dominación generalmente de las ANDVI sobre las ATST. También se logró identificar la existencia de otros núcleos, de menor poder espectral, donde siguen teniendo el patrón de desfase, generalmente con dominación de parte de las ATST sobre las ANDVI. Solo para periodos muy bajos, se evidencio la relación de fase entre las anomalías (~ 0 a 2 núcleos por análisis), donde poseen patrones de dominación de las ATST sobre las ANDVI y viceversa. Por lo tanto, la relación existente entre la TST y el NDVI, en escala interanual, se reduce a un comportamiento de desfase entre las variables, y presunta dominación del NDVI, destacándose en el dominio de tiempo de fines del 2000 hasta a mediados del 2009, con periodo de 4 a 9 meses.

8. Conclusiones

En la escala anual:

- La TST muestra un marcado comportamiento estacional en las tres zonas de estudio (Costa, Valle Central y Precordillera), como se muestran desde la Figura 6 a la Figura 15,
- La NDVI, muestra un comportamiento generalmente estacional pero a periodos específicos de tiempo para las distintas zonas. (Ver, Figuras 16 a 25)
- Con respecto a la relación compartida entre la TST y el NDVI, se observa que:
 - En Zona Costera y Zona Valle central, la relación es generalmente a nivel estacional puesto que en el estudio se encontró series (1 en cada zona) en donde la estacionalidad es de forma parcial. En estas zonas las variables presentan una relación de desfase, logrando identificar que generalmente las TST dominan el NDVI en la Zona Valle Central y la NDVI domina a la TST en la Zona Costera (Ver, Figuras 26 a 32).
 - En Zona Precordillerana, la relación es a nivel estacional, donde las variables presentan una relación de fase, logrando identificar que generalmente la TST domina al NDVI. (Ver, Figuras 33 a 35)

En la escala Interanual:

- Según el análisis de Transformada Wavelet Continua, sobre las ATST, se destaca un importante núcleo de alta potencia espectral para todas las zonas en estudio, catalogados por periodos de: 4 a 8 meses para los dominios de tiempo 2001-2007 y 2002-2004, 9 a 11 meses para los dominios de tiempo de 2001 y de 14 a 18 meses, para los dominios de tiempo de 2008. Además, se observó mayormente la gran influencia del evento de El Niño (fase contraria) en las ATST de las 3 zonas en estudio. (Ver, Figuras 47 a 56)

- Según el análisis de Transformada Wavelet Continua sobre las ANDVI se tiene que:
 - En Zona Costera se destacan núcleos (~1 o 2 por análisis) ya sean de baja (1 serie), mediana (2 series) y alta potencia espectral (1 serie); donde el núcleo de mayor potencia espectral tiene un periodo de 25 a 27 meses para el año 2003. Además, se observó mayormente la gran influencia del evento de El Niño (fase directa) en las ANDVI. (Ver, Figuras 57 a 60)
 - En Zona Valle Central se destaca 1 núcleo importante por análisis ya sean de mediana y alta potencia espectral. El núcleo de mediana potencia espectral posee un periodo de aparición de 5 a 8 meses para el año 2008 y el de alta potencia espectral tiene como periodo de aparición: de 4 a 9 meses para los dominios de tiempo de a fines del 2000 hasta a mediados de 2002 y de 24 a 30 meses para el dominio de tiempo de a fines del 2002 hasta principio de 2005. Además, se observó mayormente la gran influencia del evento de El Niño (fase directa) en las ANDVI. (Ver, Figuras 61 a 63)
 - En Zona Precoastal, se destaca 1 núcleo importante por análisis ya sean de mediana y alta potencia espectral. El núcleo de mediana potencia espectral posee un periodo de aparición de 5 a 9 meses para principios del año 2003 y para fines del año 2006 hasta mediados del año 2009; y el de alta potencia espectral tiene como periodo de aparición: de 5 a 7 meses y de 4 a 9 meses para los dominios de tiempo de a fines del año 2000 hasta a fines del año 2009. Además, se observó que esta zona es afectada ya sea, por los impactos de El Niño y La Niña y mayormente presenta fase contraria. (Ver, Figuras 64 a 66)
- La relación existente, entre las anomalías de las series extraídas de TST y NDVI, analizadas mediante la Transformada Wavelet Cruzada para las zonas:
 - Zona Costera, converge en núcleos de mediana potencia espectral (~1 o 2 por análisis) en torno a periodos de 3 a 7 meses para dominios de tiempo 2001-2002, 2003-2005 y 2009; y un núcleo de alta potencia espectral, con periodos de 14 a 18 meses, para el dominio de tiempo de principios del año 2008, donde se presentan una relación de desfase, y se identifica generalmente una dominación de las ATST sobre las ANDVI. También se logró identificar otros núcleos de menor poder espectral, donde se siguen observando las

características anteriores. Por lo tanto, la relación existente entre la TST y el NDVI, en escala interanual, se reduce a un comportamiento de desfase entre las variables, y presunta dominación de la TST, destacándose en el dominio de tiempo principios del 2008, con un periodo de 14 a 18 meses. (Ver, Figura 67 a 70)

- Zona Valle Central, converge en un núcleo ya sea de mediana o alta potencia espectral en torno a periodos de 4 a 11 meses para dominios de tiempo de 2001-2002, donde se observa una relación de desfase entre las variables y se identifica una dominación de las ATST sobre las ANDVI. También se logró identificar otros núcleos de menor poder espectral, donde se siguen observando las características anteriores. Por lo tanto, la relación existente entre la TST y el NDVI, en escala interanual, se reduce a un comportamiento de desfase entre las variables, y presunta dominación de los TST, destacándose en el dominio de tiempo de fines del año 2001 y mediados del año 2002, con un periodo de 4 a 11 meses. (Ver, Figura 71 a 73)
- Zona Precordillerana, converge en núcleos (~1 o 2 por análisis) ya sea de mediana o alta potencia espectral en torno a periodos de 4 a 9 meses para dominios de tiempo de 2000-2009, 2000-2007, 2003 y 2008-2009, donde se observa un comportamiento de desfase, y se identifica una dominación de las ANDVI sobre las ATST. También se logró identificar la existencia de otros núcleos, de menor poder espectral, donde siguen teniendo el patrón de desfase, generalmente con dominación de parte de las ATST sobre las ANDVI. Por lo tanto, la relación existente entre la TST y el NDVI, en escala interanual, se reduce a un comportamiento de desfase entre las variables, y presunta dominación del NDVI, destacándose en el dominio de tiempo de fines del 2000 hasta a mediados del 2009, con un periodo de 4 a 9 meses. (Ver, Figura 74 a 76)

9. Bibliografía

- EMERY, William J. and THOMSON Richard E. "Data analysis methods in physical oceanography", Second and revised edition. San Diego, USA. ELSEVIER Inc., 2004.
- FAUNDEZ, Pablo y FUENTES, Álvaro. "Procesamiento digital de señales acústicas utilizando Wavelets", Valdivia, Chile. Instituto de Matemáticas UACH.
- BAEZA Sandoval, Carolina. "Variabilidad Espacial y Temporal de la Temperatura Superficial de la Tierra (TST) en la Zona Centro Sur de Chile (V-VII-VIII)". Tesis (Pregrado de Ingeniería Estadística). Concepción, Chile. Universidad del Bío-Bío, Dpto. de Estadística, 2010.
- VARGAS Muñoz, Angela. "Variabilidad Espacio Temporal del Índice de Vegetación NDVI en la Octava Región (2000-2010)". Tesis (Pregrado de Ingeniería Estadística). Concepción, Chile. Universidad del Bío-Bío, Dpto. de Estadística, 2010.
- CASTAÑO, Elkin y MARTINEZ, Jorge. "Uso de la función cruzada en la identificación de modelos ARMA". Revista Colombiana de Estadística Diciembre 2008, volumen 31, no.2, pp. 293 a 310.
- MARTINEZ COLLANTES, J. "Uso de la función de correlación cruzada en la identificación de modelos para series de tiempo estacionarias y no estacionarias". XIV Jornadas en Estadística e Informática Centro de Estudios e Investigaciones Estadísticas Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil Octubre de 2007.
- FALLAS, Jorge. "Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones". 2007.
- MATLALCUATZI Rugerio, Francisca, "Análisis Espectral de series temporales de temperaturas y su aplicación al estudio de su comportamiento en una red de observatorios meteorológicos", 2006.
- MERTINS, Alfred, "Signal Analysis, Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications". Universidad de Wollongong, Australia, 1999.
- CÁCERES, Juan Pablo, "Transformada de Fourier". Stanford University, 2007.
- GÓMEZ, Juan Carlos, "Procesamiento de Señales basado en Wavelets". Universidad Nacional de Rosario, Argentina, 2006.
- Manuales de Matlab.