

**INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
COORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA
SUBCOORDINACIÓN DE HIDROMETEOROLOGÍA**

INFORME FINAL

***“Análisis de metodologías para monitorear y
estimar escenarios de la ocurrencia de sequía
a corto, mediano y largo plazo para México
(TH1325.1)”***

Diciembre, 2013

Participantes:

Olivia Rodríguez López
Gabriela Colorado Ruiz
Jorge Sánchez Sesma
Roberto Mercado Escalante
Guillermo García Grijalva
Ma. Del Rosario Ayala Enríquez
Angel Alfonso Rojas Castro

Índice

Participantes:.....	1
Introducción.....	1
Objetivos Principales:.....	2
Objetivos Secundarios:	2
1. SISTEMAS DE MONITOREO DE SEQUÍAS EN EL MUNDO.....	3
1.1 Canadá.....	3
1.1.1 Metodología	5
1.2 Argentina.....	8
1.2.1 Metodología.....	9
1.3 India.....	17
1.3.1 Metodología.....	18
1.4 Australia.....	25
1.4.1 Metodología.....	26
1.5 El Monitor de Sequía de los Estados Unidos (USDM).....	31
1.5.1 Metodología.....	32
1.6 Monitor de Sequía de Norteamérica (NADM).....	35
1.6.1 Información disponible para el monitor de sequía	37
2. INDICADORES DE SEQUÍA UTILIZADOS EN MÉXICO	56
2.1 Índice Estandarizado de Precipitación.....	56
2.2 Índice de sequía severa de Palmer.....	60
2.3 Anomalías de Precipitación.....	67
2.4 Índice de Diferencia Normalizada de la Vegetación.....	68
2.5 Índice de Salud de la Vegetación.....	70
2.6 Anomalía de Temperatura.....	71
2.7 Porcentaje de disponibilidad de agua en presas	72
2.8 Modelo de Humedad del Suelo Leaky Bucket.....	72

2. 9	El Monitor de Sequía de Norteamérica	75
3.	PERSPECTIVA DE SEQUÍA.....	77
3.1	Descripción de la perspectiva de la sequía generada por el IRI.....	77
3.2	Perspectiva de sequía mensual y estacional de EUA “Outlook Drought”.....	80
3.2.1	Condiciones iniciales, Monitor de sequía.....	81
3.2.2	Condiciones iniciales, Climatología.....	82
3.2.3	Condiciones iniciales, ENSO.....	83
3.2.4	Condiciones iniciales, Oscilación Madden-Julian.	84
3.2.5	Pronósticos oficiales de anomalía de temperatura y precipitación de 6 - 10 días y 8 – 14 días.....	85
3.2.6	Pronóstico de precipitación del NAEFS y ESRL-GEFS.....	88
3.2.7	Pronóstico a 14 días, perspectiva mensual y estacional de la humedad del suelo.....	90
3.2.8	Perspectivas de modelos dinámicos CFSv2, NMME, e IMME.	92
3.2.9	Pronóstico de precipitación acumulada a 7 días del WPC.	96
3.2.10	Perspectivas mensuales y trimensuales oficiales del CPC de Temperatura y Precipitación.....	97
3.2.11	Generación de la perspectiva mensual y estacional.....	105
3.2.12	Verificación de la perspectiva de sequía.....	108
4.	VALIDACIÓN DEL MODELO CFS Y GENERACIÓN DE PRONÓSTICO ESTACIONAL.....	110
4.1	Metodología.....	110
4.2	Descripción del Modelo climático CFS.....	112
4.2.1	Estructura de las simulaciones.....	113
4.3	Descripción de ERA-Interim	114
4.3.1	Descarga de datos de ERA-Interim.....	115
4.3.2	Procesamiento de los datos de ERA-Interim	119
4.4	Homogeneización de bases de datos	123
4.5	Validación del Modelo CFS.	125
4.5.1	Validación cualitativa.	125
4.5.2	Validación cuantitativa.....	126
4.6	Pronóstico estacional - Terciles.	128
4.7	Resultados.....	129
4.7.1	Homogeneización de bases de datos de CFS y ERA-Interim.	129
4.7.2	Validación del Modelo CFS (cualitativa y cuantitativa)	133
4.7.3	Pronóstico estacional – Terciles.....	151
5.	TENDENCIAS CLIMÁTICAS.....	157
5.1	Introducción.....	157

5.2 Conceptos multifractales para el análisis de los procesos climáticos	159
5.3 Resultados.....	162
5.3.1 Análisis multifractal de información climática procesada por el CRU	162
5.3.2 Análisis multifractal de los procesos climáticos de escala hemisférica ENSO	169
5.3.3 Método de curva de masas	171
5.3.4 Método de descomposición.....	171
CONCLUSIONES.....	176
ANEXO A (CÓDIGO FUENTE DEL PUNTO 1)	179
ANEXO B (CÓDIGO FUENTE DEL PUNTO 4)	183
ANEXO C (CÓDIGO FUENTE DEL PUNTO 5).....	221
DESARROLLO Y ADAPTACIÓN DE TÉCNICAS NUMÉRICAS EN LOS DOMINIOS DE LA FRECUENCIA, EL TIEMPO Y EL ESPACIO, DE LA INFORMACIÓN HIDROCLIMÁTICA DE MÉXICO Y LOS EUA, Y DE LOS ÍNDICES DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA	221
REFERENCIAS.....	269
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS.....	278

Índice de figuras

Figura 1. 1 El sitio web http://www.agr.gc.ca/eng/?id=1326402878459 , (disponible en inglés y francés) del Departamento de Agricultura y Agroalimentario de Canadá, dependiente a su vez del gobierno de Canadá, alberga el Drought Watch, cuya información es desplegada mediante mapas.	3
Figura 1. 2 En los submenús, current conditions y map archive, se pueden acceder a mapas de condiciones actuales e históricas (desde el 2006), para diversos parámetros, principalmente de precipitación, temperatura e índices orientados hacia la sequía.	4
Figura 1. 3 Algunos ejemplos de los productos disponibles enfocados en la sequía, Índice de Sequía de Palmer, Índice Estandarizado de Precipitación y días con baja precipitación.	6
Figura 1. 4 Mapa de zonas registradas con impacto de sequías para territorio canadiense, que a su vez forma parte del reporte general de sequías.	7
Figura 1. 5 Sitios web http://www.crean.unc.edu.ar/index.html de la unidad de investigación CREAN (Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales), que forma parte de la Facultad de Ciencias agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina) y http://www.smn.gov.ar/serviciosclimaticos/index.php perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional argentino , organismos que trabajan en colaboración para la elaboración de productos relacionados con la sequía en Argentina.	8
Figura 1. 6 Productos disponibles en el sitio web del CREAN, correspondientes de arriba abajo con: Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), Índice de Sequía de Palmer (PDI) y el Índice de Humedad de Cultivos, con los que calculan la sequía en la región argentina, aunque no se da más información detalla al respecto.	11
Figura 1. 7 Información climática correspondiente al Índice Estandarizado de Precipitación a 1,3,6,12,18 y 24 meses, para una región en particular, que puede visualizarse desde el sitio web del Servicio Meteorológico Nacional argentino, junto con valores comparativos estadísticos de ese mismo índice por localidad.	12
Figura 1. 8 Información agroclimatológica disponible sobre estado de saturación de humedad de los suelos, por semana y para una estación en particular, en ese caso, se muestra el balance hídrico comprendido desde el mismo mes del año en curso, pero partiendo desde el año antepasado, es decir, desde septiembre de 2011; en la línea negra, la gris es el balance hídrico para el mismo mes pero del periodo inmediato anterior y la punteada es el promedio del balance hídrico del período 2000-2009. La escala de colores en ambos casos, tanto para el mapa como para el gráfico, es la misma.	12
Figura 1. 9 Mapas de vigilancia de precipitación para toda Argentina, el primero, partiendo de izquierda a derecha, corresponde a la precipitación acumulada para la primer semana del mes de septiembre en mm, el segundo a anomalías de precipitación acumulada en mm y el tercero a frecuencias de días con o sin precipitación. Las semanas, son referidas o llamadas “décadas”. ...	13
Figura 1. 10 Mapas por regiones, en este caso, la cuenca de La Plata, partiendo de arriba abajo y de izquierda derecha, el primero corresponde a la precipitación estimada para la segunda	

quincena de septiembre en mm, la siguiente en ese orden, corresponde a la precipitación acumulada para esa zona y por último, la anomalía de precipitación acumulada en mm. El primer mapa se construye a partir de datos satelitales, los dos últimos, a partir de datos de observados obtenidos de las estaciones meteorológicas en superficie..... 13

Figura 1. 11 Distribución de las estaciones meteorológicas en Argentina junto con su altitud, a cargo de su Servicio Meteorológico Nacional. 15

Figura 1. 12 Mapas de índices asociados a la vegetación, el primero, de izquierda a derecha, representa la cantidad y el vigor de la vegetación (actividad fotosintética), a través del índice de vegetación normalizado (NDVI), obtenido a partir de imágenes satelitales del NOAA-18 y NOAA-19 /AVHRR con 1 km de resolución, recibidas y procesadas en el Departamento Teledetección y Aplicaciones Ambientales del SMN argentino. Los tonos marrón y verde representan la gradación de la vegetación, de escasa/débil a densa/vigorosa y se actualizan cada diez días. Utilizan una técnica de composición temporal, para eliminar las nubes. El otro mapa, corresponde al EVI, el cual es procesado con datos del sensor MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer), a bordo de los satélites Aqua y Terra, por la NASA y con una resolución espacial 5 Km..... 16

Figura 1. 13 Sitio web <http://www.dsc.nrsc.gov.in/DSC/Drought/index.jsp#> del Centro de Decisión y Asistencia de la India, organismo encargado de emitir alertas ante diversos fenómenos que puedan resultar una amenaza en territorio indio, tales como ciclones, incendios forestales, inundaciones y sequías y del departamento de Meteorología de la India DMI, http://www.imd.gov.in/main_new.htm , en cuyo apartado, referido a monzón, se encuentra la información disponible al monitoreo de lluvias..... 17

Figura 1. 14 Estructura del sistema de alerta y declaración de sequías para la India, derivado del proyecto NADAMS. 19

Figura 1. 15 De arriba a abajo, mapa de condiciones de sequía por distritos de acuerdo al reporte de septiembre de 2012 y de índices de NDVI y de humedad del suelo para toda la India, calculados de la información satelital del AVHRR de la NOAA para la primera y segunda quincena de septiembre..... 22

Figura 1. 16 Mapa de lluvia acumulada semanal en mm para todo el territorio de la India por distritos, el código de colores indican porcentajes de exceso o déficit de lluvias, los números en grande muestran los valores medios y los pequeños, la lluvia real registrada. Se interpreta en función si es antes o después de la época del monzón. 22

Figura 1. 17 Lluvia acumulada semanal expresada en porcentajes, los colores indican el grado de abundancia o escasez de lluvia, para todos los distritos en la India. Se interpreta en función si es antes o después de la época del monzón..... 23

Figura 1. 18 Arriba, mapas de lluvia acumulada de los últimos 4 meses, del 1 de junio al 30 de septiembre, mostrando los valores registrados, el valor normal o medio y la anomalía, abajo, series de tiempo de lluvia diaria y lluvia acumulada para el mismo periodo. 24

Figura 1. 19 Sitio web http://www.bom.gov.au/climate/drought/drought_links.shtml, correspondiente al Buró Australiano de Meteorología. 25

Figura 1. 20 En la sección de perspectivas estacionales, se pueden consultar panoramas para precipitación, temperatura, El Niño/La Niña, ciclones tropicales, etc. Se pueden consultar archivos previos, así como las condiciones actuales y acceso a los datos.	26
Figura 1. 21 Mapa de prospectivas de precipitación en porcentajes a 3 meses para toda Australia, de acuerdo al modelo POAMA.....	27
Figura 1. 22 Algunos productos disponibles de monitoreo de condiciones de El Niño 3.4, que es la zona referida que afecta principalmente a Australia. De arriba abajo y de izquierda a derecha, variación índice de la Oscilación del Sur desde enero del 2011, anomalías de la temperatura superficial del mar para el Pacífico y anomalía de vientos del oeste desde abril del año en curso (2013).	28
Figura 1. 23 Mapas de condiciones actuales para Australia, las cuales se encuentran disponibles a diario, de arriba abajo y izquierda a derecha, índice de vegetación diferenciado (NDVI), presión de vapor en mb (humedad).	29
Figura 1. 24 Sitio web que alberga al monitor de sequía de los Estados Unidos, que consiste en un mapa que despliega información actual sobre la situación de sequía en territorio norteamericano. http://droughtmonitor.unl.edu/	31
Figura 1. 25 Nivel de severidad de las sequías, basados en percentiles de ocurrencia	34
Figura 1. 26 Indicadores principales utilizados en el monitor de sequía asociados a la magnitud del evento.....	34
Figura 1. 27 Tipos de impacto a como anteriormente describía el monitor de sequía; asociados a la agricultura, agua e incendios (2002). Hoy en día solo se indica si es a corto o largo plazo.	35
Figura 1. 28 Sitio web donde reside el Monitor de Sequía de Norteamérica (NADM), con los enlaces correspondientes a los distintos tipos de indicadores, datos disponibles para la República Mexicana. http://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/nadm/	36
Figura 1. 29 En la subsección de índices de monitoreo y datos, se pueden consultar los índices ya calculados derivados de Palmer y Precipitación Estandarizado para México. Contiene datos de estaciones en México con sus respectivas claves que datan desde 1920. http://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/nadm/indices.php	39
Figura 1. 30 Sitio web de donde pueden obtenerse datos de indicadores relacionados con el estrés hídrico y térmico de las plantas. La malla abarca una amplia franja, dentro de la cual está comprendida la república mexicana. http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/	40
Figura 1. 31 Subsección correspondiente al modelo hídrico del CPC, donde únicamente se pueden consultar mapas de las salidas para las variables modeladas de humedad del suelo, evaporación y runoff.	41
Figura 1. 32 Portal web sede de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad, que se dedica al monitoreo de incendios forestales de forma operativa. http://www.conabio.gob.mx/incendios/	47
Figura 1. 33 Mapa de las regiones hidrológico-administrativas en los que se ha dividido la República Mexicana, administrada por cada organismo de cuenca.....	51

Figura 1. 34 Sistema de pronóstico en ríos de la CONAGUA, que se encarga de medir caudales de ríos, niveles de presas y demás variables afines, a través de los distintos organismos de cuenca, denominados Centros de Pronóstico Regional., http://www.conagua.gob.mx/spr/	53
Figura 1. 35 Reportes de presas por organismos de cuenca dependientes de la CONAGUA, disponibles solo al día.	54
Figura 1. 36 Continuación: reportes de datos hidrométricos.	55
Figura 2. 1 Mapa del Índice SPI correspondiente de enero del 2013 (Tomado de página del SMN)8.	60
Figura 2. 2 Anomalía de precipitación para dos periodos de tiempo. Izquierda para el para el mes de Marzo del 2013. Derecha en promedio para los meses de enero a marzo del 2013. (Tomado del SMN).....	67
Figura 2. 3 Índice de diferencia normalizada de la vegetación para México en la semana 39 del 2013. (Tomado de http://www.star.nesdis.noaa.gov).....	69
Figura 2. 4 Mapa del índice VHI. Izquierda para el 30 de septiembre del 2013 y derecha para el 29 de septiembre del 2012 (Tomado de http://www.star.nesdis.noaa.gov).	71
Figura 2. 5 Izquierda muestra la anomalía de temperatura para marzo del 2013 y derecha número de días con temperaturas mayores a 40°C para el mes de marzo del 2013 (Tomado http://www.cna.gob.mx).	71
Figura 2. 6 Porcentaje de almacenamiento de las principales presas en México para el mes de marzo del 2013. (Tomado de http://www.cna.gob.mx)	72
Figura 3. 1 Mapas generados por el IRI perspectiva de sequía. Izquierda probabilístico, derecha Valor SPI.	77
Figura 3. 2 Perspectivas de sequía generadas por el CPC. Izquierda perspectiva mensual del mes de Noviembre . Derecha perspectiva estacional del trimestre Diciembre, Enero y Febrero.	80
Figura 3. 3 Monitor de sequía de EUA, Izquierda para el 29 de octubre. Derecha para el 26 de noviembre del 2013.	82
Figura 3. 4 Climatología de precipitación (mm/día) EUA y México generada por el CPC en base al periodo 1979-1995. Izquierda para el mes de noviembre. Derecha para el mes de diciembre.	82
Figura 3. 5 Izquierda, condiciones actuales del ENSO; Derecha, pluma de pronósticos dinámicos y estadísticos del IRI/CPC.	83
Figura 3. 6 Relación entre el ENSO y el número de días de precipitación en EUA.	84
Figura 3. 7 Representación de las condiciones de la MJO, velocidad potencial a 200hPa (m2/s). Izquierda periodo del 16 de mayo al 1 de noviembre del 2013. Derecha periodo del 16 de junio al 1 de diciembre del 2013. La Línea negra indica el seguimiento de una propagación hacia el este, representación dela MJO.	85
Figura 3. 8 Pronóstico de alturas geopotenciales a 500 hPa (líneas negras) para su determinación de años análogos (esquina inferior derecha) y la desviación obtenida del pronóstico en relación a lo	

observado en el periodo 1980-2010 (azul, indican valores por debajo del normal y rojo por arriba del valor normal).....	86
Figura 3. 9 Mapas de superficie resultado de años análogos. Izquierda probabilidad de temperatura por debajo (azul) y por arriba (rojo); Derecha probabilidad de precipitación por debajo (café) y por arriba (verde).....	87
Figura 3. 10 Pronósticos oficiales del CPC para 6-10 días. Temperatura (izquierda) y Precipitación (Derecha).....	87
Figura 3. 11 Pronósticos oficiales del CPC para 8-14 días. Temperatura (izquierda) y Precipitación (Derecha).....	88
Figura 3. 12 Probabilidades de precipitación de 6 a 10 días, debajo de lo normal (izquierda) y por arriba de lo normal (derecha).	89
Figura 3. 13 Probabilidades de precipitación de 8 a 14 días, debajo de lo normal (izquierda) y por arriba de lo normal (derecha).	89
Figura 3. 14 Comparación entre el modelo de análogos de precipitación generado por el ESRL (Izquierda). Pronóstico de precipitación del GEFS (Derecha).	90
Figura 3. 15 Pronóstico de humedad del suelo en mm generado por medio del GFS para 7 días (izquierda) y para 14 días (derecha).	91
Figura 3. 16 Perspectiva en base a años análogos. Perspectiva mensual de humedad del suelo en mm para el mes de diciembre del 2013 (izquierda). Perspectiva estacional para el mes de marzo del 2014.....	92
Figura 3. 17 Perspectiva mensual de precipitación del CFSv2, en anomalías para diciembre.....	93
Figura 3. 18 Perspectiva trimensual de precipitación del CFSv2, en anomalías para los trimestres DEF (izquierda) y EFM (derecha).	93
Figura 3. 19 Perspectiva de anomalía de precipitación en mm/día para diciembre del 2013 del NMME.....	94
Figura 3. 20 Perspectiva de anomalía de precipitación en mm/día para los trimestres EFM (izquierda) y FMA (derecha) del NMME.....	94
Figura 3. 21 Perspectiva de anomalía de precipitación en mm/día para diciembre del 2013 del IMME.	95
Figura 3. 22 Perspectiva de anomalía de precipitación en mm/día para los trimestres EFM (izquierda) y FMA (derecha) del IMME.	95
Figura 3. 23 Precipitación Total Acumulada en 7 días pronosticada por el WPC.	96
Figura 3. 24 Perspectivas mensuales probabilísticas de temperatura (izquierda) y precipitación (derecha) oficiales del CPC para el mes de noviembre.....	97

Figura 3. 25 Perspectivas trimensuales probabilísticas de temperatura (izquierda) y precipitación (derecha) oficiales del CPC para el trimestre de Enero-Febrero-Marzo, EFM 2014, para mes y medio de perspectiva.	98
Figura 3. 26 Indicadores del OA, NAO y PNA y su pronóstico de acuerdo a modelos de ensamble.	99
Figura 3. 27 Correlación entre la NAO, precipitación (derecha) y Temperatura (izquierda).	100
Figura 3. 28 Correlación entre el patrón PNA, precipitación (derecha) y Temperatura (izquierda).	100
Figura 3. 29 Serie de tiempo de la Oscilación Década del Pacífico, que muestra una fase negativa en la actualidad.	101
Figura 3. 30 Representación de los patrones de las fases positiva (izquierda) y negativa (derecha) de la PDO.	102
Figura 3. 31 Perspectiva estacional obtenida con CCA por el CPC para el periodo Noviembre-Diciembre- Enero.	103
Figura 3. 32 Perspectiva estacional obtenida con SMLR por el CPC para el periodo Noviembre-Diciembre-Enero.....	103
Figura 3. 33 Perspectiva estacional obtenida con SMLR por el CPC para el periodo Noviembre-Diciembre-Enero.....	104
Figura 3. 34 Monitor de sequía a finales de octubre, perspectiva de sequía mensual y las perspectivas de precipitación y temperatura, para el mes de noviembre 2013.....	105
Figura 3. 35 Monitor de sequía para el 10 de diciembre del 2013, perspectiva de sequía estacional y las perspectivas trimensuales de precipitación y temperatura, para los trimestres de DEF, EFM y FMA del siguiente año.....	107
Figura 3. 36 Verificación de la perspectiva de la sequía de EUA imagen compuesta. “A” el monitor de sequía de EUA del 19 de enero del 2010. “B” Perspectiva estacional del periodo FMA. “C” imagen de verificación obtenida a partir de la Perspectiva estacional del periodo FMA. “C” imagen de verificación obtenida a partir de la perspectiva estacional FMA y el y el monitor de sequía con fecha del 27 de abril del 2010. “D” monitor de sequía de EUA del 27 de abril del 2010.	109
Figura 4. 1 Regiones utilizadas para el análisis: norte, centro y sur. Mapa del fondo, precipitación media de agosto con datos del CRU periodo 1961-2000.	111
Figura 4. 2 Esquema para realizar pronóstico a 6 meses.	114
Figura 4. 3 Selección de nivel, tipo de archivo, y meses y años para descargar archivos.....	116
Figura 4. 4 Selección de tiempo y pasos a descargar.	117
Figura 4. 5 Selección de variable a descargar y formato en que se va a descargar la variable. .	118
Figura 4. 6 Seleccionar área o agregar coordenadas para área personalizada; y descarga de los datos con atributos seleccionados anteriormente.....	119

Figura 4. 7 Gráfica del mes de febrero del 2013, antes de recortar para México.	120
Figura 4. 8 Gráfica del mes de febrero, utilizando los datos recortados para México.....	121
Figura 4. 9 Gráfica del mes de febrero para los datos acumulados diarios de precipitación.	122
Figura 4. 10 Gráfica del mes de febrero para los datos acumulados diarios de precipitación en mm/día.....	122
Figura 4. 11 Gráfica del mes de febrero, media mensual.	124
Figura 4. 12 Gráfica de precipitación de ERA-Interim del 01 de marzo de 2013 a las 3:00 hrs antes de interpolarse.....	129
Figura 4. 13 Gráfica de precipitación interpolada para el 01 de marzo de 2013 a las 3:00 hrs. ..	130
Figura 4. 14 Gráfica de precipitación interpolada para el mes de marzo de 2013.	130
Figura 4. 15 Gráfica de media mensual de precipitación para marzo de 2013.	131
Figura 4. 16 Gráfica de temperatura máxima de ERA-Interim para el 01 de abril de 2013 a las 03:00 hrs.....	132
Figura 4. 17 Gráfica de cambio de unidades de temperatura máxima de ERA-Interim para el 01 de abril de 2013 a las 03:00 hrs.	132
Figura 4. 18 Gráfica de media mensual de temperatura máxima.....	133
Figura 4. 19 Comparación del modelo CFS (izquierda) y ERA-Interim (derecha), para el mes de febrero del 2013 de precipitación.....	134
Figura 4. 20 Comparación del modelo CFS (izquierda) y ERA-Interim (derecha), para el mes de febrero del 2013 de precipitación.....	134
Figura 4. 21 Gráfica de ciclo anual de precipitación para la región centro.	135
Figura 4. 22 Gráfica de ciclo anual de precipitación para la región norte.....	136
Figura 4. 23 Gráfica de ciclo anual de precipitación para la región sur.	137
Figura 4. 24 Gráfica de ciclo anual de temperatura máxima para la región centro.	137
Figura 4. 25 Gráfica de ciclo anual de temperatura máxima para la región centro.	138
Figura 4. 26 Gráfica de ciclo anual de temperatura máxima para la región norte.....	139
Figura 4. 27 Gráfica de ciclo anual de temperatura mínima para la región norte.....	139
Figura 4. 28 Gráfica de ciclo anual de temperatura mínima para la región centro.	140
Figura 4. 29 Gráfica de ciclo anual para la temperatura mínima región sur.....	141
Figura 4. 30 Error absoluto medio de temperatura mínima, zona centro.	142
Figura 4. 31 Error absoluto medio de temperatura mínima, zona norte	143

Figura 4. 32 Error absoluto medio de temperatura mínima, zona sur.	144
Figura 4. 33 Error absoluto medio de temperatura máxima, zona centro.....	145
Figura 4. 34 Error absoluto medio de temperatura máxima, zona sur.....	146
Figura 4. 35 Error absoluto medio de temperatura máxima, zona norte.	147
Figura 4. 36 Error absoluto medio de precipitación, zona norte.	148
Figura 4. 37 Error absoluto medio de precipitación, zona sur.	149
Figura 4. 38 Error absoluto medio de precipitación, zona centro.	150
Figura 4. 39 Precipitación de diciembre de 2013 a febrero 2014	151
Figura 4. 40 Precipitación de marzo a mayo de 2014.....	152
Figura 4. 41 Precipitación junio – agosto de 2014.	153
Figura 4. 42 Temperatura máxima de diciembre de 2013 a febrero de 2014.	154
Figura 4. 43 Temperatura máxima de marzo a mayo de 2014.....	155
Figura 4. 44 Temperatura máxima de junio - agosto de 2014.	156
Figura 5. 1 Las variaciones acumuladas CRU.....	162
Figura 5. 2 La función generatriz dada por la función de Kummer, con parámetros producidos por el método de Pearson.	163
Figura 5. 3 Función característica dada a través de la función Kummer con parámetros determinados por el método de Pearson.	164
Figura 5. 4 El espectro multifractal, en la horizontal las singularidades, y en la vertical del espectro.	165
Figura 5. 5 Comparación entre la función generatriz y el espectro en función de la variable de escala para un multifractal binomial.....	166
Figura 5. 6 El nivel 1 de la transformada discreta muestra una singularidad cercana a febrero de 1955.....	167
Figura 5. 7 Singularidad del dato 321	168
Figura 5. 8 Singularidad pulsante, nivel 3, julio 1920.....	168
Figura 5. 9 Señales suavizadas de N3 en °C. (a) Información simulada (N_{3SV} y N_{3SV}), obtenida de M05 para los últimos 1,000 años, e información observada (N_{3O}) durante los últimos 150 años, información obtenida de bases de datos de M05 y IRI(2010), respectivamente. Ambas señales se suavizaron con una media móvil de 21 años. (b) Información simulada de N_{3SV} e información observada (N_{3O}) durante los últimos 150 años. (c) Diferencia entre los valores simulados y los valores observados ($N_{3SV} - N_{3O}$) y su tendencia lineal.....	170

Figura 5. 10 (a) Información acumulada de N3s () y su modelo simple (c1, véase Eq. 3 y 4), obtenido de la base de datos M05 y un modelo FS con NF=1, un periodo de 908 años, respectivamente. (b) Información del residuo acumulado de N3s () después de eliminar el componente del milenio (c1, oscilación de 908 años). También se muestra un modelo simple no-lineal (c2, Eq. 3, 5 y 6), con $\alpha = 1$, $\gamma = 0.45$ (véase Eq. 2-4), $t_0 = 1000$, y $t_1 = 1700$. (c) Información acumulada de N3s ($\eta 3_s$) y su modelo simple completo [c1 +c2, véase (a) y (b)]. 174

Figura 5. 11 Comparación de tres registros anuales promedio N3. Simulación de 1000-1999 DC, con el modelo CZ (nEnsemble), y obtenida a partir de la diferenciación de la señal acumulada obtenida del modelado de dos componentes, FS y SS (c1+c2=modelo Lineal + modelo No-Lineal) (Figura 3c), 1700-2140 DC, y obtenida únicamente del componente SS (c2, No-lineal), 1700-2140 DC. (a) Valores, (b) valores suavizados (media móvil de 21 años); y (c) una ampliación de los valores suavizados durante 1900-2100 DC. También se muestra el promedio móvil de los valores observados suavizados (N3o) para los últimos 150 años. 175

Introducción

México es un país que padece sequías desde tiempos ancestrales. Recientemente se ha visto que la duración de las sequías y que sus áreas de afectación han ido en aumento (CNA, 2001a). Aunque en parte del territorio nacional se tienen lluvias abundantes, existen regiones que no disponen del vital líquido en las cantidades requeridas como son los estados del norte y centro: Durango, Baja California, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí, Aguascalientes y Zacatecas.

La predicción de los eventos de sequía en México es un campo en investigación nuevo autores como Méndez (2009)¹, expone que los modos de variabilidad climática que más afectan las precipitaciones en México pueden ser de baja frecuencia, como lo es El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) y los interdecadales como son la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) y la Oscilación Multidecenal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés), también existen otros factores como el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), el monzón mexicano, el jet de bajos niveles del Caribe (CLLJ, por sus siglas en inglés). Instituciones como el Instituto Internacional de Investigación para el clima y la sociedad (por sus siglas en inglés, IRI) y el Centro de Predicción Climática (por sus siglas en inglés, CPC), generan perspectivas del evento de sequía en base en algunos escenarios o perspectivas de temperatura y precipitación, llamados “Drought Outlook”, que presentan con perspectivas mensuales y estacionales.

Las medidas de prevención para afrontar las sequías están orientadas, por un lado, a políticas de uso eficiente del agua en los hogares, la agricultura, la ganadería y en la industria y, por otro, a aumentar la infraestructura hidráulica para almacenar el agua y conducirla adecuadamente a su destino final; con algunas de estas medidas se pretende disminuir la demanda de agua e incrementar la oferta de la misma. Otras, son el reordenamiento territorial que implica ubicar a la población donde sea más conveniente.

Por otra parte, los estudios del comportamiento de las sequías pueden ayudar a disminuir sus efectos negativos. Son fundamentales para establecer las políticas adecuadas de uso del agua antes y durante los períodos de sequía. Históricamente se ha comprobado que es el fenómeno meteorológico que mayor

¹ Méndez, P., M. (2010) Variabilidad espacio Temporal de la sequía meteorológica en México: aspectos dinámicos. Tesis UNAM, Ciudad Universitaria México DF.102 pp.

daño económico causa a la humanidad (Cody y otros, 1998) y de ahí la importancia de este proyecto. Este informe se compone de 5 partes, que corresponden a la introducción, donde se da un breve panorama de la situación en México, los objetivos dentro del proyecto, la metodología a usar, las perspectivas de sequía en el mundo y por último las conclusiones y el trabajo a futuro.

Objetivos Principales:

- A. Análisis del sistema de estimación de escenarios “Outlook” de la NOAA para las sequías de los EUA para su adaptación para México, así como de sistemas similares en otros lugares del mundo y revisar su factibilidad de implementación en México.
- B. Propuesta de metodología que sirva para monitorear y estimar escenarios e la ocurrencia de un evento de sequía en México.

Objetivos Secundarios:

- a) Conjuntar información de trabajos relacionados a la sequía en México y a nivel global.
- b) Revisar la disponibilidad de base de datos
 - b.1) De diferentes fuentes con información climática, que puedan servir para evaluar aspectos importantes de las sequías de México ocurridas durante los últimos 100 años
 - b.2) Con información meteorológica para el monitoreo de la sequía.
- c) Estimar tendencias climáticas de anomalías de precipitación para cuatro zonas de México a mediano (estaciones) y largo plazo (1 a 3 años) utilizando los diferentes procesos de gran escala (sinóptica y mayores), como son ENSO, huracanes, NAO, PDO, etc.

1. Sistemas de monitoreo de sequías en el mundo

1.1 Canadá

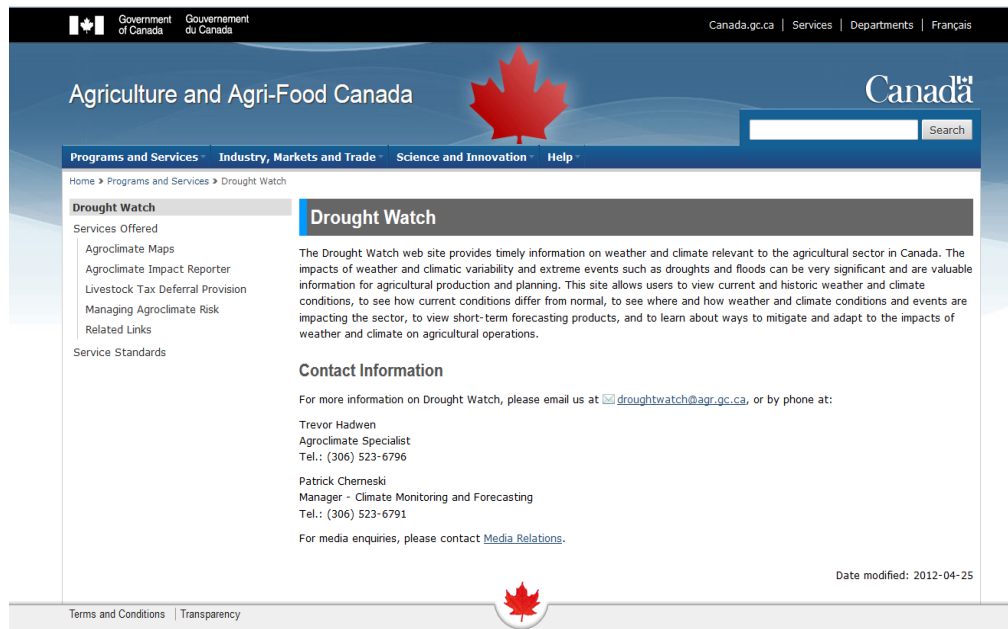


Figura 1. 1 El sitio web <http://www.agr.gc.ca/eng/?id=1326402878459>, (disponible en inglés y francés) del Departamento de Agricultura y Agroalimentario de Canadá, dependiente a su vez del gobierno de Canadá, alberga el Drought Watch, cuya información es desplegada mediante mapas.

El **Drought Watch** es un sistema de monitoreo de sequía implementado por el Departamento de Agricultura y Agro-alimentario de Canadá, dependencia que data de 1868, fundada apenas un año después de la creación de Canadá como país, debido a la importancia de la agricultura dentro del desarrollo social, económico y cultural de Canadá (figura 1.1). Por lo tanto está enfocado meramente en proporcionar información oportuna sobre eventos meteorológicos y climáticos relevantes que impacten al sector agrícola y que permitan una adecuada planeación. Los datos que utilizan se encuentran concentrados en una base de datos denominada NRT (Near Real Time), que es una especie de “amalgama” de series de datos provenientes de redes desde nivel federal, de provincias y privadas, que se ensamblan en un lapso de cada 12 horas. Cada observación meteorológica que va llegando, se compara con su valor histórico y contra todas las estaciones en sus alrededores por posibles inconsistencias, lo cual se realiza mediante un control de calidad tanto manual como automatizada.

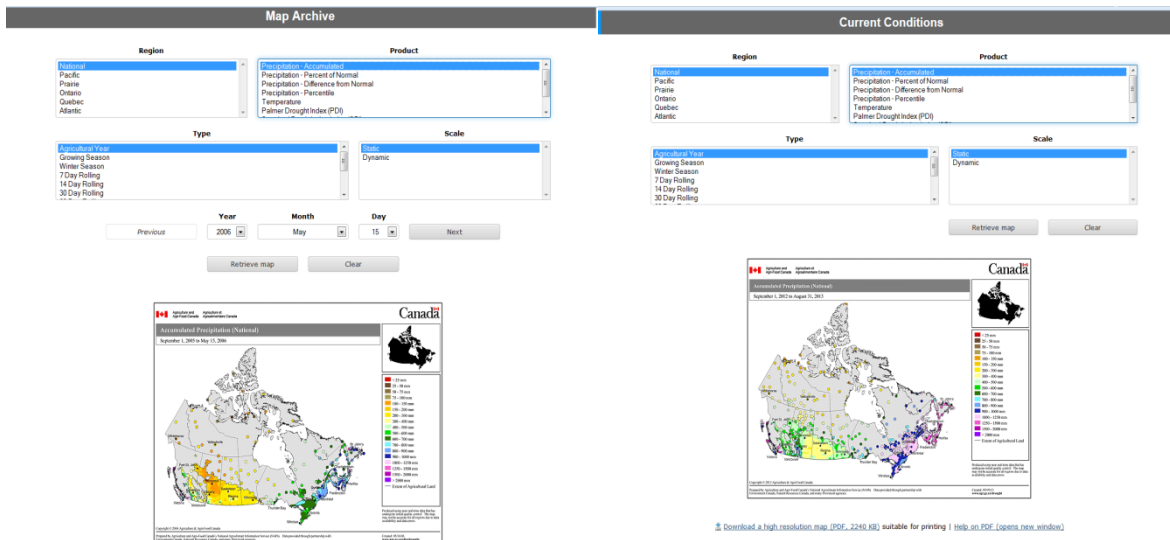


Figura 1. 2 En los submenús, current conditions y map archive, se pueden acceder a mapas de condiciones actuales e históricas (desde el 2006), para diversos parámetros, principalmente de precipitación, temperatura e índices orientados hacia la sequía.

Los orígenes de este sistema se encuentran en que las praderas canadienses frecuentemente han sido afectadas por sequías. Algunos de estos naturales pero potencialmente eventos devastadores han afligido pequeñas áreas mientras que otras han abarcado regiones más amplias. Dado que la severidad e impacto de la sequía puede variar ampliamente a través de grandes o pequeñas regiones geográficas, se volvió imperativo el desarrollo de herramientas y capacidades para habilitar la identificación y monitoreo de indicadores de sequía y determinar impactos entre las provincias de su territorio. Como se sabe, la sequía puede tener impactos significativos en varios aspectos físicos y bio-físicos en las provincias, que puede afectar la agricultura a través de una producción agrícola reducida, afluentes reducidos y finalmente la falta de precipitación resultando en crisis financiera. Siendo capaces de monitorear la sequía, podrían brindar asistencia a los productores en el manejo efectivo bajo dichas condiciones y minimizando sus efectos negativos. Por tal motivo, lo que hicieron fue extender un proyecto ya armado previamente, en este caso, usado en la provincia de Alberta, hacia otras provincias ubicadas sobre las praderas, de manera que el monitoreo y reporte de la sequía fuera comparable entre las provincias. Para ello, se requirieron datos locales para correr un modelo basado en el Índice Modificado de Sequía de Palmer (MPDI) para que pudieran ensamblarse y compilarse. Sin embargo, recomiendan que antes de aplicar cualquier metodología empleada aquí, se realicen investigaciones al respecto para su viabilidad en otros lugares.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

1.1.1 Metodología

El sitio web permite consultar tanto las condiciones climáticas actuales como las históricas, mediante mapas en el apartado Agroclimate maps y a su vez en los submenús Current (actuales) y Map archive (históricos) (Figura 1.2). Las variables que se encuentran disponibles están agrupadas básicamente en tres tipos: de precipitación, de temperatura e índices de sequía. Se pueden escoger entre regiones y a nivel nacional.

Las variables que tienen que ver con precipitación son referidas como la acumulada, porcentaje con respecto de la normal, diferencia con respecto de la normal, período seco y percentiles. De acuerdo a lo explicado en un apartado del mismo sitio, el porcentaje de precipitación con respecto a la normal lo calculan dividiendo la precipitación medida entre la precipitación “normal” de un periodo de tiempo dado y multiplicado por 100. El resultado de la precipitación promedio expresa la diferencia entre la precipitación medida y la promediada (basada en un periodo de 1971 al 2000), mientras que los percentiles de precipitación proporcionan información para definir condiciones basadas en la frecuencia de su ocurrencia.

En los índices de sequía, manejan el SPI (Índice Estandarizado de Precipitación) y el PDI (Índice de Sequía de Palmer), que a su vez cuentan con variables afines, en el caso de la opción del PDI, cuenta con el índice de anomalía de humedad (PDI-Z), humedad total del suelo, porcentaje de humedad normal del suelo y diferencia de humedad normal del suelo. Como se asevera en el sitio, dado que el PDI es estandarizado, se pueden hacer comparaciones entre localidades y periodos de tiempo, si se habla de un mes, por ejemplo, se tiene dos componentes: a) El estado de humedad del mes en curso, que contribuye al 10 % del índice y b) el estado de humedad de los meses previos, que contribuyen al 90 % del índice. El PDI-Z, es una estimación de la diferencia de humedad con respecto a la normal (periodo comprendido de 30 años), (figura 1.3).

Respecto a la temperatura, es importante destacar lo detallado de algunas variables, cuentan con temperatura máxima y mínima diaria, número de días consecutivos con 25° y 30° C, temperatura más alta y

baja en los últimos 7 días, unidades de calor en el cultivo del maíz (CHU), días-grado de crecimiento de BASE 0, 5, 10 y 15 (GDD), número de días con temperaturas sobre los 25° y 30° C y media mensual de la diferencia con el valor normal. Los periodos de tiempo, de acuerdo al tipo de variable, se pueden escoger entre definidos, ya sea un año agrícola (del 1 de septiembre al 31 de agosto del siguiente año), la temporada de crecimiento (del 1 de abril al 31 de octubre del mismo año) y la época de invierno (del 1 de noviembre al 31 de marzo del siguiente año) o definidos por la fecha en que se genere el mapa, pudiendo abarcar 30, 60, 90 y hasta 365 días, que se cuentan en retroceso a partir de la fecha de término.

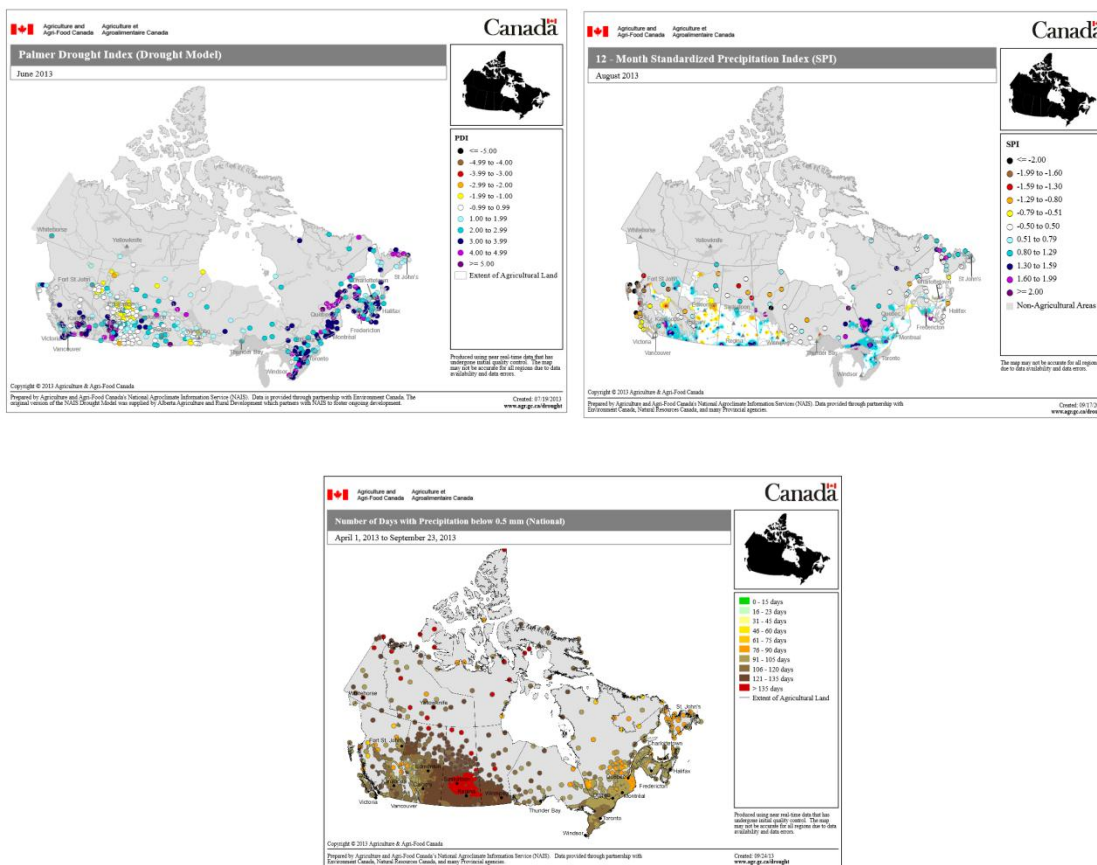


Figura 1. 3 Algunos ejemplos de los productos disponibles enfocados en la sequía, Índice de Sequía de Palmer, Índice Estandarizado de Precipitación y días con baja precipitación.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

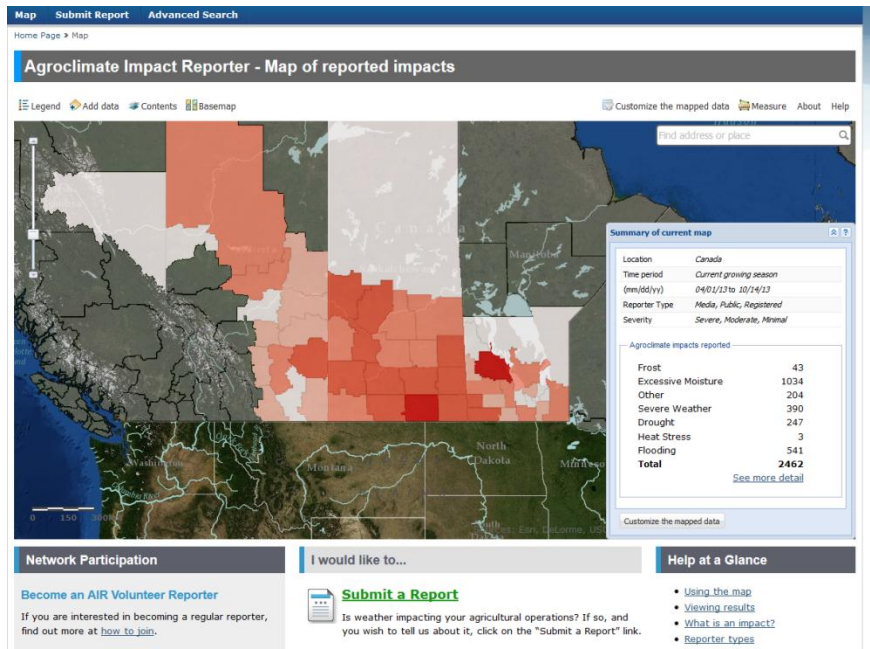


Figura 1. 4 Mapa de zonas registradas con impacto de sequías para territorio canadiense, que a su vez forma parte del reporte general de sequías.

1.2 Argentina

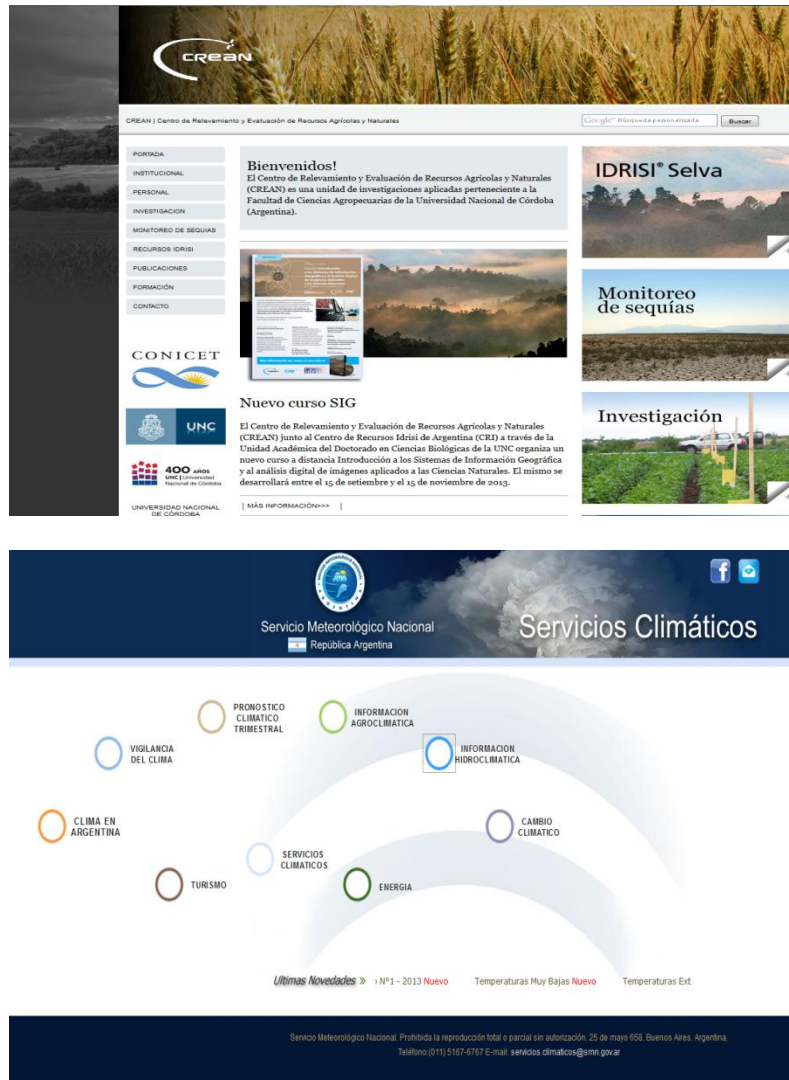


Figura 1. 5 Sitios web <http://www.crean.unc.edu.ar/index.html> de la unidad de investigación CREAN (Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales), que forma parte de la Facultad de Ciencias agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina) y <http://www.smn.gov.ar/serviciosclimaticos/index.php> perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional argentino, organismos que trabajan en colaboración para la elaboración de productos relacionados con la sequía en Argentina.

El Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales (CREAN) es una unidad de investigaciones aplicadas perteneciente a la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

Nacional de Córdoba (Argentina). Está integrado por investigadores, profesionales y técnicos del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y por docentes y personal administrativo de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Desarrolla sus actividades en cooperación con numerosas instituciones y organismos internacionales, entre los que destacan: Food and Agriculture Organization (FAO), el National Drought Mitigation Center (Nebraska University, EE.UU), Clark University de los EE.UU.), Instituto Belga de Investigación Tecnológica (VITO), Instituto Holandés de Investigación (ITC) y el Joint Research Centre (JRC) de la Comunidad Europea. Su labor de investigación informa al sector público y a los productores acerca de las condiciones de sequía de la región central del país. Esta tarea la realiza en conjunto con profesionales de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable y del Servicio Meteorológico Nacional, con datos del Servicio Meteorológico Nacional argentino (Figura 1.5).

El objetivo de las distintas investigaciones que desarrolla es básicamente contribuir al desarrollo de estrategias de manejo sustentable de los recursos agrícolas y naturales, sobre la base de principios de uso racional, de preservación y de recuperación del patrimonio ambiental. Estos objetivos comprenden la generación de un banco de datos biofísicos (vegetación, clima y suelos), que sea aplicado a proyectos de investigación multidisciplinario y que permitan la aplicación de estrategias de preservación de los diferentes ambientes agrícola-ganaderos, forestales y áreas naturales de Argentina. La acción se encausa a través de programas de aplicación de información agrometeorológica, de evaluaciones de la biodiversidad de recursos naturales y agrícolas y de información satelital, actividades de provisión de servicios y asistencia técnica a usuarios de los sectores público y privado.

1.2.1 Metodología

El sitio web del CREAN, cuenta con mapas de SPI (que según afirman, ha demostrado ser muy adecuado para determinar la ocurrencia y seguimiento de las sequías en la pradera pampeana argentina) a 3,6, 12

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

y 24 meses a a partir del mes en curso (siendo el único que da una perspectiva a futuro), PDI (que se calcula al término de cada mes) e índice de humedad de cultivos (figura 4.2.2). No obstante, no se da información alguna extra de como usar la información contenida en eso mapas, verificaciones, sus aplicaciones y alcances. En cuanto al Servicio Meteorológico Nacional Argentino, este si dispone de información un poco más detallada, ya que cuenta también con sus propios mapas de SPI a diferentes escalas temporales, de 1, 3, 6, 12, 18 y 24 meses, aunque a niveles regionales, que se elaboran al principio de cada mes así como los estadísticos comprendidos desde 1961, por localidad (figura 1.7).

También disponen de información hidrológica a nivel de zonas, lo que significa que no registra las variaciones locales que pueden presentarse por efecto de la topografía, hidrografía, distribución de suelos y demás factores de menor orden espacial y se refieren principalmente al rango de condiciones seriamente limitantes para el mantenimiento de una actividad vegetal continua. Como según se refiere en el sitio, el seguimiento del estado de humedad del suelo mediante este Balance Hídrico se realiza según un método desarrollado en forma conjunta por personal del Departamento Agrometeorología de dicha institución, desarrollado en el año 2000 y aún sin publicar (figura 1.8).

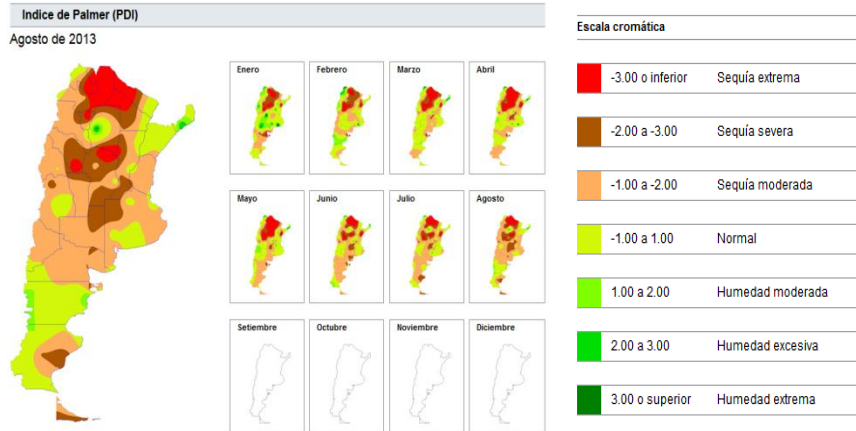
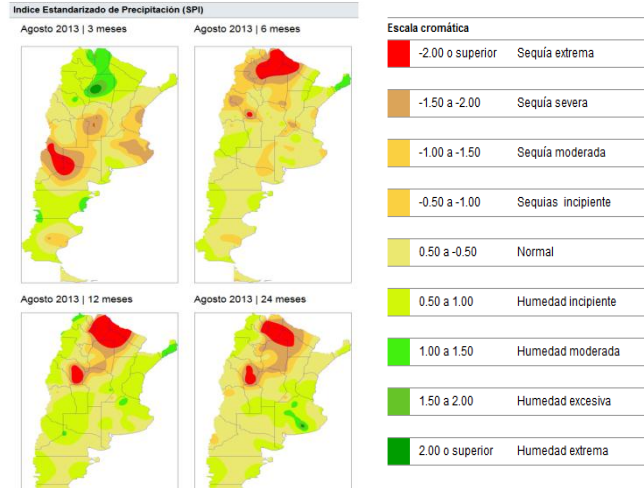


Figura 1. 6 Productos disponibles en el sitio web del CREAN, correspondientes de arriba abajo con: Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), Índice de Sequía de Palmer (PDI) y el Índice de Humedad de Cultivos, con los que calculan la sequía en la región argentina, aunque no se da más información detalla al respecto.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

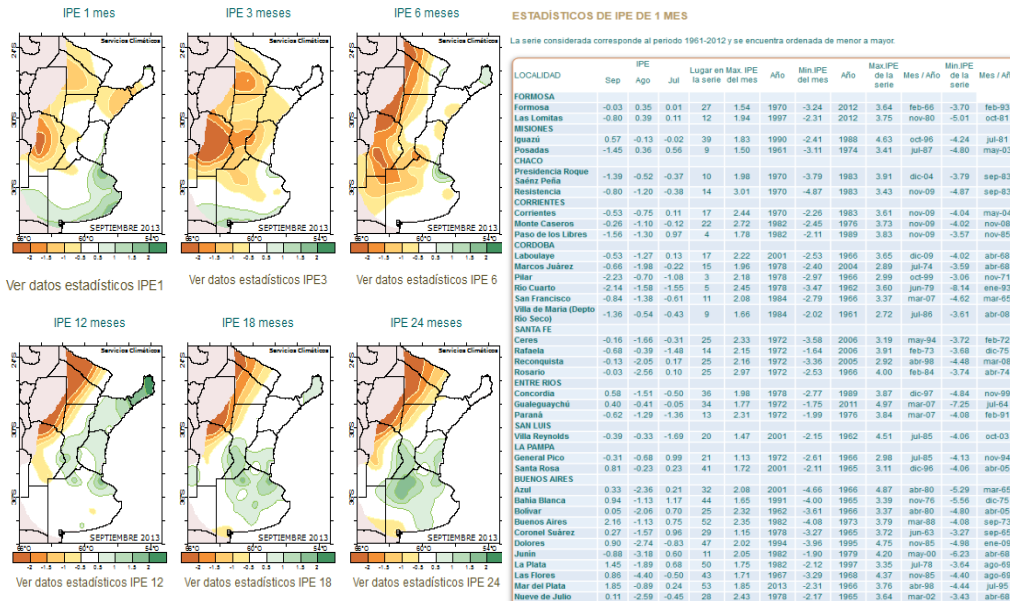


Figura 1. 7 Información climática correspondiente al Índice Estandarizado de Precipitación a 1,3,6,12,18 y 24 meses, para una región en particular, que puede visualizarse desde el sitio web del Servicio Meteorológico Nacional argentino, junto con valores comparativos estadísticos de ese mismo índice por localidad.

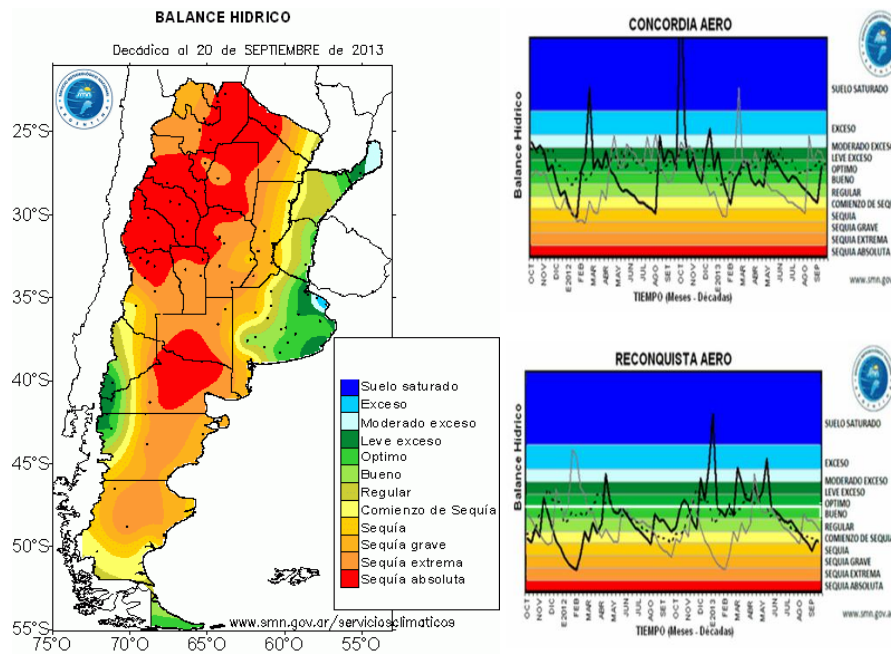


Figura 1. 8 Información agroclimatológica disponible sobre estado de saturación de humedad de los suelos, por semana y para una estación en particular, en ese caso, se muestra el balance hídrico comprendido desde el mismo mes del año en curso, pero partiendo desde el año antepasado, es decir, desde septiembre de 2011; en la línea negra, la gris es el balance hídrico para el mismo mes pero del periodo inmediato anterior y la punteada es el promedio del balance hídrico del período 2000-2009. La escala de colores en ambos casos, tanto para el mapa como para el gráfico, es la misma.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

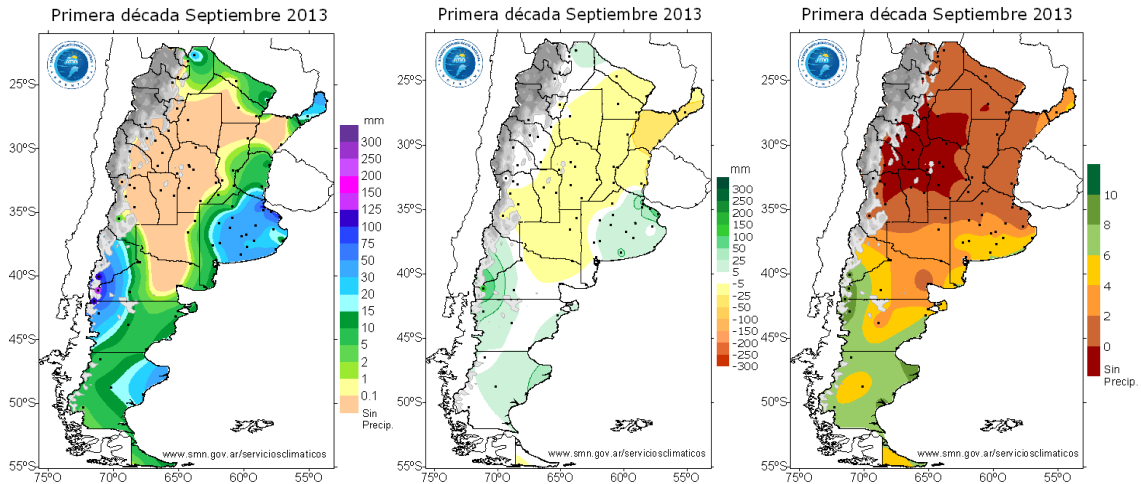


Figura 1. 9 Mapas de vigilancia de precipitación para toda Argentina, el primero, partiendo de izquierda a derecha, corresponde a la precipitación acumulada para la primer semana del mes de septiembre en mm, el segundo a anomalías de precipitación acumulada en mm y el tercero a frecuencias de días con o sin precipitación. Las semanas, son referidas o llamadas “décadas”.

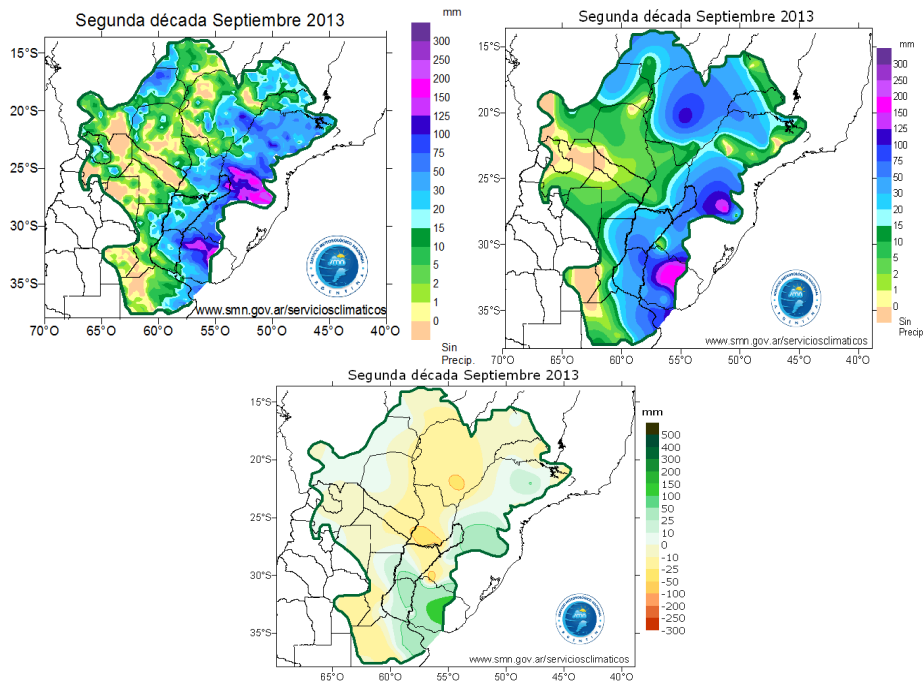


Figura 1. 10 Mapas por regiones, en este caso, la cuenca de La Plata, partiendo de arriba abajo y de izquierda derecha, el primero corresponde a la precipitación estimada para la segunda quincena de septiembre en mm, la siguiente en ese orden, corresponde a la precipitación acumulada para esa zona y por último, la anomalía de precipitación acumulada en mm. El primer mapa se construye a partir de datos satelitales, los dos últimos, a partir de datos de observados obtenidos de las estaciones meteorológicas en superficie.

En cuanto a la información empleada para la confección de los campos de precipitación, esta proviene de la red de estaciones meteorológicas de superficie del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) argentino, cuya distribución espacial se muestra en la figura. En escala de grises se presenta el relieve de la topografía con valores de alturas superiores a los 1500 metros (información proporcionada por su Instituto Geográfico Nacional), (figura 1.11). La medición de precipitación se efectúa a las 09:00 hora oficial Argentina (es la precipitación acumulada desde las 09 horas de un día hasta las 09:00 horas del día siguiente) y la unidad de medición en milímetros. Los datos observados son interpolados con el objetivo de tener una representación espacial de la variable. El método de interpolación espacial empleado en la confección de los campos es el de Kriging (Davies, 1973), resaltando el hecho de que este método genera valores menos confiables en zonas costeras, en regiones donde las observaciones son aisladas y principalmente en las regiones con elevaciones importantes, por este motivo no se muestra el campo interpolado de la precipitación en regiones con alturas del terreno superiores a 1500 m sobre el nivel del mar.

Los mapas de precipitación estimada a partir de datos satelitales, se realizan a través de los datos provistos por el satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). El producto experimental multi-satélite de precipitación denominado TRMM 3B42 es generado a partir de la información extraída de las imágenes en banda visible (VIS), infrarrojo (IR), microondas pasivas (MW) y del radar a bordo del satélite TRMM, combinadas con información IR de otros satélites. Las características básicas son: resolución espacial: $0.25^\circ \times 0.25^\circ$; resolución temporal: 3 horas; dominio global: 50°N - 50°S ; disponibilidad desde el 31 de diciembre de 1997. El procesamiento de dichos datos, consistió en:

- Combinación y calibración de las estimaciones de precipitación a partir de microondas pasivas (MW).
- Cálculo de las estimaciones de precipitación en IR a partir de la calibrada en MW.
- Combinación de las estimaciones realizadas en los dos puntos anteriores.
- Ajuste con datos mensuales.

Para más información, hacen la referencia al sitio <http://mirador.gsfc.nasa.gov/>.

Las anomalías de la precipitación representan el desvío del valor de precipitación acumulada en cada estación respecto de su valor normal. El valor normal está calculado estadísticamente para el período 1961– 1990. Valores positivos de

anomalías representan lluvias que superan el valor normal. Para la confección de los mapas de anomalías también se utiliza el método de interpolación espacial Kriging (figuras 1.9 y 1.10).

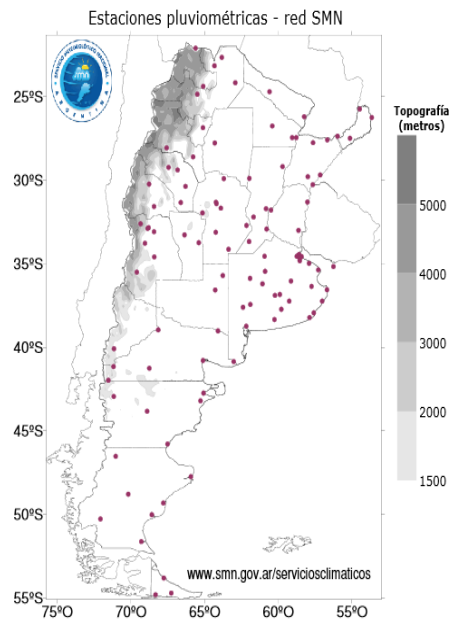


Figura 1. 11 Distribución de las estaciones meteorológicas en Argentina junto con su altitud, a cargo de su Servicio Meteorológico Nacional.

Otro tipo de índices que manejan son los que tienen que ver con la vegetación, manejando dos: el NDVI y el EVI. El NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), se obtiene a partir de las bandas espectrales en el rango del rojo y del infrarrojo cercano y constituye una buena medida de la cantidad y el vigor de la vegetación (actividad fotosintética), estando estrechamente relacionada con el tipo de vegetación y las condiciones climáticas. Las series temporales de NDVI, muestran la tendencia del desarrollo de la vegetación natural y de los cultivos. El EVI (Enhanced Vegetation Index) fue desarrollado para optimizar la señal de la vegetación con mayor sensibilidad en regiones de altas densidades de biomasa, lográndose esto mediante la separación de la señal proveniente de la vegetación, el suelo y la atmósfera (figura 1.12).

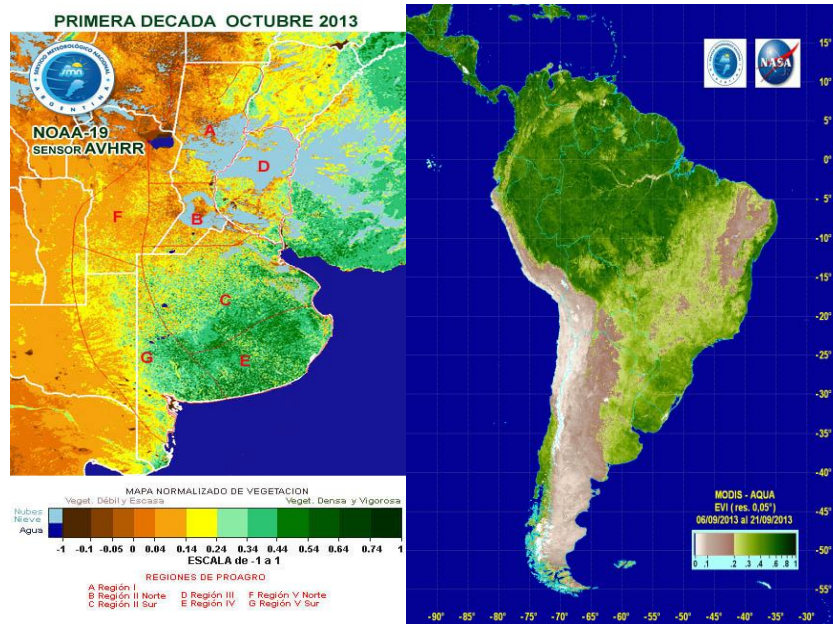


Figura 1. 12 Mapas de índices asociados a la vegetación, el primero, de izquierda a derecha, representa la cantidad y el vigor de la vegetación (actividad fotosintética), a través del índice de vegetación normalizado (NDVI), obtenido a partir de imágenes satelitales del NOAA-18 y NOAA-19 /AVHRR con 1 km de resolución, recibidas y procesadas en el Departamento Teledetección y Aplicaciones Ambientales del SMN argentino. Los tonos marrón y verde representan la gradación de la vegetación, de escasa/débil a densa/vigorosa y se actualizan cada diez días. Utilizan una técnica de composición temporal, para eliminar las nubes. El otro mapa, corresponde al EVI, el cual es procesado con datos del sensor MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer), a bordo de los satélites Aqua y Terra, por la NASA y con una resolución espacial 5 Km.

1.3 India

Figura 1. 13 Sitio web <http://www.dsc.nrsc.gov.in/DSC/Drought/index.jsp#> del Centro de Decisión y Asistencia de la India, organismo encargado de emitir alertas ante diversos fenómenos que puedan resultar una amenaza en territorio indio, tales como ciclones, incendios forestales, inundaciones y sequías y del departamento de Meteorología de la India DMI, http://www.imd.gov.in/main_new.htm , en cuyo apartado, referido a monzón, se encuentra la información disponible al monitoreo de lluvias.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

Al ser la sequía una anomalía climática, todos los países en vías de desarrollo, siendo primordialmente agrícolas, son muy dependientes a los caprichos de las lluvias estacionales y condiciones climáticas y por tanto más vulnerables a las sequías. De acuerdo a sus cifras, alrededor de dos tercios del área geográfica de la India recibe baja precipitación (menos de 1000 mm), que es caracterizada por distribuciones erráticas y desiguales. En las áreas de siembra, con 140 millones de hectáreas, cerca del 68 % se han reportado como vulnerables a condiciones de sequía y cerca del 50 % de esas áreas vulnerables se les ha clasificado como severa, donde la frecuencia de sequía es casi regular. Las necesidades de agua en el sector agrícola van en aumento, al igual que varios miles de toneladas de agua se requieren para producir cada tonelada métrica de granos para la alimentación. Por lo tanto, ante esta necesidad de monitorear la sequía agrícola, su inicio, progresión e impacto en los cultivos y minimizar los daños, surge el proyecto NADAMS (Sistema Nacional de Monitoreo y Evaluación de la Sequía Agrícola) en 1989, que básicamente utiliza datos de burdos (1.1 km) del AVHRR de la NOAA que aplica en 11 estados de su territorio y el AWiFS (Advanced Wide Field Sensor), (figura 1.13).

1.3.1 Metodología

De acuerdo al sitio web, la metodología que siguen es un análisis en conjunto de imágenes satelitales (de donde derivan en que condición se encuentran los cultivos), usando el NDVI (Índice de la Diferencia Normalizada de Vegetación) y el Índice de Condición de Vegetación y complementado con datos en superficie, en este caso, de precipitación y de progresión de áreas de cultivo. El sistema “opera” de junio a agosto, emitiendo un aviso que es establecido en categorías de vigilancia, alerta y normal. Si se emite un aviso de vigilancia, en seguida solicitan intervención externa, si es que en el siguiente mes persisten las condiciones similares al mes previo; posteriormente, de septiembre a octubre, utilizan anomalías del NDVI en conjunto con las condiciones actuales del suelo, para declarar una sequía agrícola, en términos de ligera, moderada y severa (figura 1.14). En la misma página, puede consultarse el reporte detallado de la evaluación de la sequía agrícola por mes y por regiones y distritos, de acuerdo a lo explicado con anterioridad (figura 1.15).

A diferencia de las observaciones en tierra, los sensores satelitales proporcionan información espacial directa sobre el estrés vegetal causado por las sequías. La

tecnología satelital es ampliamente usada para monitoreo de cultivos y para la evaluación de la sequía agrícola desde hace 20 años, aún con sensores de burda resolución. Como ejemplo, mencionan que el AVHRR de la NOAA ha sido ampliamente usado para monitoreo de sequía/vegetación y estimación de condición de cultivos, basta mencionar que el monitor de sequía de los Estados Unidos lo hace de esa manera, el Global Information and Early Warning System (GIEWS) y el Advanced Real Time Environmental Monitoring Information System (ARTEMIS) de la FAO usan los datos del SPOT-VGT, el International Water Management Institute (IWMI)'s drought assessment en el suroeste asiático, usan los datos de Modis. De ese modo, el proyecto del NADAMS de la India, se inscribe en esa dinámica.

Los cultivos y por tanto, la vegetación tienen alta reflectividad cerca de la banda infrarroja, debido a su geometría, que tiene que ver con la salud de las plantas y absorbe en alta cantidad en la banda roja reflejada debido a su biomasa y fotosíntesis. La vegetación en condiciones de estrés tiene una alta reflectividad respecto a la vegetación saludable en el espectro visible (0.4-0.7 micras) y reflectividad más baja cerca del infrarrojo (0.7-1.1 micras) en el espectro electromagnético. Los índices de vegetación aprovechan las respuestas diferenciales de esa banda del espectro para indicar la condición de los cultivos y vegetación, con lo cual se han desarrollado diferentes tipos de índices:

Agricultural drought warning and declaration in NADAMS project

Month	Assessment	Implications
June July August	Normal	Agricultural situation is normal
	Watch	<ul style="list-style-type: none"> ● Progress of Agricultural situation is slow ● Ample scope for recovery ● No external intervention needed
	Alert	<ul style="list-style-type: none"> ● Very slow progress of agricultural situation ● Need for intervention. ● Develop and implement contingency plans to minimise loss
Sept. Oct.	Mild drought	Crops have suffered stress slightly
	Moderate drought	<ul style="list-style-type: none"> ● Considerable loss in production. ● Take measures to alleviate suffering
	Severe	<ul style="list-style-type: none"> ● High risk. Significant reduction in crop yield ● Management measures to provide relief

Figura 1. 14 Estructura del sistema de alerta y declaración de sequías para la India, derivado del proyecto NADAMS.

- Difference Vegetation Index/Índice Vegetal Diferenciado
- Ratio Vegetation Index /Índice del Cociente de Vegetación

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

- Infrared Percent Vegetation Index/Índice del Porcentaje Infrarrojo de Vegetación
- Perpendicular Vegetation Index/ Índice Perpendicular de Vegetación
- Soil Adjusted Vegetation Index/Índice Ajustado de Vegetación de Suelo
- Weighted Difference Vegetation Index/Índice Ponderado Diferenciado de Vegetación
- Greenness Vegetation Index/Índice de Verdor de Vegetación
- Atmospherically Resistant Vegetation Index/Índice de Vegetación Atmosféricamente Resistente.
- Normalized Difference Vegetation Index /Índice Normalizado Diferenciado de Vegetación.
- Normalized Difference Wetness Index /Índice Normalizado Diferenciado de Humedad.
- Enhanced Vegetation Index/Índice Mejorado de Vegetación.

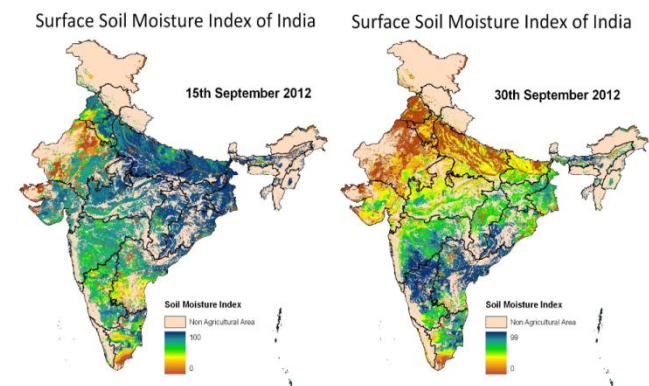
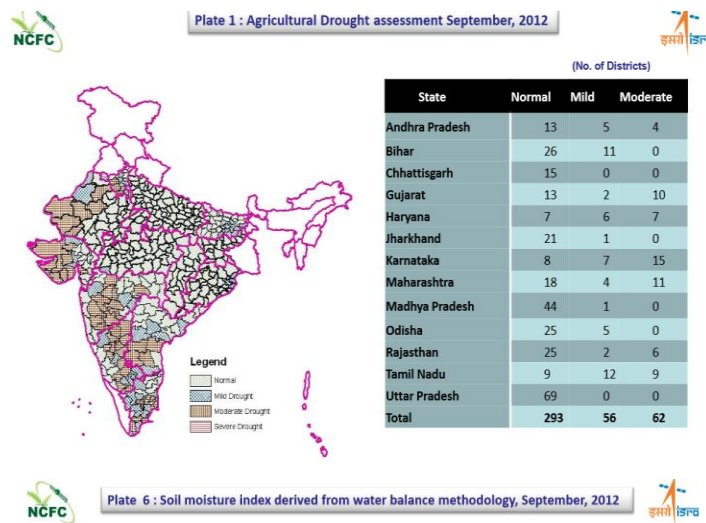
El NDVI, como explican ahí mismo, es un índice aceptado para la evaluación de la sequía operacional debido a su simplicidad de cálculo, fácil interpretación y su habilidad de parcialmente compensar los efectos de la atmósfera. Es una transformación de la radiación reflejada en el espectro visible y cerca de la banda infrarroja del AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) de la NOAA y es una función del “verdor” de un área cubierta de hojas y de la biomasa.

Respecto a las observaciones meteorológicas, el Departamento de Meteorología de la India (IMD) elabora mapas de precipitación cada semana por todo el año, los cuales muestran las lluvias recibidas durante una semana (figura 1.16). Durante la temporada del monzón (que se sabe, contribuye cerca del 75-80 % de la precipitación anual sobre la mayor parte del país), estos mapas son indicativos del desarrollo de sequía, además el IMD también proporciona información semanal sobre anomalías de precipitación a nivel de distritos para todo el país (figuras 1.17 y 1.18). Dicha dependencia también monitorea la sequía, usando una metodología basada en un balance hídrico, denominado índice de aridez, que se calcula mediante la siguiente relación:

Índice de aridez=Déficit de agua/Necesidad de agua

(Evapotranspiración actual-Evapotranspiración Potencial)/Evapotranspiración Potencial

De acuerdo a la estructura del sitio web, solo se pueden tener acceso a los mapas y la información a través de los reportes anuales sobre sequía, aunque el sitio mismo enfatiza que la información está dirigida sectores específicos, como ministros de agricultura tanto a nivel federal como estatal principalmente, es decir, gobierno solamente, con el fin de emitir las declaratorias pertinentes.



“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

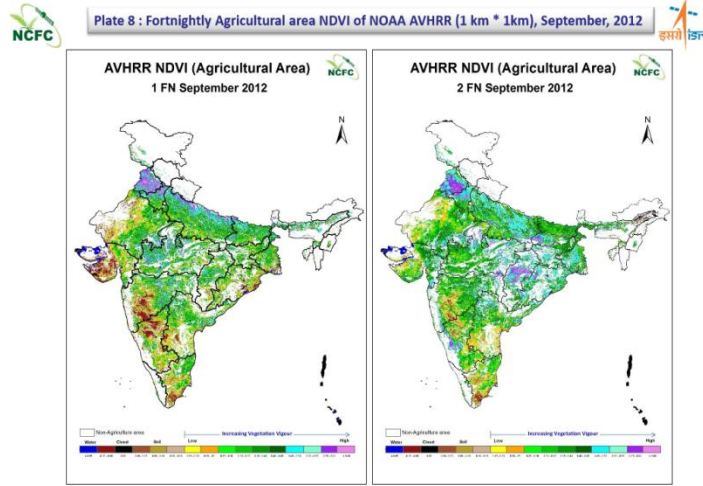


Figura 1. 15 De arriba a abajo, mapa de condiciones de sequía por distritos de acuerdo al reporte de septiembre de 2012 y de índices de NDVI y de humedad del suelo para toda la India, calculados de la información satelital del AVHRR de la NOAA para la primera y segunda quincena de septiembre.

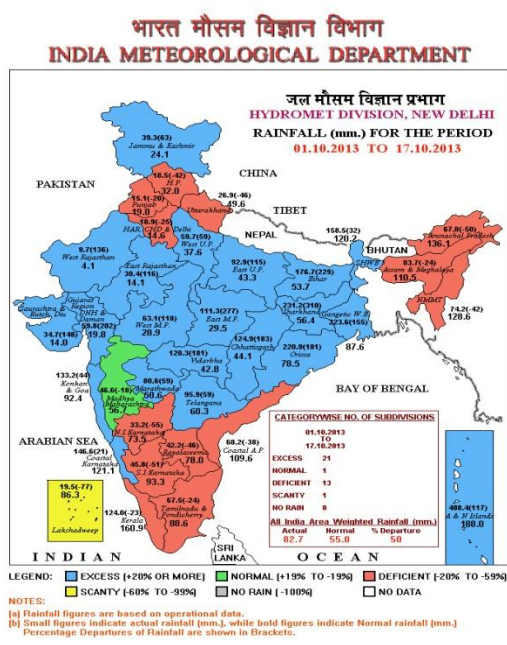


Figura 1. 16 Mapa de lluvia acumulada semanal en mm para todo el territorio de la India por distritos, el código de colores indican porcentajes de exceso o déficit de lluvias, los números en grande muestran los valores medios y los pequeños, la lluvia real registrada. Se interpreta en función si es antes o después de la época del monzón.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

HYDROMET DIVISION - INDIA METEOROLOGICAL DEPARTMENT

Weekly Percent Departures of Rainfall - Monsoon 2013

Note: Rainfall Statistics given below is based on real time data receipt and is subject to be updated

LEGEND: EXCESS (Green), NORMAL (Yellow), DEFICIENT (Red), SCANTY (Orange), NO RAIN (Grey)

- Click the links below to follow the districts of a Met. Sub-division:
- A & N ISLAND: MAH. CHD & DEHU, MARATHIWARA
- ARUNACHAL PRADESH: PUNJAB, VIDARBHA
- ASSAM & MEGHALAYA: HIMACHAL PRADESH, CHHATTISGARH
- Bihar: JAMMU & KASHMIR, GOA/TA. A.P.
- CHHATTISGARH: WEST BAHARSTHAN, JIZANGAM
- GOA/TA. A.P.: EAST BAHARSTHAN, RAJLASEMA
- JAMMU & KASHMIR: WEST M.P., TAMILNADU & PONDICHERY
- JIZANGAM: EAST M.P., GOA/TAL. KARNATAKA
- RAJLASEMA: WEST M.P., N. KARNATAKA
- TAMILNADU & PONDICHERY: EAST M.P., S. KARNATAKA
- GOA/TA. A.P.: WEST M.P., KERALA
- GOA/TAL. KARNATAKA: WEST M.P., KARNATAKA
- N. KARNATAKA: WEST M.P., KARNATAKA
- S. KARNATAKA: WEST M.P., KARNATAKA
- KERALA: WEST M.P., KARNATAKA
- KARNATAKA: WEST M.P., KARNATAKA
- MAHARASHTRA: WEST M.P., KARNATAKA
- LAKSHADWEEP: WEST M.P., KARNATAKA

S.No.	WEEKS ENDING ON -->	12 JUN 2013	19 JUN 2013	26 JUN 2013	03 JUL 2013	10 JUL 2013	17 JUL 2013	24 JUL 2013	31 JUL 2013	07 AUG 2013	14 AUG 2013	21 AUG 2013	28 AUG 2013	04 SEP 2013	11 SEP 2013	18 SEP 2013	25 SEP 2013	02 OCT 2013
1	A & N ISLAND	34%	237%	36%	32%	86%	79%	47%	-64%	-22%	50%	46%	-20%	46%	0%	16%	88%	-64%
1	NICOBAR	242%	328%	-47%	-87%	295%	16%	8%	-88%	79%	61%	-22%	-94%	35%	88%	36%	-91%	-86%
2	NORTH & MIDDLE ANDAMAN	13%	271%	92%	135%	14%	79%	79%	-56%	-34%	56%	-42%	47%	-99%	-50%	-27%	293%	-42%
3	SOUTH ANDAMAN	2%	153%	16%	-46%	99%	184%	43%	-70%	-24%	48%	-63%	-76%	-27%	29%	43%	-34%	73%
2	ARUNACHAL PRADESH	75%	-81%	-58%	3%	-3%	-44%	-39%	-32%	-22%	-28%	-77%	-38%	84%	41%	89%	-47%	-54%
1	ANJAW	-92%	-68%	-41%	-8%	67%	-15%	79%	-71%	35%	-4%	79%	30%	151%	-4%	81%	-64%	77%
2	CHANGLANG	-92%	-68%	-41%	-8%	67%	-15%	79%	-71%	35%	-4%	79%	30%	151%	-4%	81%	-64%	77%
3	DIRANG VALLEY	-99%	-100%	100%	25%	-21%	-86%	43%	-73%	-45%	-44%	53%	-69%	200%	274%	-92%	-98%	96%
4	EAST KAMENG	-83%	-50%	-50%	49%	24%	24%	42%	39%	-77%	-41%	-56%	55%	100%	27%	44%	86%	86%
5	EAST SIANG	-72%	-45%	-9%	46%	167%	-33%	39%	-58%	-34%	-19%	-76%	-86%	195%	36%	-100%	-99%	-87%
6	KURUNG KUMYI	-99%	85%	-43%	48%	57%	-28%	-63%	-52%	-31%	60%	6%	-49%	139%	44%	-97%	-31%	-79%
7	LOIT	-99%	85%	-43%	48%	57%	-28%	-63%	-52%	-31%	60%	6%	-49%	139%	44%	-97%	-31%	-79%
8	LOWER SUBANSARI	-97%	-97%	-88%	86%	-94%	-98%	93%	-47%	55%	-8%	-100%	-48%	81%	99%	99%	-99%	68%
9	PAPUNPARA	-93%	-66%	-36%	-21%	-35%	1%	16%	79%	-27%	8%	83%	9%	29%	144%	99%	-99%	68%
10	TIRANG	-80%	-91%	-69%	-4%	-44%	-67%	10%	59%	-22%	-61%	-71%	-33%	49%	-68%	-57%	-36%	-73%
11	TIRAP	-74%	-59%	-28%	-69%	10%	21%	44%	-79%	17%	24%	-8%	10%	53%	74%	-83%	-46%	-69%
12	UPPER SIANG	-65%	-99%	-59%	52%	-1%	-77%	37%	5%	-77%	-50%	80%	-59%	163%	99%	94%	-14%	-50%
13	UPPER SUBANSARI	13%	56%	72%	77%	-99%	79%	149%	43%	1%	-54%	-100%	-100%	30%	-32%	-100%	-66%	78%
14	WEST KAMENG	-62%	-68%	-37%	-38%	-64%	37%	10%	43%	7%	-8%	-9%	49%	2%	26%	62%	-76%	14%
15	WEST SIANG	-67%	83%	-1%	45%	41%	-46%	-28%	-75%	6%	-13%	-6%	70%	151%	200%	-97%	-100%	-69%

Monsoon 2013

Chief Features and Forecast

Daily Spatial Rainfall (Latest)
 Day 1 Day 2 Day 3 Day 4 Day 5

Grided Rainfall Data Download
 Download: Rainfall, Rainfall Data, Northern Limit of Monsoon, Withdrawal of S.W. Monsoon Advance, Withdrawal of Monsoon

Latest Satellite Pictures
 08 SEP 13
 Daily Rainfall Time Series
 All India | Homecoming Zantao (Automated Rainfall)
 Weekly Max TdF
 Weekly Time Average

Rainfall Deviate Last Week
 Computed: Rainfall, All India, Week Information, Computed: Rainfall, Latest
 Earlier: Weekly, Computed: Max Series, Weekly: Rainfall Deviate

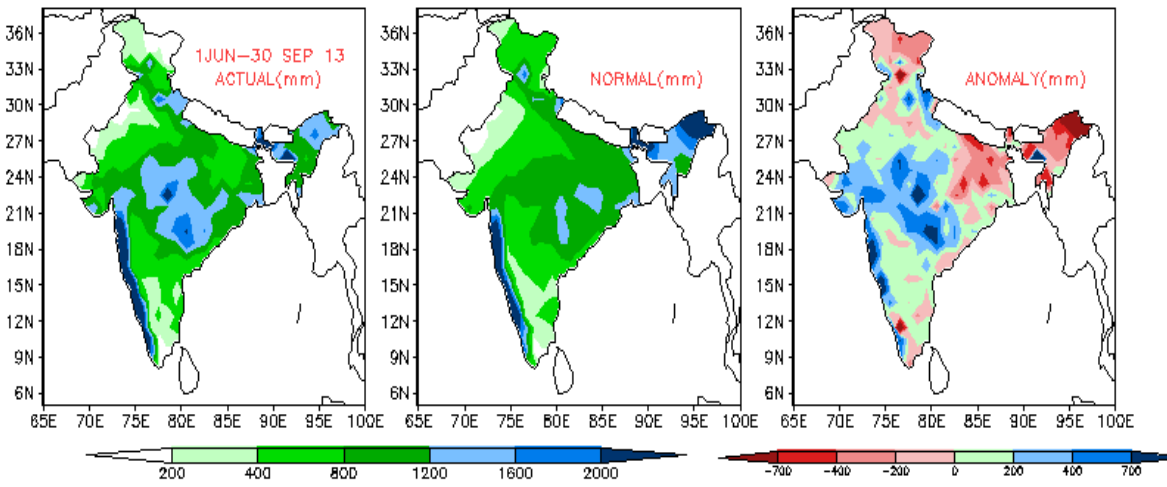
Forecast
 IMD Grided 600 by 600
 Asian Day 1 Day 2 Day 3 Day 4
 Rainfall
 Day 1 Day 2 Day 3 Day 4
 Daily Max Rainfall - All India
 Daily Max Rainfall - All India

Press Release
 Monsoon Over Asia, Kerala
 Weekly Time Average

Feedback Comments

Home 2013
 Home 2013 2013
 www.imd.gov.in

Figura 1. 17 Lluvia acumulada semanal expresada en porcentajes, los colores indican el grado de abundancia o escasez de lluvia, para todos los distritos en la India. Se interpreta en función si es antes o después de la época del monzón



“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

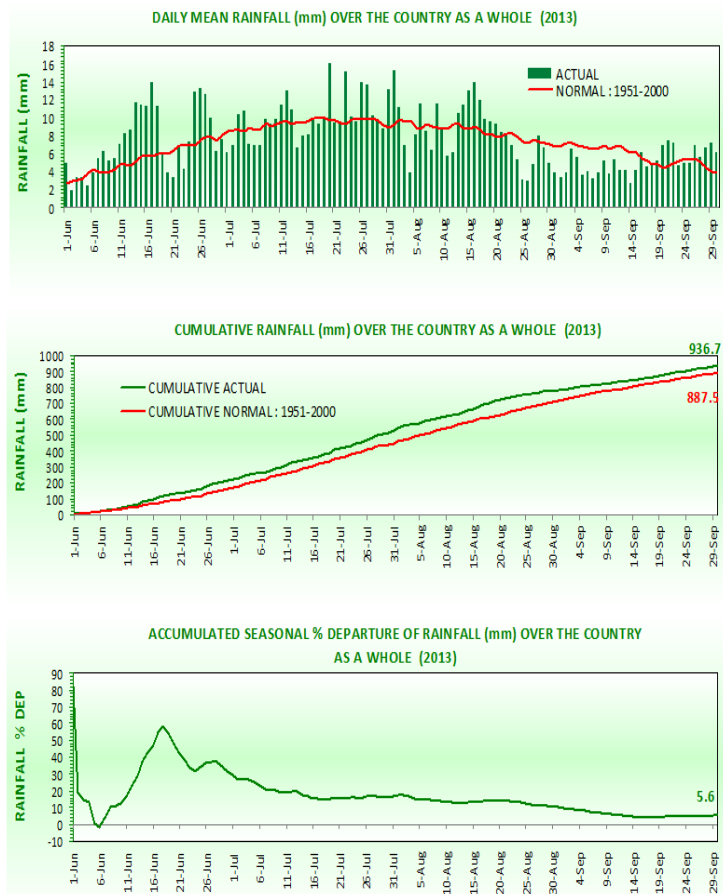


Figura 1. 18 Arriba, mapas de lluvia acumulada de los últimos 4 meses, del 1 de junio al 30 de septiembre, mostrando los valores registrados, el valor normal o medio y la anomalía, abajo, series de tiempo de lluvia diaria y lluvia acumulada para el mismo periodo.

1.4 Australia

The screenshot shows the Australian Bureau of Meteorology website. The header includes the Australian Government logo and navigation links for HOME, ABOUT, CONTACTS, and a search bar. Below the header, there are regional links for NSW, VIC, QLD, WA, SA, TAS, ACT, NT, AUSTRALIA, GLOBAL, and ANTARCTICA. The main content area is titled 'Rainfall Deficiencies and Drought Information' and includes an 'Index' with links to Introduction, Drought Statement, Australian Government drought assistance site, Weekly Rainfall Update, Drought reports for individual states, Living with drought, and Useful links. There is also an 'Introduction' section explaining that dry periods are a natural part of life in Australia, particularly in marginal areas. The 'Drought Statement' section mentions that drought statements are released monthly. The 'Australian Government Drought Assistance web-site' section states that the government is committed to providing practical support to drought-affected farmers and rural communities. The 'Weekly Rainfall Update' section mentions that the update includes comments, a map of recent rainfall, and a discussion of the impact of recent rains on rainfall deficiencies.

Figura 1. 19 Sitio web http://www.bom.gov.au/climate/drought/drought_links.shtml, correspondiente al Buró Australiano de Meteorología.

De acuerdo a lo mencionado en su sitio web, en Australia los periodos secos son parte natural de su vida, particularmente en áreas lejos de las costas. Ubicándose directamente bajo el cinturón de altas presiones subtropicales, la mayor parte del territorio experimenta una baja, pero altamente variable lluvia, por lo que se esperan años con lluvia por debajo de lo normal. Pero cuando los años pasan y las condiciones secas no son amortiguadas por periodos equitativamente húmedos o cuando un periodo seco a corto plazo es verdaderamente excepcional, comúnmente se le llama sequía. Para el caso, el Buró Australiano de Meteorología es el organismo encargado de monitorear únicamente las deficiencias de lluvia a través del territorio australiano, sin embargo, la declaración de sequía así como proporcionar asistencia ante este fenómeno, le corresponde tanto a su gobierno federal como entidades locales, los cuales consideran otros factores aparte de la precipitación, es decir, a la hora de determinar si es una sequía o no, no se basan únicamente en la baja precipitación, ya que de ser así, casi todo el territorio australiano se encontraría en sequía perpetua. Respecto únicamente a la lluvia, el Buró Australiano de Meteorología se basa en cuatro indicadores básicos, como lo son la precipitación promedio (¿cuánto esperan que llueva?), variabilidad en la precipitación (¿qué tan consistente es la precipitación en un área determinada?),

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

la precipitación histórica y las tendencias de precipitación (¿Qué tanto ha cambiado o cambiará la precipitación?) (Figura 1.19).

1.4.1 Metodología

Para la realizar la tarea anterior, elabora mapas de perspectivas estacionales de precipitación, los cuales muestran la probabilidad de tiempo promedio más seco o húmedo en un periodo de tres meses. Existe un apartado denominado perspectivas estacionales (seasonal outlooks), donde se puede consultar “pronósticos” o “panoramas” a tres meses para lluvia, temperatura, ciclones tropicales y El Niño/La Niña. En la sección de mapas de condiciones recientes, se pueden consultar las condiciones actuales por día, semanas meses hasta tres años y siempre se muestra el más reciente que es el día consultado, para precipitación, humedad, temperatura y cobertura vegetal (NDVI), además de las series de tiempo de esos datos. Puede bajarse por periodos de tiempo o por estación (figura 1.20).

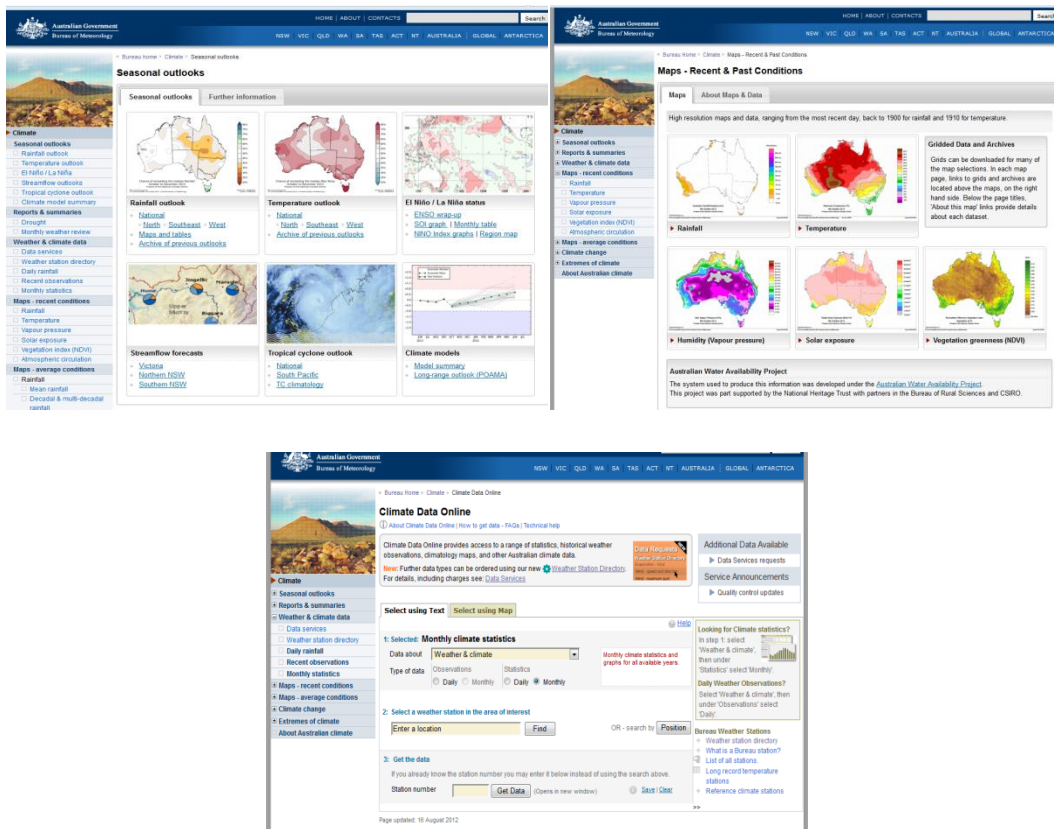


Figura 1. 20 En la sección de perspectivas estacionales, se pueden consultar panoramas para precipitación, temperatura, El Niño/La Niña, ciclones tropicales, etc. Se pueden consultar archivos previos, así como las condiciones actuales y acceso a los datos.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

Las probabilidades son generadas a partir del Modelo Predictivo Océano-Atmósfera para Australia (POAMA), un modelo dinámico del clima. Dichas probabilidades no deben tomarse como unos sí o no categóricos en los pronósticos, sino como herramientas en el manejo y toma de decisiones frente al manejo de riesgos (figuras 1.21 y 1.23). El POAMA es un modelo climático dinámico desarrollado por el Buró de Meteorología y el CSIRO. Este tipo de modelo acoplado es lo último en cuanto a sistemas de pronóstico estacional, el cual se encuentra en continuo desarrollo.

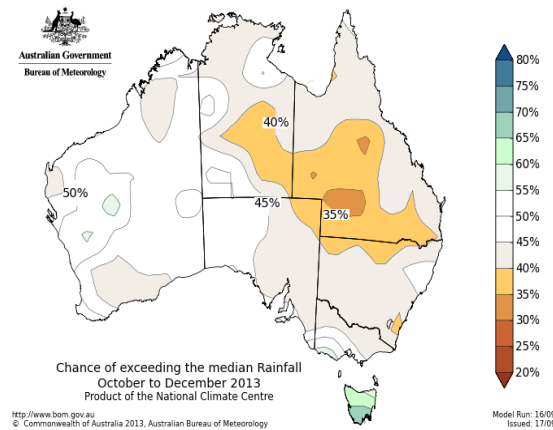
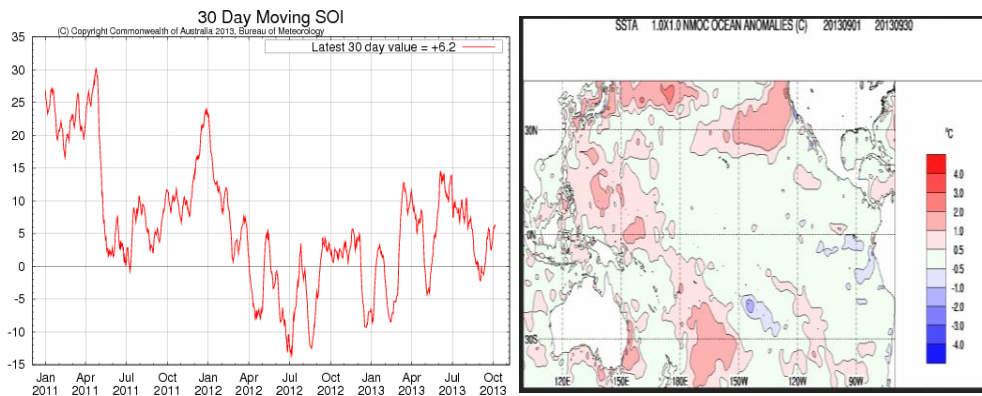


Figura 1. 21 Mapa de prospectivas de precipitación en porcentajes a 3 meses para toda Australia, de acuerdo al modelo POAMA.



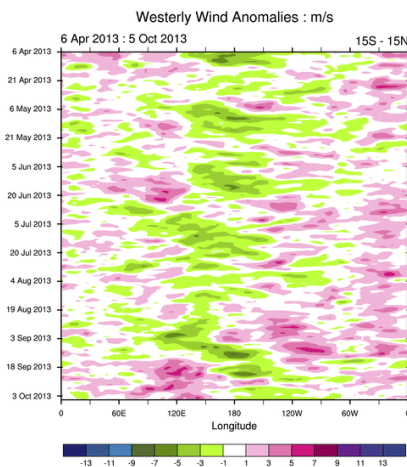


Figura 1. 22 Algunos productos disponibles de monitoreo de condiciones de El Niño 3.4, que es la zona referida que afecta principalmente a Australia. De arriba abajo y de izquierda a derecha, variación índice de la Oscilación del Sur desde enero del 2011, anomalías de la temperatura superficial del mar para el Pacífico y anomalía de vientos del oeste desde abril del año en curso (2013).

La confianza o exactitud de las perspectivas se mide comparando que tan frecuentemente favoreció una categoría en particular (por ejemplo, cuando lluvia por encima de la media tuvo más probabilidad de ocurrir que la de debajo de la media en una época en particular) y aquella categoría “más probable” que fue posteriormente observada. Esta medición de efectividad es conocida como “porcentaje de consistencia” y ha sido probada sobre el periodo de 1981 al 2010. Una fuerte consistencia significa que las pruebas del modelo en datos históricos muestran una fuerte relación entre la categoría “más probable” (sobre/debajo de la media). En áreas con fuerte consistencia, una relativamente alta confianza puede establecerse en futuras probabilidades de esas perspectivas. Una débil consistencia significa que la relación histórica y por lo tanto la confianza de esa perspectiva, es baja. En lugares y épocas donde las perspectivas son más efectivas, la categoría del resultado eventual (sobre o debajo de la media) es consistente con la categoría favorecida en la perspectiva alrededor de un 75 % de las veces.

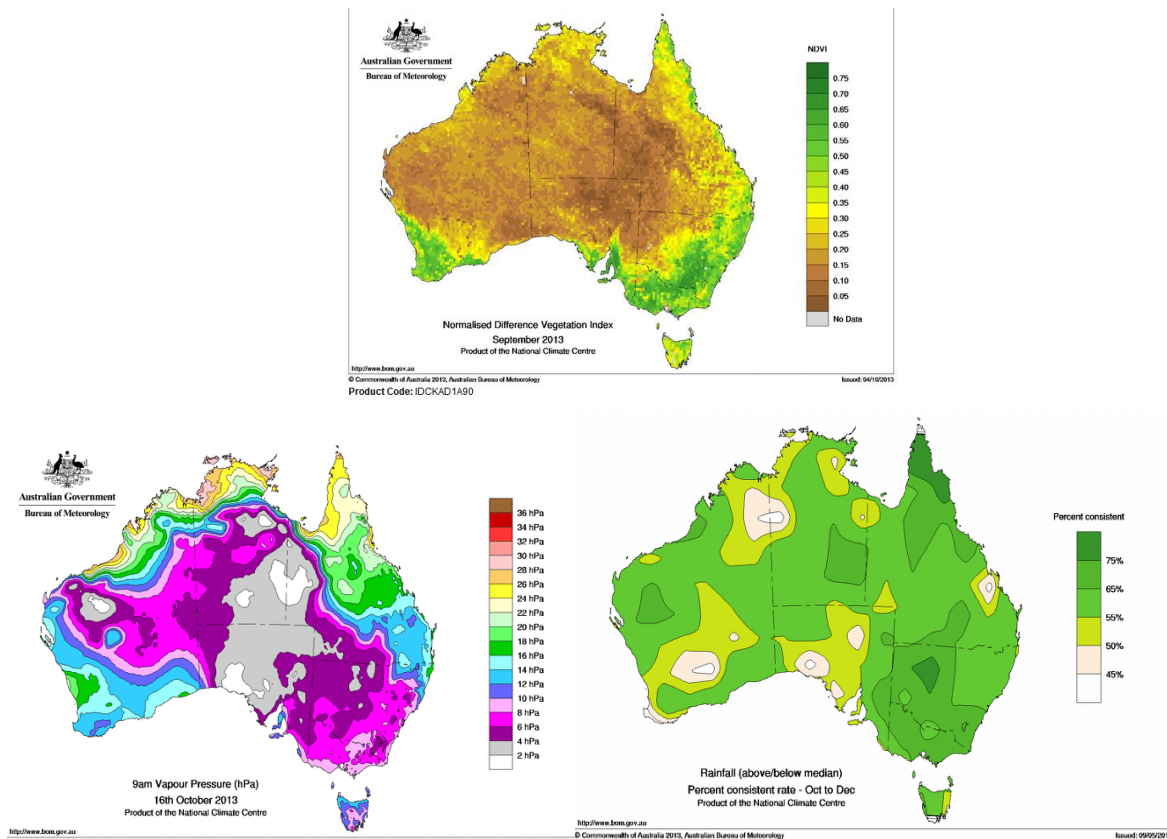


Figura 1. 23 Mapas de condiciones actuales para Australia, las cuales se encuentran disponibles a diario, de arriba abajo y izquierda a derecha, índice de vegetación diferenciado (NDVI), presión de vapor en mb (humedad).

El modelo POAMA es el modelo climático y dinámico del Buró de Meteorología, usado para periodos de semanas a estaciones a través de perspectivas climáticas inter-anales. Es lo último en pronóstico a largo plazo usando datos de observaciones de océano, atmósfera, hielo y tierra para inicializar las perspectivas a 9 meses. Fue desarrollado en conjunto con el Buró de Meteorología y por la división de investigación marina y atmosférica de la CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation). El centro nacional climático utiliza este modelo para elaborar varios productos, incluyendo pronósticos de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), del dipolo del Océano Índico y perspectivas estacionales de lluvia y temperatura. Los pronósticos del POAMA se corren cada semana y consisten de 33 escenarios para los siguientes 9 meses. La variabilidad de los resultados entre las 33 corridas da una indicación de la incertidumbre en la evolución del sistema climático. Cuando muchos pronósticos individuales son considerados en conjunto, se dice que son comprimidos en un ensamble y el cómo se “propagan o distribuyen” esa condiciones que pronostican, pueden ser usados para calibrar la probabilidad de condiciones futuras, como ejemplo si 30 de los 33 miembros del ensamble sugieren tiempo seco a futuro, podemos decir que

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

existe alrededor de 90 % de oportunidad de condiciones secas en la próxima temporada.

En lo que respecta a El Niño, se utiliza un área de monitoreo estándar en el Pacífico Tropical, llamada El Niño 3.4. Las temperaturas superficiales en dicha región están relacionadas muy cercanamente al clima australiano. El índice del NIÑO 3.4 se define como el promedio de anomalías de la temperatura superficial del mar sobre la región comprendida en los 5° N-5° S y los 170 °-120 ° O. El Niño (un evento cálido) es considerado que ocurre cuando el índice de El Niño 3.4 excede los 0.8 °C. De manera similar La Niña (un evento frío) sucede cuando El Niño 3.4 es menor que -0.8 °C. Esas temperaturas deben ser mantenidas en un número de meses para que sea considerado un evento de ENSO. Los pronósticos del POAMA de El Niño 3.4 se dan a 9 meses en adelante para monitorear la posible evolución de las condiciones del ENSO. Pronósticos similares tanto de El Niño 3 y el Niño 4 se muestran también para monitorear los detalles de posibles condiciones futuras del ENSO (figura 1.22).

Otra región oceánica de gran variabilidad en cuanto a su temperatura superficial y los impactos que causa en el clima australiano se localiza en el Océano Índico. Un modo de variabilidad que afecta la lluvia en Australia, particularmente el sureste del país, es el Dipolo del Océano Índico (IOD), cuyo índice se define como la diferencia entre las anomalías de la temperatura superficial en el oeste (50°-70°E, 10°S-10°N) y este (90°-110°E, 10°-0°S) del océano Índico Tropical. Un IOD positivo sucede cuando la región oeste es más cálida que la promedio y la región este es más fresca. La lluvia en invierno y primavera en Australia generalmente se incrementa en años de IOD negativo y disminuye en años de IOD positivo. El índice del IOD es positivo si es mayor a 0.4 °C y negativo si es menor a -0.4 °C. Al igual que El Niño, los pronósticos del POAMA se dan a 9 meses.

1.5 El Monitor de Sequía de los Estados Unidos (USDM).

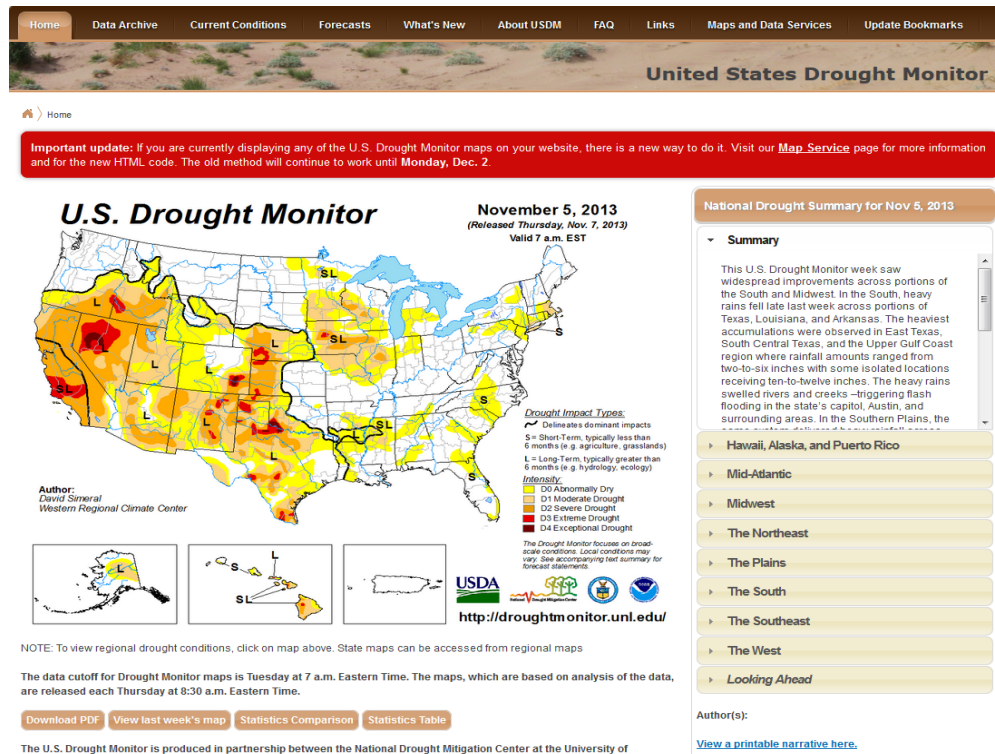


Figura 1. 24 Sitio web que alberga al monitor de sequía de los Estados Unidos, que consiste en un mapa que despliega información actual sobre la situación de sequía en territorio norteamericano. <http://droughtmonitor.unl.edu/>.

Debido a las pérdidas ocasionadas por la sequía de 1987-89 en Estados Unidos, estimadas en 20 billones de dólares en sectores agrícolas y forestales, con 10 billones adicionales asociados a pérdidas con el incremento de los costos en el sector alimentario (Riebsame et al. 1991) y, aunado también a los efectos de posteriores eventos de sequía dentro de los Estados Unidos, como los registrados en 1995-96 en el suroeste y sur de las Grandes Planicies, la de 1998 en el sur, la de 1999 en el noreste, la del 2000 en el sur, medio oeste y las Grandes Planicies, la de 1998-2002 en el sureste y la del 2002 en el este; se incrementó el interés en definir mejor, monitorear y predecir la sequía. Así, en agosto de 1999, fue lanzado oficialmente el Monitor de Sequía de los Estados Unidos (USDM), durante una conferencia de prensa en la Casa Blanca en conjunto con el Departamento de Comercio y Agricultura. Fue creado con el propósito de trazar y desplegar la magnitud y extensión espacial de la sequía y sus impactos a través de los Estados Unidos (figura 1.24).

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

El monitor se produce semanalmente y clasifica la severidad de la sequía en cuatro grandes categorías, con una quinta categoría describiendo “condiciones anormalmente secas”. Los umbrales de las categorías asignados a las localidades en el mapa son determinados de un gran número de indicadores, o herramientas, mezclados a su vez con interpretaciones subjetivas. Su gran fortaleza está en la inclusión de expertos en clima y agua a través del país, lo cual le da al producto un sentimiento único y nacional de realidad tanto a nivel local como estatal. Este producto también sirve como ejemplo de cooperación entre agencias, como lo son el Centro Nacional de Mitigación de la Sequía, localizado en la universidad de Nebraska, en Lincoln y los departamentos de comercio y agricultura.

No existe una sola definición de sequía que funcione en todas las circunstancias (Wilhite, 2000), es decir, los productores agrícolas y gestores del agua pueden confiar en conjuntos de indicadores completamente diferentes, que frecuentemente son representados en un mapa o forma gráfica para determinar la distribución espacial de las condiciones de sequía. Los autores de este producto también confían en un número de claves e indicadores auxiliares provenientes de distintas agencias. El resultado final es un mapa que fusiona estos índices, usando la experiencia humana a través del territorio norteamericano, mediante una imagen de fácil lectura que presenta el estado actual de las condiciones de sequía, acompañado de un texto sobre los impactos. El monitor no es un índice, ni está basado en uno solo, sino que es un compuesto desarrollado de una rica información, que incluye índices climáticos, modelos numéricos y la incorporación de expertos regionales y locales alrededor del país.

1.5.1 Metodología

La magnitud de la sequía se clasifica en cuatro niveles: D1, D2, D3, D4, donde áreas con D1 indican sequía moderada y D4 con sequía excepcional (figura 1.25), mientras que el nivel D0, designan áreas que experimentan ya sea condiciones anormalmente secas que pueden preceder a sequía o describir impactos persistentes después de un evento de sequía. Las sequías generalmente son lentas para emerger y lentas para retroceder, de manera que el monitor cambia incrementándose, al menos, un nivel por semana, durante una sequía que se intensifica o amortigua, aunque, incluso después de que la causa física de la sequía en una región ha sido eliminada (como lo es un patrón de circulación atmosférico anómalo), un área puede aún experimentar impactos hidrológicos persistentes por meses o años, dependiendo del tiempo, duración e intensidad de la sequía.

La severidad de las categorías en el monitor de sequía, se basan en seis indicadores físicos y muchos suplementarios. Ellos son el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) (Palmer, 1965), Percentiles del Modelo de humedad del Suelo del Centro de Predicción Climática CPC (Huang et al., 1996), Percentiles de Flujo de Corriente Diarios del Registro Geológico de los Estados Unidos (USGS), Porcentaje de Precipitación Normal (Willeke et al., 1994), Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, McKee et al., 1993) y el Índice de Condición Vegetal (VT, Kogan 1995). En la tabla se muestran las relaciones entre estos seis indicadores y la magnitud de la sequía, las cuales son completamente flexibles. También se explica que existen otros indicadores que funcionan como auxiliares, los cuales ayudan a complementar los criterios de clasificación, entre los que están el Índice de Peligro de Incendios del Servicio Forestal de los Estados Unidos, observaciones relacionadas a la evaporación tal como humedad relativa y temperatura respecto a las normales, niveles de las reservas en ríos, lagos y acuíferos, observaciones en campo de la humedad del suelo e incluso, observaciones de cobertura de nieve en sitios montañosos remotos, aunque muchos de estos solo son medidos en ciertas localidades y en periodos de tiempo más espaciados (figura 1.26).

En lo referente a la cuestión del impacto por la sequía, el monitor anteriormente asignaba las etiquetas A, W o F a las áreas donde estos impactos pueden estar ocurriendo o son inminentes y son usadas únicamente cuando dichos impactos difieren dentro de una región delineada. La A representaba efectos en la agricultura, tales como cultivos y condiciones de pastizales, la W era referente al agua, es decir, cuestiones hidrológicas y de abastecimiento, que abarca el flujo en ríos, cobertura de nieve, acuíferos y reservas; mientras que la F denotaba alto riesgo en incendios de forma anormal. Cuando no se indicaba en el mapa ninguna de estas etiquetas, significa que existen impactos de los tres tipos (figura 1.27) (2002). Actualmente, el impacto se indica si es a largo o corto plazo con las siglas L, S o ambas, SL.

Category	Drought condition	Percentile chance
D0	Abnormally dry	20 to ≤ 30
D1	Drought—moderate	10 to ≤ 20
D2	Drought—severe	5 to ≤ 10
D3	Drought—extreme	2 to ≤ 5
D4	Drought—exceptional	≤ 2

Figura 1. 25 Nivel de severidad de las sequías, basados en percentiles de ocurrencia

Drought Monitor classification							
Drought type		Associated ranges of objective indicators					
Category	Description	Palmer drought	CPC soil moisture	USGS weekly	Percent of normal	Standardized precipitation	Satellite vegetation
D0	Abnormally dry	-1.0 to -1.9	21-30	21-30	< 75% for 3 months	-0.5 to -0.7	36-45
D1	Moderate drought	-2.0 to -2.9	11-20	11-20	< 70% for 3 months	-0.8 to -1.2	26-35
D2	Severe drought	-3.0 to -3.9	6-10	6-10	< 65% for 6 months	-1.3 to -1.5	16-25
D3	Extreme drought	-4.0 to -4.9	3-5	3-5	< 60% for 6 months	-1.6 to -1.9	6-15
D4	Exceptional drought	-5.0 or less	0-2	0-2	< 65% for 12 months	-2.0 or less	1-5

Figura 1. 26 Indicadores principales utilizados en el monitor de sequía asociados a la magnitud del evento

Category	Agriculture (A)	Water (W)	Fire (F)
D0	Slows farm activity, and crop and pasture growth	Streamflow below average	Fire risk above average
D1	Some damage to crops and pastures	Streamflow, reservoir, and well levels are low; some water shortages develop	Fire risk high
D2	Crop and pasture losses likely	Water shortages common; water restrictions imposed	Fire risk very high
D3	Major crop/pasture losses	Widespread water shortages and restrictions	Fire risk extreme
D4	Exceptional and widespread crop/pasture losses	Shortages of water in stream, reservoirs, and wells creating emergencies	Fire risk exceptionally dangerous

Figura 1. 27 Tipos de impacto a como anteriormente describía el monitor de sequía; asociados a la agricultura, agua e incendios (2002). Hoy en día solo se indica si es a corto o largo plazo.

1.6 Monitor de Sequía de Norteamérica (NADM).

El monitor de sequía de Norteamérica (NADM) es un esfuerzo cooperativo entre expertos en sequía de Canadá, México y Estados Unidos para monitorear sequía a través del continente de forma regular (Figura). El programa inició en 2002 y es parte de un esfuerzo mayor para mejorar para mejorar el monitoreo de clima extremo en el continente. Está basado en el mayormente exitoso Monitor de sequía de los Estados Unidos (USDM), como tal, está siendo desarrollado para proporcionar una evaluación comprensiva, integrada y continua de la sequía en los tres países. Desde su origen en 1999, el monitor de sequía de los Estados Unidos (Svoboda et al. 2002), ha sido exitoso al evaluar y comunicar el estado de la sequía en los Estados Unidos de forma semanal. Al igual que este, el NADM combina ciencia y arte, ya que no existe una manera correcta de medir la sequía. Los índices de sequía son usados para detectar y medir sequías, pero índices diferentes miden la sequía de diferentes formas y ni un solo índice trabaja bajo todas las circunstancias (Heim, 2002), de manera que el concepto de “Monitor de Sequía” fue desarrollado (conjuntamente por el Servicio Meteorológico Nacional NWS, Centro Nacional de Mitigación de la Sequía y el Departamento de Agricultura) como un proceso que sintetiza múltiples índices, perspectivas e impactos locales, en un reporte que mejor representa las condiciones actuales de sequía. El resultado final de cada Monitor de Sequía es un consenso de científicos académicos, federales y estatales (figura 1.28).

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”



Climate Monitoring

State of the Climate

BAMS State of the Climate

Temp, Precip, and Drought

Climate at a Glance

Extremes

Societal Impacts

Snow and Ice

Teleconnections

GHCN Monthly

Monitoring References

North American Drought Monitor

Overview | References | Links



NADM maps

Drought Monitoring Indices and Data

Other Drought Monitoring Indices

- o NESDIS Satellite VHI
- o CPC Modeled Soil Moisture
- o U.S. NWS Precipitation Analysis

Geographical Reference Maps

Climatology Maps

Figura 1. 28 Sitio web donde reside el Monitor de Sequía de Norteamérica (NADM), con los enlaces correspondientes a los distintos tipos de indicadores, datos disponibles para la República Mexicana. <http://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/nadm/>

El monitoreo de sequía se va vuelto una parte integral de esfuerzos para la planeación, preparación y mitigación de la sequía a nivel nacional, regional y local. La sequía se puede desarrollar en todas las regiones del continente y sus efectos pueden ser devastadores. Desde 1980, las mayores sequías y ondas de calor dentro de los Estados Unidos han resultado en costos que exceden los 100 billones de dólares, fácilmente uno de los más costosos desastres relacionados al clima sobre el continente en aquel año (Lott and Ross, 2000). Pero en la economía global de hoy, los costos y afectaciones de sequía frecuentemente se extienden más allá de límites internacionales. En 2002, la continua sequía en la mayor parte del SO de los Estados Unidos y un prolongado periodo más seco de lo normal en México llevaron a debates acerca de los derechos compartidos de agua entre los dos países. Y en el norte, la sequía de multi-anual en el norte de las Rocallosas y oeste de las grandes planicies se extendió hacia las praderas agrícolas de Canadá, afectando mayormente la productividad agrícola en los dos países que proporciona mucho de la producción de comida en el mundo.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

Aunque todos los tres países tienen programas de monitoreo activo del clima y sequía, hasta tiempo reciente ha habido únicamente cooperación limitada y coordinación entre expertos en la materia de estos países. Los principales participantes dentro del NADM en Estados Unidos son el NCDC y el CPC de la NOAA, el Departamento de Agricultura y el centro Nacional para la mitigación de la sequía. Para Canadá y México, participan mayoritariamente el departamento de agricultura y agroalimentario de Canadá y su respectivo servicio meteorológico nacional, por parte de México, todo corre a cargo del Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA.

1.6.1 Información disponible para el monitor de sequía

El mismo sitio web, en el enlace *Drought Monitoring indices and data*, se pueden consultar los índices de Palmer históricos (así como sus derivados) y de Precipitación Estandarizado hasta la fecha actual por estación para México por mes (Figura 1.29), los cuales, de acuerdo al sitio, pueden actualizarse hasta la primera quincena de cada mes. El listado de estaciones usadas para el cálculo de los índices, se muestra en el anexo.

En el enlace donde dice NESDIS Satellite VHI, pueden obtenerse datos relacionados con la condición y estrés vegetal en formato hdf, consistente en los siguientes índices (figura 1.30):

Índice Vegetal Normalizado Diferenciado (suavizado)

Índice de Condición Vegetal

Temperatura de (suavizada)

Índice de Condición Térmico

Índice de Salud Vegetal

Estos abarcan una malla que abarca en latitud de los 75.024 ° N a -55.152 ° S y de longitud de los -180 ° O a los 180 ° E, por lo que está contenida la República Mexicana y se publican semanalmente, contienen los históricos desde 1981, aunque es necesario aclarar, no es producto oficial de la NOAA, sino que está libre para usos públicos y dicho sitio está sujeto a cambios sin previo aviso.

El sitio ftp para descargarlos directamente es ftp://ftp.star.nesdis.noaa.gov/pub/corp/scsb/wguo/GVix/GVix_VH_16km/NVI/.

Por último, en el enlace CPC Modeled Soil Moisture, se encuentran los mapas referentes al modelo hidrológico de una capa que calcula la humedad del suelo, el cual toma la precipitación y temperatura observada, estimando además de la humedad del suelo, evaporación y runoff (Figura). La evaporación potencial es calculada a partir de la temperatura observada (Huang et al., 1996; Van den Dool et al, 2003).

NOAA NATIONAL CLIMATIC DATA CENTER
NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION

Home About NCDC Contact Help **New to Climate Information?** **SEARCH**

Home > Climate Monitoring > Temp, Precip, and Drought > North American Drought Monitor (NADM) Indices October Global Release: 16 Nov 2013, 11:00 AM EST

Climate Monitoring

- State of the Climate
- BAMS State of the Climate
- Temp, Precip, and Drought**
- Climate at a Glance
- Extremes
- Societal Impacts
- Snow and Ice
- Teleconnections
- GHCN Monthly
- Monitoring References

North American Drought Monitor Indices

Data: Indicator:

1-Month Standardized Precipitation Index
August 2013

* Based on Preliminary Data
** Base Period for Averages 1951-2001

Legend for 1-Month Standardized Precipitation Index:

- 2.00 or less
- 1.50 to -1.00
- 1.00 to -0.50
- 0.50 to 0.00
- 0.00 to 0.50
- 0.50 to 1.00
- 1.00 to 1.50
- 1.50 to 2.00
- 2.00 or greater

Legend for 1-Month Standardized Precipitation Index (Color Scale):

-2 -1.6 -1.2 -0.8 0.0 0.4 0.8 1.2 1.6 2.0 +2

dry near normal wet

Data Files

- 01mon-spi-ak.txt
- 01mon-spi-cn.txt
- 01mon-spi-mx.txt
- 01mon-spi-us.txt
- 02mon-spi-ak.txt
- 02mon-spi-cn.txt
- 02mon-spi-mx.txt
- 02mon-spi-us.txt
- 03mon-spi-ak.txt
- 03mon-spi-cn.txt
- 03mon-spi-mx.txt
- 03mon-spi-us.txt
- 06mon-spi-ak.txt
- 06mon-spi-cn.txt
- 06mon-spi-mx.txt
- 06mon-spi-us.txt
- 09mon-spi-ak.txt
- 09mon-spi-cn.txt

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

MX	0003061	8	1920	0.23	1.57	3.98	8.24	12.13	13.85	12.66	11.31	10.10	8.99	7.98	7.08
MX	0003061	8	1921	6.27	5.44	4.63	3.98	3.38	2.87	2.45	2.09	1.77	1.48	1.20	0.98
MX	0003061	8	1922	0.78	0.53	0.27	0.12	-0.02	-0.10	-0.14	-0.16	-0.17	-0.16	-0.15	-0.14
MX	0003061	8	1923	-0.13	-0.16	-0.23	-0.24	-0.25	-0.26	-0.23	-0.21	-0.19	-0.17	-0.16	-0.15
MX	0003061	8	1924	-0.14	-0.18	-0.24	-0.25	-0.27	-0.27	-0.24	-0.22	-0.19	-0.18	-0.17	-0.15
MX	0003061	8	1925	-0.14	-0.17	-0.24	-0.25	-0.26	-0.26	-0.24	-0.22	-0.19	-0.17	-0.17	-0.15
MX	0003061	8	1926	-0.14	-0.17	-0.23	-0.24	-0.26	-0.26	-0.24	-0.21	-0.19	-0.17	-0.17	-0.15
MX	0003061	8	1927	-0.14	-0.17	-0.23	-0.24	-0.26	-0.26	-0.24	-0.21	-0.19	-0.17	-0.17	-0.15
MX	0003061	8	1928	-0.14	-0.18	-0.24	-0.25	-0.27	-0.27	-0.24	-0.22	-0.20	-0.18	-0.17	-0.15
MX	0003061	8	1929	-0.14	-0.18	-0.24	-0.25	-0.26	-0.26	-0.24	-0.22	-0.19	-0.17	-0.17	-0.15
MX	0003061	8	1930	0.28	-0.14	0.36	0.26	0.17	-0.13	-0.31	-1.22	-1.85	-2.18	-0.62	0.33
MX	0003061	8	1931	0.58	0.77	0.28	1.21	0.81	0.53	1.96	-0.39	5.08	3.25	2.02	0.76
MX	0003061	8	1932	-0.28	-0.46	-0.97	-1.06	-1.13	-1.12	-0.40	-1.57	-2.06	-2.44	-2.56	-2.60
MX	0003061	8	1933	-2.49	-2.61	-2.58	-2.37	-2.19	-1.96	-2.20	-2.63	-3.11	-1.72	-2.25	-2.65
MX	0003061	8	1934	-2.78	-2.87	-2.81	-2.58	-2.38	-2.13	-2.35	-2.76	4.87	3.06	1.84	4.76
MX	0003061	8	1935	3.66	3.18	2.26	1.79	1.35	1.04	0.02	4.41	4.43	2.66	1.70	4.41
MX	0003061	8	1936	4.11	2.81	1.91	1.47	1.06	0.78	2.61	1.15	-0.73	-1.66	-1.86	-0.40
MX	0003061	8	1937	3.28	3.78	3.52	3.73	3.93	3.90	2.63	0.63	1.47	1.19	0.21	0.53
MX	0003061	8	1938	2.01	1.01	0.31	0.06	-0.17	-0.28	-0.87	-1.11	5.23	6.28	4.80	4.96
MX	0003061	8	1939	7.49	7.56	6.94	6.87	6.81	6.52	5.40	4.47	12.25	11.36	9.37	7.41
MX	0003061	8	1940	5.69	4.16	4.38	3.65	2.99	2.47	3.09	2.67	6.02	4.11	2.79	1.91
MX	0003061	8	1941	0.75	0.15	1.19	0.84	0.52	0.31	3.89	1.75	0.71	-0.72	-1.50	-1.99
MX	0003061	8	1942	-2.19	-2.07	-2.09	-1.93	-1.80	-1.61	-1.88	-2.48	-2.97	-2.40	-1.02	-1.76
MX	0003061	8	1943	-2.28	-2.42	-2.40	-2.21	-2.05	1.49	0.20	-0.74	5.12	5.17	3.79	2.89
MX	0003061	8	1944	1.91	1.17	3.34	2.81	2.30	1.91	0.76	-0.36	5.74	3.86	3.28	1.91
MX	0003061	8	1945	0.93	-0.05	-0.50	-0.67	-0.81	-0.85	-1.46	3.19	1.24	7.10	5.54	3.96
MX	0003061	8	1946	4.05	2.76	1.85	1.41	1.00	0.72	3.84	3.20	6.64	5.03	4.07	3.82
MX	0003061	8	1947	2.49	1.34	1.11	0.76	0.54	0.32	-0.54	-0.87	-0.39	-1.25	-0.73	-0.90
MX	0003061	8	1948	-1.34	-0.67	-1.12	-1.06	-1.05	-0.45	0.73	-0.72	-0.53	0.96	0.49	0.80
MX	0003061	8	1949	1.12	1.18	0.27	-0.04	-0.31	-0.15	-0.40	-1.07	0.61	0.69	-0.37	0.62

Figura 1. 29 En la subsección de índices de monitoreo y datos, se pueden consultar los índices ya calculados derivados de Palmer y Precipitación Estandarizado para México. Contiene datos de estaciones en México con sus respectivas claves que datan desde 1920. <http://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/nadm/indices.php> .

NOAA STAR CENTER FOR SATELLITE APPLICATIONS AND RESEARCH

Search STAR websites

STAR - Global Vegetation Health Products

Downloading Vegetation Health Products Data

Vegetation Health related data (listed as below) is available online. All of the links below reference anonymous FTP servers.

AVHRR Vegetation Health Product (AVHRR-VHP)

AVHRR-VHP is a re-processed Vegetation Health data set derived from AVHRR GAC data. It was processed by the newly developed operational VHP and improve data quality. It can process GAC data from NOAA-19, as well as FRAC data from METOP A and METOP-B. In the future, it will produce v providing official VHP products. This web site provides recent VH data as a backup/alternative data source. VHP product posted on this VH web site **Starting form week 18, 2013, the following 4km AVHRR-VHP data are posted on this FTP site:**

- [User Guide of VHP - FTP site](#)
- **Most Recent Data**
 - [4km AVHRR-VHP data in NETCDF format - FTP site](#)
 - [4km AVHRR-VHP data in GEO-TIFF format - FTP site](#)

GVI-x VH data set

We planned to stop updating below GVI-x data on this FTP site since week 18,2013. However, Per request of users, we resumed the processing of

- [Data User Guide of GVI-x weekly composite product - FTP site](#)
- [Data User Guide of GVI-x VH products - FTP site](#)
- **Most Recent Data**
 - [16.8 and 4 km GVI-x weekly composite data in HDF format - FTP site](#)
 - [16.8 and 4 km GVI-x derived VH in HDF format - FTP site](#)
 - [16 km GVI-x derived VH in Geo-TIFF format - FTP site](#)
- **Archived GVI-x derived Vegetation Health Indices (VH) data:**
 - [GVI-x derived indices \(16km since 1981\) - FTP site](#)
 - [NDVI \(NVI - FTP site\)](#)
 - [Smoothed NDVI \(SMN - FTP site\)](#)
 - [Vegetation Condition Index \(VCI - FTP site\)](#)
 - [Brightness Temperature \(BT - FTP site\)](#)
 - [Smoothed Brightness Temperature \(SMT - FTP site\)](#)
 - [Temperature Condition Index \(TCI - FTP site\)](#)
 - [Vegetation Health Index \(VHI - FTP site\)](#)
 - [Climatology: Max and Min NDVI \(MXN - FTP site\) and \(MNN - FTP site\)](#)
 - [Climatology: Max and Min of Brightness Temperature \(MXT - FTP site\) and \(MNT - FTP site\)](#)

Índice de ftp://ftp.star.nesdis.noaa.gov/pub/corp/scsb/wguo/GVIx/GVIx_VH_16km/NVI/

Subir al directorio superior.

Nombre	Tamaño	Última modificación
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P35.hdf	1097 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P36.hdf	1091 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P37.hdf	1083 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P38.hdf	1078 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P39.hdf	1063 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P40.hdf	1064 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P41.hdf	1049 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P42.hdf	1035 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P43.hdf	1028 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P44.hdf	992 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P45.hdf	960 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P46.hdf	927 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P47.hdf	889 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P48.hdf	866 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P49.hdf	844 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P50.hdf	832 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P51.hdf	823 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1981_P52.hdf	819 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1982_P01.hdf	838 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1982_P02.hdf	854 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1982_P03.hdf	873 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1982_P04.hdf	901 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1982_P05.hdf	927 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1982_P06.hdf	960 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1982_P07.hdf	982 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.
<input type="checkbox"/> GVIx_NC_G16_C07_NVI_Y1982_P08.hdf	993 KB	23/03/2007 12:00:00 a.m.

Figura 1. 30 Sitio web de donde pueden obtenerse datos de indicadores relacionados con el estrés hídrico y térmico de las plantas. La malla abraza una amplia franja, dentro de la cual está comprendida la república mexicana. <http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/> .

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

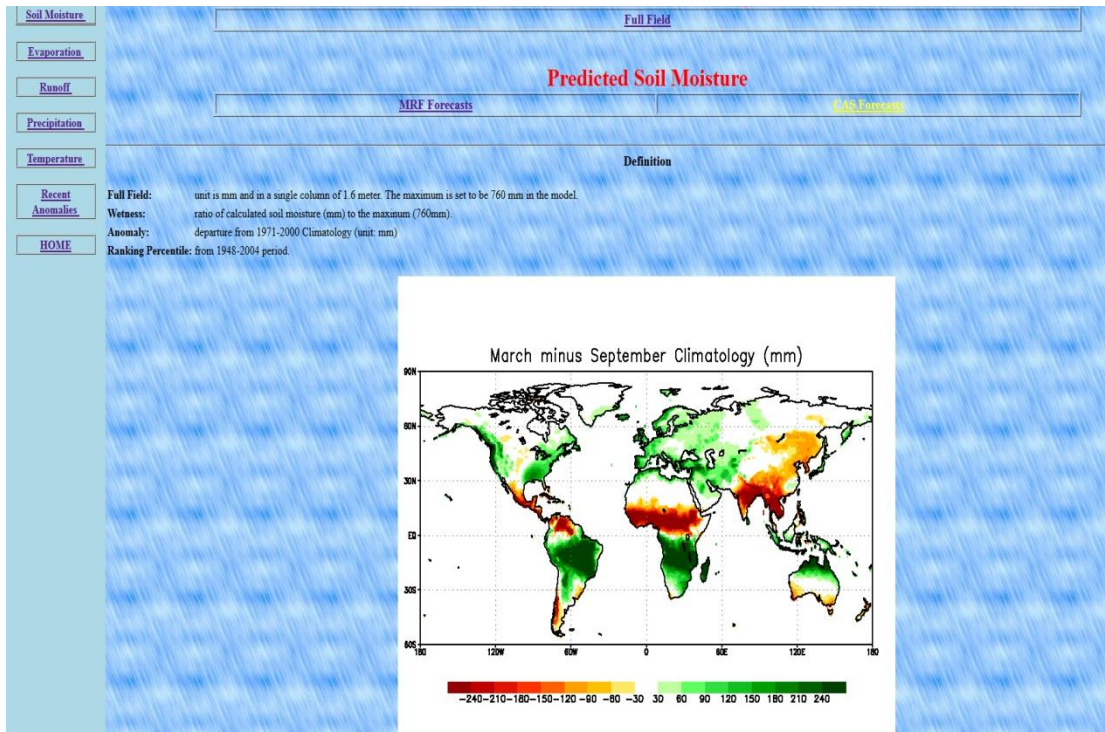


Figura 1. 31 Subsección correspondiente al modelo hídrico del CPC, donde únicamente se pueden consultar mapas de las salidas para las variables modeladas de humedad del suelo, evaporación y runoff.

La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) implementó el programa “Detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción remota” en el año de 1999, en respuesta a la situación de emergencia registrada por los incendios forestales de la temporada de 1998, en el cual se registraron 14,445 incendios forestales afectando 849,632 hectáreas en el territorio mexicano (CONAFOR, 2006). En ese mismo año, se lleva a cabo el estudio “Los incendios en México: un análisis de su amenaza a la biodiversidad”, como una forma de identificar las áreas afectadas por los incendios forestales, el cual se realizó posterior a los meses de incendios, y tuvo como uno de los objetivos proponer una metodología de análisis para la detección de los incendios por medio de imágenes de satélite. Como opción inicial, se usaron primeramente imágenes de satélite DMSP-OLS (Defense Meteorological Satellites Program - Operational Linescan System), facilitadas por NGDC-NOAA (National Geophysical Data Center – National Oceanic and Atmospheric Administration). Los resultados fueron utilizados por la entonces Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), en la definición de áreas para establecer la campaña de restauración ecológica y contra el cambio de uso del suelo en áreas afectadas por incendios forestales.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

Sin embargo, el uso de las imágenes DMSP-OLS impedía su consulta hasta tres días después de su registro, por lo que posteriormente se empezaron a utilizar imágenes de satélite AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) provenientes de la serie de satélites NOAA, proporcionadas por el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Para la detección de puntos de calor con imágenes AVHRR, se aplica el algoritmo de Flasse y Ceccato (1996) con algunos ajustes para México. Para el año 2000 el proceso del programa fue semi-automatizado para imágenes nocturnas y diurnas y el portal web se abrió a todo público. Pero en ese mismo año, la CONABIO adquiere una estación de recepción de imágenes AVHRR, con la finalidad de reducir el tiempo de respuesta, gracias al apoyo de instituciones como la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) y el Centrum für Internationale Migration und Entwicklung (CIM) del gobierno Alemán. Para el año 2001, la Conabio con el apoyo del FONDEN (Fondo Nacional para Desastres Naturales) y de la SEMARNAP, adquiere un sistema de recepción de imágenes de satélite MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), con la finalidad de contar con las imágenes en tiempo real, ampliar el número de observaciones y mejorar la detección de incendios forestales. Para la detección de puntos de calor con imágenes MODIS es aplicado el algoritmo correspondiente al producto MOD14 MODIS Fire Products, desarrollado en la Universidad de Maryland.

El programa de puntos de calor ha trabajado en forma continua desde 1999 y con el objetivo de mejorar el acceso a la información, se pensó en dos tipos principales de usuarios, el primero se refiere a aquellas personas involucradas en la prevención y combate de incendios forestales, que requieren información actualizada y oportuna, el segundo, para aquellas personas dedicadas a la investigación que requieren información histórica. Actualmente, el Sistema de alerta temprana contra incendios forestales de la CONABIO, tiene como objetivo: *Contar con un sistema de alerta temprana, monitoreo e impacto de los incendios forestales, mediante información satelital e información geográfica, que contribuya en la prevención y combate de incendios forestales para la conservación de la biodiversidad y la salvaguarda de la vida humana.* El sistema se conforma de tres componentes principales: alerta, monitoreo e impacto, que corresponden a la fases de atención de emergencias: antes, durante y después.

El componente de alerta

Actualmente se compone de un índice de propagación considerando exclusivamente el vigor de la vegetación y una vez que se presente un punto de calor. El índice se calcula al comparar el comportamiento medio del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés) que

considera el verdor, densidad y humedad de la vegetación, de 7 años y el NDVI de los últimos 10 días. Se trata de identificar anomalías negativas en el comportamiento de la última década de días con respecto al comportamiento histórico. La información se obtiene de las imágenes de satélite MODIS, (para mayor detalle ver el artículo “Índice de propagación publicado en el boletín Biodiversitas (no.65 Marzo 2006).

Actualmente se pretende desarrollar un índice de peligro con la implementación de un modelo de humedad de combustible seco. El modelo toma productos de Tropical Rainfall Monitoring Misión (TRMM) y productos MODIS para producir mapas regionales de precipitación, temperatura de la superficie y humedad relativa del aire. El modelo usa la ecuación de los modelos de peligro de incendio del Servicio Forestal de Estados Unidos, para estimar el flujo de la humedad en y fuera de la materia muerta sobre el suelo forestal. Este modelo proporciona una estimación del contenido de humedad del material que se quema. Posteriormente se incluirá un modelo de combustible vivo. Finalmente se incorporará un mapa de frecuencia de puntos de calor basado en el intervalo y periodo de los puntos de calor, utilizando los puntos detectados desde el año 2000.

Componente de monitoreo

Conformado principalmente por la detección de los puntos de calor, trabajo que se ha realizado desde el año 1999 con diferentes tipos de imágenes de satélite. Con las imágenes de satélite AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) es utilizado algoritmo contextual diseñado por Flasse y Ceccato (1996), adecuado para las condiciones de México. En el caso de las imágenes MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) se utiliza el algoritmo MOD14 Modis fire products, desarrollado por la Universidad de Maryland.

El resultado de la aplicación de los algoritmos son las coordenadas geográficas del centro del píxel que fue definido como punto de calor, esta información pasa por el proceso de caracterización del sitio con dos finalidades: localización del sitio (información de coordenadas geográficas, división política) y para priorización al usar información de uso del suelo y vegetación, Áreas Naturales Protegidas (ANP), en este caso de identifica si el punto de calor se ubica dentro de una ANP se indica el nombre, si se ubica dentro de un área de influencia de 5 km, se indica cerca de una ANP, y a partir de 2009 se indica cerca y el nombre de que ANP correspondiente. Adicionalmente a la detección de puntos de calor consistirá en establecer un sistema piloto para recibir la información de la detección de puntos de calor (fuegos) en el campo, en casi-tiempo real, con la posibilidad de un mapeo

móvil con información digital auxiliar (mapas de uso de suelo, modelo digital terreno, vías de comunicación, entre otros).

Componente de impacto

Considera la evaluación de los impactos de los incendios forestales en la vegetación, consiste en la identificación de las áreas quemadas utilizando imágenes de satélite MODIS. Se tienen como antecedente el proyecto de Áreas quemadas de Latinoamérica 2004, el cual se realizó como una actividad del GOFC-Fire RedLatif. Las áreas quemadas se publicarán en mapas mostrando las áreas afectadas y se caracterizará el sitio afectado con cartografía auxiliar. Se espera obtener un indicador de cambios.

Información disponible

La base de datos que conforma el portal contiene la información de los puntos nocturnos y diurnos detectados desde el año 2000, conforme se presenta en la tabla 1.

Tipo de imagen	Año	Periodo de observación	
		Mes inicio	Mes término
AVHRR	2000	Enero	Agosto
AVHRR	2001	Enero	Julio (Diurnas) Agosto (Nocturnas)
AVHRR	2002	Enero	Octubre
AVHRR	2003	Enero	Agosto (Diurnas) Noviembre (Nocturnas)
MODIS	2004	Enero	Diciembre
MODIS	2005	Enero	Diciembre
MODIS	2006	Enero	Diciembre
MODIS	2007	Enero	Diciembre
MODIS	2008	Enero	Diciembre

Tabla 1.1. Información de puntos detectados disponible en la base de datos para el caso de México hasta el año en curso.

Como puntos de calor nocturnos se refiere a los detectados con imágenes de satélite registradas entre las 18:00 (del día anterior) y 5:59 hora local ciudad de México. Los puntos de calor diurnos son aquellos detectados con imágenes de satélite registradas entre las 6:00 y las 17:59 hora local ciudad de México.

El portal está conformado por secciones de información, presentadas en forma de pestañas. Por el momento el nuevo portal está enfocado principalmente a la publicación de los puntos de calor detectados, pestaña **incendios** con diversas funcionalidades que pueden ser agrupadas en 4 áreas principales:

1. Selección de la información

- Por país, (México y Centroamérica).
- Por fecha, en primera instancia el sistema abre la página en el día de la fecha actual y muestra los puntos de calor detectados con las imágenes de satélite de los últimos 30 días del país establecido con anterioridad.
- Por imagen, considerando la hora del paso de la satélite.
- Por un periodo de tiempo determinado.

2. Despliegue de la información

La información seleccionada es desplegada por medio de una tabla. Cada uno de los renglones, que conforman la tabla, corresponden a un par de coordenadas geográficas que conforman los puntos de calor. Las columnas de información que caracterizan a los puntos de calor, se pueden dividir en dos por los objetivos que persiguen:

- Información para localización: coordenadas geográficas, país, estado y municipio.
- Información para priorización: vegetación y uso del suelo, área natural protegida, pendiente, índice de amenaza.

El despliegue de la información realiza una distinción entre la vegetación y los usos del suelo; se presenta en color gris los siguientes usos del suelo: zona urbana, agricultura, pastizal cultivado e inducido. Así mismo cuando el punto de calor se localiza dentro de una ANP (Área Natural Protegida) el registro se presenta en color rojo y cuando el punto se ubica cerca de una ANP el registro se presenta en color anaranjado. En la parte inferior se presenta la estadística de la búsqueda realizada, se muestran los siguientes datos: total de puntos de calor que fueron encontrados bajo las condiciones de selección (Figura 1.31).

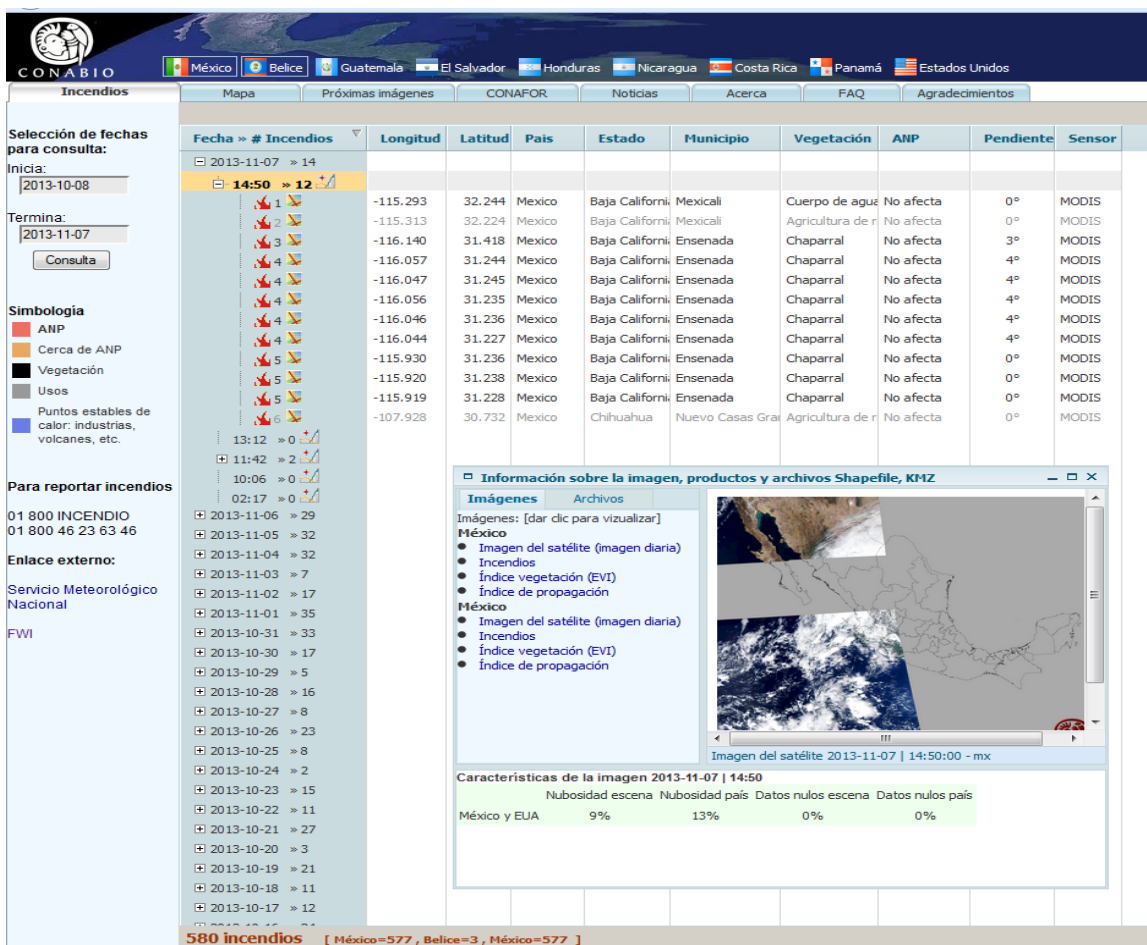


Figura 1. 32 Portal web sede de la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad, que se dedica al monitoreo de incendios forestales de forma operativa. <http://www.conabio.gob.mx/incendios/>

3. Exportación de datos.

El portal tiene cuatro opciones de exportación de los datos seleccionados. Las opciones se clasifican en dos grupos:

- Espacial: La exportación se basa en las coordenadas geográficas de cada punto de calor con el objetivo de convertirlas en elementos espaciales georeferenciados. Los formatos utilizados son KMZ para el despliegue en el sistema Google Earth y Shapefile para su consulta en un sistema de información geográfica.
- Tabular: La exportación se realiza utilizando el contenido de la tabla conformada por cada punto de calor, seleccionados por las condiciones de

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

la búsqueda utilizada. Se presentan dos opciones, ya sea Imprimir directamente o exportar a un archivo de texto con extensión .csv.

4. Información auxiliar.

Se refiere a toda aquella información que es útil y necesaria para la interpretación de la información. Ésta se encuentra unida a cada registro de punto de calor y se refiere a:

- Vista rápida de:
 - ✓ La imagen de satélite utilizada en la detección de puntos de calor. Para conocer el área cubierta por la imagen y las áreas en las cuales no se tendrá la posibilidad de detectar incendios por las presencia de nubes o datos nulos. Se incluye la estadística de la nubosidad y datos nulos.
 - ✓ La distribución de los puntos de calor en México o en Centroamérica.
 - ✓ La distribución de los puntos de calor sobre un índice de vegetación. En este caso se emplea el índice Mejorado de Vegetación (EVI, por sus siglas en inglés). Esta opción es exclusiva para los puntos de calor detectados con imágenes diurnas.
 - ✓ Imagen del índice de propagación.

- Archivos con información espacial (archivos preexistentes, elaborados por cada imagen de satélite):
 - ✓ Shapefile de todos los puntos de calor detectados con la imagen correspondiente. En formato de punto y del polígono correspondiente al píxel de la imagen.
 - ✓ archivo KML para su despliegue en el sistema Google Earth.

Las siguientes secciones (pestañas) se refieren a información complementaria del sistema:

Mapa: Es el acceso a mapas dinámicos, mediante los cuales el usuario puede realizar búsquedas y consultas en forma espacial, relacionando los puntos de calor y cartografía digital de referencia. Los mapas se muestran con diferentes formatos, tanto de vector (polígonos, líneas y puntos) como de raster. Los temas utilizados son: puntos de calor actuales, división estatal y municipal, cabeceras

municipales, carreteras principales, vegetación y uso del suelo, imagen o imágenes correspondiente (del día), mosaico de imágenes Landsat.

CONAFOR: Se presenta el reporte semanal de resultados de incendios forestales elaborado por la Gerencia de Protección Contra Incendios Forestales de la Comisión Nacional Forestal.

Próximas imágenes: Se presenta el horario y área a cubrir de las siguientes 15 de imágenes MODIS por recibir, conforme a la agenda del sistema de recepción de imágenes ubicada en las instalaciones de la Conabio.

Agradecimientos: Contiene citadas a las instituciones que han colaborado en la conformación del sistema de alerta temprana, desde el primer estudio que se realizó en 1998 a la fecha.

FAQ: Preguntas más frecuentes (por sus siglas en inglés), en esta sección pueden encontrarse la respuesta a algunas interrogantes sobre el programa.

Otros sitios de interés

Para los puntos de calor en la región de la frontera con los Estados Unidos consulte la página <http://activefiremaps.fs.fed.us> del Centro de Percepción Remota del Servicio Forestal de los Estados Unidos (USDA-FS) o bien el sistema de información sobre incendios FIRMS <http://maps.geog.umd.edu/firms>

Sitios de interés para Latinoamérica:

Sistema de monitoreo y visualización regional
http://www.servir.net/en/Incendios_HMS_NOAA

Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales de Brasil
<http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas/>

Sistemas de monitoreo y pronóstico de la CONAGUA

En México, la institución encargada de todo lo referente al asunto del agua, es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo encargado de la gestión del agua en México, cuyas funciones consisten en administrar y preservar las aguas nacionales, con la participación de la sociedad, para lograr el uso sustentable del recurso. Para dichos fines de administración y preservación de las aguas nacionales, a partir de 1997 el país se ha dividido en 13 Regiones Hidrológicas Administrativas, las cuales están formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas las unidades básicas de gestión de los recursos hídricos, pero sus límites respetan los de los municipios (figura 1.33) . Los municipios que conforman cada una de esas regiones se indican en el Acuerdo de Circunscripción Territorial de los Organismos de Cuenca publicado en el Diario Oficial de la Federación. Hasta el 2011, se empleaba el publicado el 12 de diciembre de 2007 (CONAGUA, 2011). Para poder facilitar la integración de la información socioeconómica, desempeña sus funciones operativamente a través de Oficinas Centrales, 13 organismos de cuenca, cuyo ámbito de competencia son dicha regiones hídrico administrativas y a su vez 20 direcciones locales, en las entidades federativas en las que no se encuentran las sedes de los organismos de cuenca. Las regiones y sus sedes son:

- I. Península de Baja California (Mexicali, Baja California)
- II. Noroeste (Hermosillo, Sonora)
- III. Pacífico Norte (Culiacán, Sinaloa)
- IV. Balsas (Cuernavaca, Morelos)
- V. Pacífico Sur (Oaxaca, Oaxaca)
- VI. Río Bravo (Monterrey, Nuevo León)
- VII. Cuencas Centrales del Norte (Torreón, Coahuila)
- VIII. Lerma Santiago Pacífico (Guadalajara, Jalisco)
- IX. Golfo Norte (Ciudad Victoria, Tamaulipas)
- X. Golfo Centro (Jalapa, Veracruz).
- XI. Frontera Sur (Tuxtla Gutiérrez, Chiapas)
- XII. Península de Yucatán (Mérida, Yucatán)
- XIII. Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala (México, Distrito Federal).

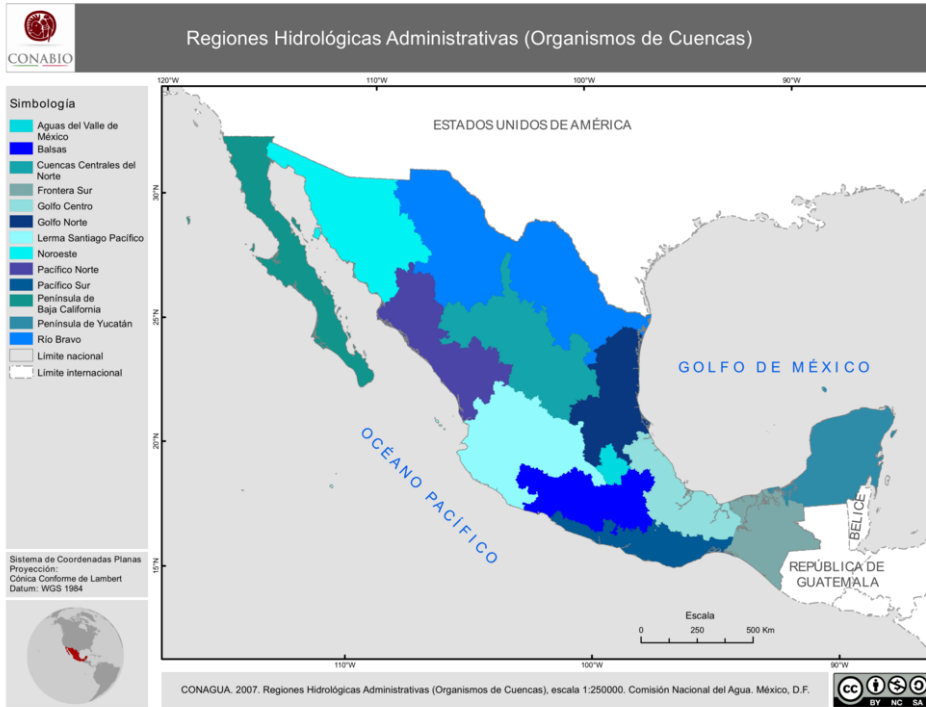


Figura 1. 33 Mapa de las regiones hidrológico-administrativas en los que se ha dividido la República Mexicana, administrada por cada organismo de cuenca.

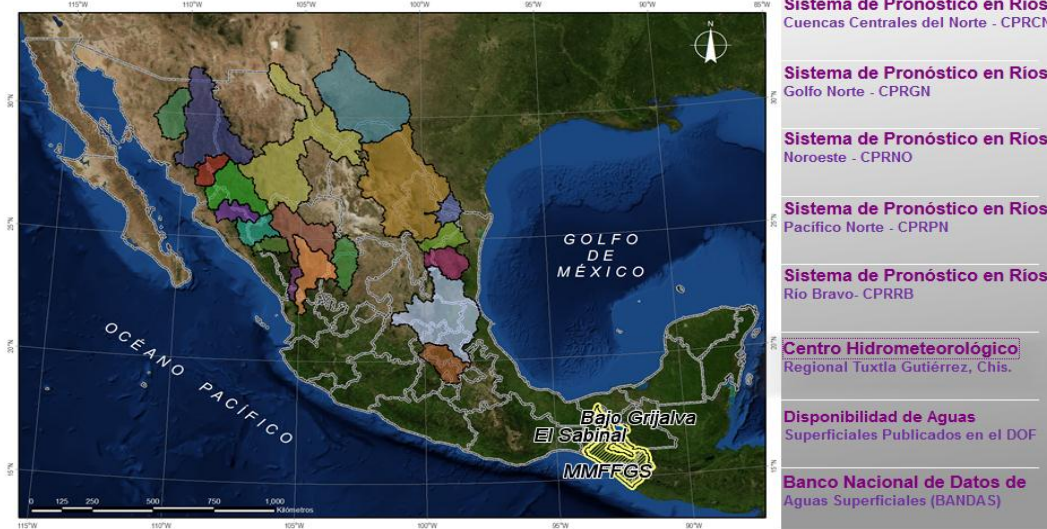
Información disponible

Dentro de la estructura de la CONAGUA, se encuentra la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR), que a su vez forma parte de la Subdirección General Técnica (SGT), que tiene como atribuciones la operación y actualización del Sistema de Pronóstico en Ríos (SPR) (figura 1.34), que es un sistema que registra y transmite las condiciones hidrometeorológicas permanentemente en tiempo real y vía satélite a un centro de pronóstico. Su objetivo principal es obtener pronósticos a corto, mediano y largo plazo de gastos y niveles en sitios definidos (cuencas que cuenten con el SPR), que permitan prever las situaciones que se puedan presentar, al comparar los resultados con las capacidades o niveles máximos, que logran causar problemas y así tomar decisiones pertinentes, todo ello, en función de las características fisiográficas y de humedad de las cuencas, lluvia real y pronosticada, sobre la superficie de captación para prevenir situaciones de emergencia. Entre algunas de las aplicaciones de esos pronósticos están:

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

- Alerta de avenidas súbitas.
- Informes de pronóstico en ríos.
- Abastecimiento de agua.
- Pronóstico de ingresos a presas.
- Mapas de inundación.
- Manejo de recursos hídricos.

Dentro de su portal, existe un apartado correspondiente a aguas nacionales, donde hace una división entre aguas superficiales y subterráneas. Del primer apartado se pueden consultar los reportes con distintos registros correspondientes al almacenamiento de las presas en varias regiones, las cuales contemplan dicha información por semana, aunque cada organismo de cuenca realiza el monitoreo en su propia región y asienta su información, que en muchos casos dichos reportes son diarios (figuras). Para poder acceder a dichos datos y utilizarlos, es necesario solicitarlos formalmente por escrito a GASIR, dando los créditos correspondientes. Se ha realizado una petición formal de colaboración al Ing. Horacio Rubio Gutiérrez, gerente de GASIR, para el otorgamiento de las facilidades para proporcionar no solo datos hidrológicos sino meteorológicos a día.



PRONÓSTICO DE PRECIPITACIÓN MEDIA AREAL PARA LAS SIGUIENTES HORAS

Figura 1. 34 Sistema de pronóstico en ríos de la CONAGUA, que se encarga de medir caudales de ríos, niveles de presas y demás variables afines, a través de los distintos organismos de cuenca, denominados Centros de Pronóstico Regional., <http://www.conagua.gob.mx/spr/>

CAMBIO DE DISPONIBILIDAD EN LA SEMANA

PERIODO DEL: 4 AL 11 DE NOVIEMBRE DE 2013

PRESA	DIA	CAPACIDAD MUERTA Mm³	CAP. ÚTIL DISEÑO Mm³	ELEVACIÓN (msnm)	VARIACIÓN ELEV. (m)	ALMAC. ÚTIL Mm³	VARIACIÓN ALMAC. Mm³	GASTO PROMEDIO (m³/s)	EXTRACCIONES (m³/s)
REGION NOROESTE (NW)									
EL NOVILLO, SON. (PLUTARCO ELÍAS C.)	4	199.48	2675.00	287.63	-0.44	2354.46	-43.77	-72.37	61.74
MOCUZARI, SON.	11			287.19		2310.69			75.57
	4	8.12	994.50	132.36	-0.44	777.15	-25.78	-42.62	7.50
	11			131.92		751.37			76.00
OVIACHIC, SON.	4	55.00	2934.20	101.22	-0.18	2283.46	-25.74	-42.56	69.80
	11			101.04		2257.72			162.40
GUAMÚCHIL, SIN. (EUSTAQUIO BUELNA)	4	0.14	110.39	65.62	-0.14	135.37	-4.34	-7.18	9.70
	11			65.48		131.03			10.10
EL SABINAL, SIN. (GUILLERMO BLAKE A.)	4	29.85	270.15	177.96	-0.09	117.44	-0.95	-1.57	2.00
	11			177.87		116.48			1.50
PUNTA DE AGUA SON. (IGNACIO R. ALATORRE)	4	1.00	26.37	99.30	-0.13	14.06	-0.51	-0.84	0.00
	11			99.17		13.55			0.00
HERMOSILLO, SON. (ABELARDO RODRÍGUEZ)	4	0.00	219.99	215.65	-0.21	1.06	-0.34	-0.56	0.25
	11			215.44		0.72			0.28
EL MOLINITO, SON.	4	0.00	148.00	279.15	-0.07	15.77	-0.31	-0.52	0.00
	11			279.08		15.45			0.00
TIJUANA, B.C.	4	0.00	76.90	85.23	-0.14	0.54	-0.08	-0.13	0.05
	11			85.09		0.46			0.05
SANTA TERESA, SON.	4	2.50	60.50	586.85	-0.02	13.05	-0.06	-0.10	0.00
	11			586.83		12.99			0.00
GUADALUPE, CHIH. (ABRAHAM GONZÁLEZ)	4	0.91	84.53	2047.79	0.00	84.46	0.00	0.00	0.00
	11			2047.79		84.46			0.00
ENSENADA, B.C. (EMILIO LÓPEZ Z.)	4	0.24	2.49	12.72	0.00	0.30	0.00	0.00	1.45
	11			12.72		0.30			0.00
EL BOSQUE, DGO.	4	4.90	0.00	1992.99	0.00	73.74	0.00	0.00	0.00
	11			1992.99		73.74			0.00
EL MAHONÉ, SIN. (MIGUEL HIDALGO)	4	92.98	0.00	119.58	0.00	817.52	0.00	0.00	190.20
	11			119.58		817.52			154.00
SANTA ELENA, DGO.	4	1.09	14.99	1999.81	0.00	14.01	0.00	0.00	0.00
	11			1999.81		14.01			0.00

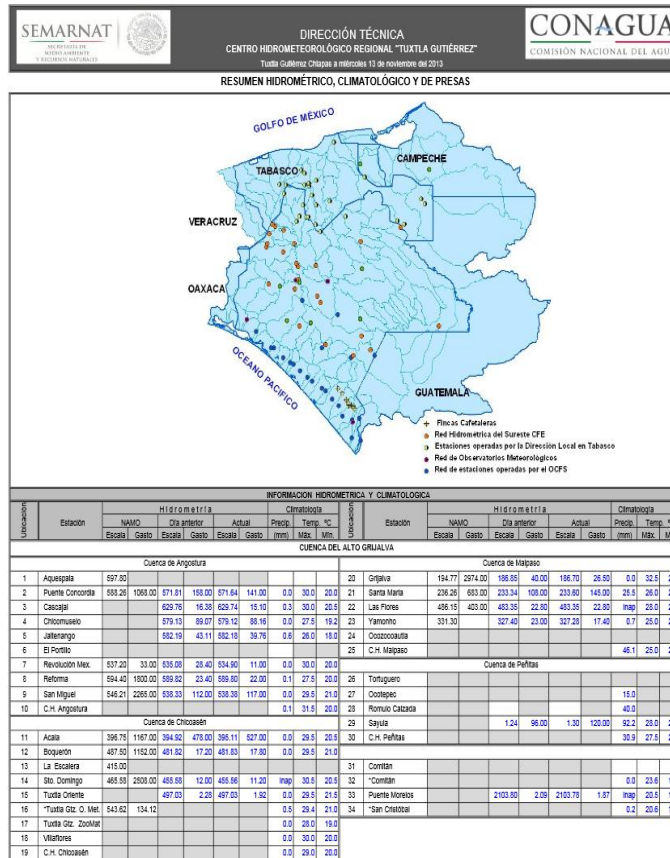


Figura 1. 35 Reportes de presas por organismos de cuenca dependientes de la CONAGUA, disponibles solo al día.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

ORGANISMO DE CUENCA PACIFICO NORTE
DIRECCION TECNICA
AGUAS SUPERFICIALES Y METEOROLOGIA

Variación en el almacenamiento, aportaciones y extracciones de las principales presas

Fecha: 13 de Noviembre de 2013

PRESA	CAPAC. TOTAL Mm3	ELEV. NAME msnm	CAPAC. CONSERV. Mm3	ELEV. NAMO msnm	DIA DE HOY				Diferencia de almacenamiento		Aportación		Extracción	
					Almacenamiento		Elevación	AREA	2012/2013	24 Hrs	Mm3	m3/seg	Mm3	m3/seg
					Mm3	%	msnm	Has	Mm3	Mm3	Mm3	m3/seg	Mm3	m3/seg
SINALOA														
Luis Donaldo Colosio	4568.0	290.00	2908.0	270.00	1724.8	59.3	250.15	4627.9	388.3	-15.0	4.2	48.4	19.2	222.4
Miguel Hidalgo y Costilla	3617.1	148.00	2621.4	140.83	918.0	31.4	119.70	6350.9	22.0	5.0	0.3	3.8	13.3	154.3
Josefa Ortiz de Dominguez	590.1	111.15	513.9	109.70	369.3	71.9	106.58	4100.3	-83.4	4.1	0.1	1.3	0.8	9.0
Gustavo Díaz Ordaz	2822.7	252.50	1859.8	239.01	1191.9	84.1	228.98	4872.4	301.6	-1.9	3.1	36.2	5.1	58.8
Guillermo Blake Aguilar	488.0	196.61	300.6	188.45	146.1	48.8	177.85	1075.0	-29.6	-0.1	0.0	0.3	0.1	1.5
Eustaquio Buelna	265.0	83.85	90.1	84.00	128.6	143.9	65.43	3066.7	49.9	-0.9	0.2	2.2	1.1	12.9
Adolfo López Mateos	4034.5	183.48	3086.6	176.00	1606.8	52.1	161.01	8027.3	721.4	1.6	3.0	34.7	1.4	16.2
Sanalona	970.6	162.17	673.5	156.20	691.9	102.7	156.81	4488.0	211.1	1.3	1.3	15.6	0.0	0.0
Juan Guerrero Alcocer	102.0	178.28	55.0	168.50	18.4	33.4	158.61	242.8	1.8	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
José López Portillo	3666.2	286.95	2580.2	272.16	907.9	35.2	243.72	3932.4	298.9	2.7	2.7	31.6	0.0	0.0
Aurelio Benassini V.	810.0	164.64	415.0	154.54	297.0	71.6	150.15	2337.0	20.3	0.2	0.2	2.8	0.0	0.0
Subsistema Sinaloa	22534.1		15404.1		8004.1	52.0			1870.3	-3.0	15.3	177.1	21.8	252.7
DURANGO														
Santiago Bayacora	133.5	1995.94	130.0	1999.01	131.4	101.0	1959.27	535.0	38.1	-0.3	0.0	0.1	0.0	0.0
Guadalupe Victoria	93.0	1933.11	90.2	1932.53	91.0	100.9	1932.70	466.0	33.4	0.4	0.4	4.4	0.0	0.0
Francisco Villa	101.0	1998.13	78.7	1993.00	78.6	99.9	1992.99	648.0	27.1	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5
Caboraca	90.0	2001.28	45.0	1998.25	44.9	99.9	1998.24	406.0	35.8	-0.1	0.0	0.2	0.0	0.0
Peña del Águila	55.8	1895.27	31.7	1892.50	32.1	101.4	1892.56	820.0	15.3	-0.1	0.0	0.3	0.0	0.0
Subsistema Durango	443.3		375.7		378.1	100.7			148.8	0.0	0.5	5.5	0.0	0.5
Sistema	22977.4		15779.8		8382.2	53.1			2020.0	-3.0	15.8	182.6	21.9	253.2

TRANSPARENCIAS			
	Mm3	m3/seg	
L.D.C. HACIA M.H.C.	19.22	222.4	
M.H.C. HACIA J.O.D.	5.18	60.0	
J.L.P. HACIA D.T.O. D10	0.00	0.0	

Presa	Capac. Total Mm³	Capac. Cons. Mm³	Elevación y Almacenamiento				Llenado %	Dif. de Almac. 24 horas	Dif. a la Curva guta	Ext. Prom. (m³/a) en 24:00 hr	Precipitación diaria en (mm)	Diferencia de nivel en 24 hr (m)	Dif. al NAMO (m)	Dif. al NAME (m)
			Día Anterior		Actual									
			msnm	Mm³	msnm	Mm³								
Angostura	19,736.43	15,549.16	532.81	15,412	532.84	15,454	99.39	41.59	-2.89	195.67	3.2	0.03	-0.16	-6.66
Chicoasen	1,433.09	1,384.86	391.14	1,371	391.49	1,363	98.40	-8.4	392.01	1.3	0.35	-1.01	-3.51	
Malpaso	14,056.10	12,373	177.62	10,854	177.94	11,041	89.24	187.66	-4.06	0.00	40.2	0.32	-4.56	-10.06
Peñitas	1,485	1,091	87.25	401.64	85.95	362.17	91.33	-39.47		1,100.00	16.1	-1.30	-1.45	-9.55

Estación	Hidrometría				Climatología				Dif. de nivel en 24 hr (m)	Diferencia al NAMO (m)				
	NAMO		Día Anterior		Actual		Temperatura °C							
	Escala	Gasto	Escala	Gasto	Escala	Gasto	Precip. (mm)	Máx.			Min.			
CUENCA DEL RÍO GONZÁLEZ														
Peñitas (Hidro)														
* Platanar	34.65	1,104	32.28	150.0	33.76		33.76		132.3	29.0	22.5	0.00		1.48
Samaria	18.50	3,570	14.90	1,185	14.43	1,078.48	15.05	1,311.54	24.6	29.5	21.0	0.62		0.15
Cárdenas									21.0	29.0	20.0			
Nacajuca														
Tulipan														
CUENCA DEL RÍO GRIJALVA														
Oxolotán	47.37	3,770	39.53	2,000										
Puyacatengo	31.35	915	29.65	727	25.66	74.13	25.46	45.82	7.2	29.5	23.5	-0.20		-4.19
Tapijulapa	28.15	3,386	24.63	2,500	18.38	268.13	18.46	279.88	3.2	29.0	20.5	0.08		-6.17
San Joaquín	26.66	575	23.12	221	23.32	200	22.91	114.47	41.0	30.0	24.0	-0.41		-0.21
Teapa	39.56	734	37.71	518	35.43	73.53	35.05	57.70	7.3	29.0	21.0	-0.38		-2.66
Jalapa														
González	10.20	1,191	8.77	739	6.89	415.20	7.26	486.90	15.0	30.0	21.0	0.37		-1.51
Pueblo Nuevo	8.40	1,103	7.49	788	6.61	645.60	6.65	631.30	48.0	30.0	21.0	0.04		-0.84
Gaviotas	7.85	1,626	5.42	810	5.18	575	5.34	591	29.7	29.5	23.0	0.16		-0.08
Muelle	7.23	1,571			5.11		5.26					0.15		
Poveren	6.67	1,317	4.74	1,033	4.40	958.42	4.55	977.11	36.5	31.0	21.5	0.15		-0.19
Villahermosa									35.1	30.0	23.1			
CUENCA DEL RÍO TULIJA														
Salto de Agua	14.57	2,451	10.99	1,500	8.37	815	9.18	896	32.3	29.0	23.0	0.81		-1.81
Macspana	12.78	1,324	9.85	1,000	8.82	372	9.10	400	66.3	30.0	22.5	0.28		-0.75
CUENCA DEL RÍO USUMACINTA														
Boca del Cerro	21.57	8,035	19.21	4,979	18.18	3,906.88	18.39	4,093.13	4.3	29.0	21.0	0.21		-0.82
San Pedro	9.77	649	9.01	260	9.17	306.62	9.18	324.75	2.4	31.0	23.5	0.01		0.17
* Emiliano Zapata (Pueblo Chavín)					9.81		9.76		0.4	29.0	23.0	-0.05		
ESCALAS DE LA CIUDAD														
* La Pigua					4.60		4.82		17.8			0.22		
* La Posta														
Zapoté I														
Zapoté II														

Figura 1. 36 Continuación: reportes de datos hidrométricos.

"Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)"

2. Indicadores de sequía utilizados en México

2.1 Índice Estandarizado de Precipitación.

El índice estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés), es un índice normalizado de la precipitación histórica en alguna estación que permite identificar condiciones de déficit o exceso de precipitación a corto y largo plazo.

El índice es calculado con base en la suposición de que la distribución probabilística de la precipitación es Gamma, de acuerdo Edwards y McKee (1997)².

La función de densidad de probabilidad (FDP) Gamma es dada por la siguiente función:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}$$

donde $\alpha > 0$ es un parámetro de la curva.

$\beta > 0$ es un parámetro de escala.

$X > 0$ es la cantidad de precipitación

$$\gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad \text{es la función Gamma}$$

El cálculo del SPI implica ajustar una función de densidad de probabilidad gamma, a una distribución de frecuencia dada de los totales de precipitación para una estación. Los parámetros alfa y beta de la función de densidad de probabilidad gamma se estiman para cada estación, para cada escala de tiempo de interés (3 meses, 12 meses, 48 meses, etc), y para cada mes del año. Thom (1966)³, encontró o propone que las soluciones de máxima verosimilitud que se utilizan para estimar de manera óptima α y β son:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right)$$

2 Edwards C. D and T. B McKee (1997). Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. Atmospheric Science paper No.634. Climatology Report No. 97-2. 155pp.

³ Thom, H. C. S., 1966: Some Methods of Climatological Analysis. WMO Technical Note Number 81, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 53 pp.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}$$

Donde
$$A = \ln \bar{x} - \frac{\sum \ln x}{n}$$

n es el número de observaciones registradas.

Los parámetros resultantes se utilizan para encontrar la probabilidad acumulada de un evento de precipitación observada para el mes dado y la escala de tiempo para la estación en cuestión. La probabilidad acumulada es dada por:

$$G(x) = \int_0^x g(x)dx = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx$$

Sustituyendo $t = x / \hat{\beta}$

$$G(x) = \frac{1}{\gamma(\hat{\alpha})} \int_0^t t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt$$

Dado que la series de tiempo de precipitación puede contener ceros y la función Gamma no está definida para $X=0$, la distribución acumulativa puede ser:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x),$$

donde q es la probabilidad de obtener un valor cero.

Siendo m el número de ceros de una serie de datos de precipitación, q puede ser $q = m/n$

La función acumulativa de $H(x)$, es entonces transformada a la variable estandarizada normal Z con media cero y varianza uno, la cual es el valor de SPI.

Abramowitz and Stegun (1965)⁴ presentan una aproximación computacional para obtener los valores más fácilmente calculados, para todas las escalas de tiempo de las ecuaciones son las siguientes:

$$SPI = Z = - \left(T - \frac{c_0 + c_1 T + c_2 T^2}{1 + d_1 T + d_2 T^2 + d_3 T^3} \right) \text{ para } 0.0 < H(x) \leq 0.5$$

$$SPI = Z = + \left(T - \frac{c_0 + c_1 T + c_2 T^2}{1 + d_1 T + d_2 T^2 + d_3 T^3} \right) \text{ para } 0.5 < H(x) < 1.0$$

donde

$$T = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \quad \text{para } 0.0 < H(x) \leq 0.5,$$

$$T = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \quad \text{para } 0.5 < H(x) < 1.0,$$

cuyos coeficientes son:

$$c_0 = 2.515517$$

$$c_1 = 0.802853$$

$$c_2 = 0.010328$$

$$d_1 = 1.432788$$

$$d_2 = 0.189269$$

$$d_3 = 0.001308$$

Conceptualmente, el SPI representa un número de desviaciones estándar por encima o por debajo de una distribución generada a partir de la media, los valores

⁴ Abramowitz, M., and I. A. Stegun (eds), (1965) Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. Dover Publications, Inc., New York, New York, 1046pp.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

son representativos de la variabilidad de precipitación histórica, de acuerdo a la siguiente clasificación definida por McKee et. al., 1995⁵.

Tabla 2.1. Valores de indicador del grado de sequía del SPI.

+2.0 y valores mayores	Extremadamente Húmedo
+1.50 a +1.99	Muy Húmedo
+1.0 a +1.49	Moderadamente Húmedo
-0.99 a +0.99	Cercano a lo normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente Seco
-1.50 a -1.99	Muy seco
-2.0 y valores menores	Extremadamente seco

Para analizar los patrones espaciales de 1, 3, 6, 9 y 12 meses, para períodos largos o cortos se clasifica como:

1 mes. Indica las condiciones de humedad del suelo.

3 meses. Una estimación de la precipitación estacional.

6, 9 y 12 meses. Los impactos en los niveles de reserva de agua.

Existen mapas de evaluación como ejemplo los elaborados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), con los datos que disponen de 327 estaciones climatológicas que reportan de manera diaria para realizar su cálculo, cada mes y monitorear alrededor del país (figura 2.1)⁶.

⁵ McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, (1995) Drought monitoring with multiple time scales. *Preprints, 9th Conference on Applied Climatology*, 15-20 January, Dallas, Texas, American Meteorological Society: 233-236.

⁶ http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=257&Itemid=10 Revisado en Septiembre 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

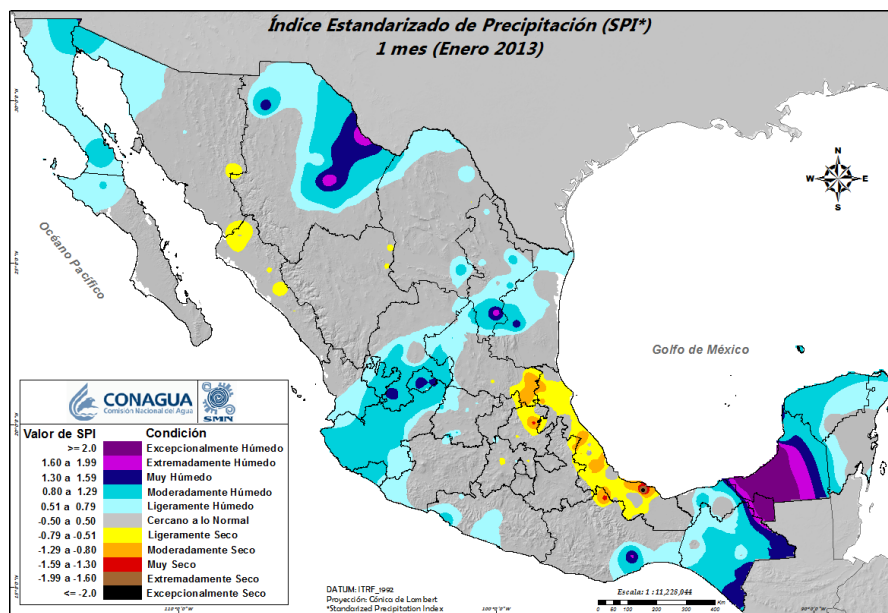


Figura 2. 1 Mapa del Índice SPI correspondiente de enero del 2013 (Tomado de página del SMN)8.

Para facilitar el cálculo del índice SPI se encuentra de manera gratuita en archivo ejecutable con sus respectivos manuales y ejemplos para realizar cálculos cada mes, 3 meses, 6 meses, 12 meses y 24 meses.⁷

2.2 Índice de sequía severa de Palmer

El índice de sequía severa de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) fue presentado por Palmer (1965)⁸ para la evaluación de la sequía meteorológica. PDSI se conoce como un índice de sequía meteorológica, sin embargo, el procedimiento considera la precipitación, la evapotranspiración, y las condiciones de humedad del suelo, que son determinantes de la sequía hidrológica, es decir, el período durante el cual el suministro de agua real es menor que el suministro de agua mínima necesaria para operaciones normales en una región en particular. Cancelliere *et al.*, 2007⁹ resumen los conceptos y los pasos básicos para calcular el PDSI entre otros índices.

⁷ <http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx> Revisado en Septiembre, 2013.

⁸ Palmer, W. C., (1965) Meteorological drought. Office of Climatology Research Paper 45, Weather Bureau, Washington, D.C., 58 pp.

⁹ Cancelliere, A., Loukas A., Pangalou D., Rossi G., Tigkas D., Tsakiris G., Van gelis H. (2007) Drought characterization [Part 1. Components of drought planning. 1.3. Methodological component]. In: Iglesias A. (ed.), Moneo M. (ed.), López - Francos A. (ed.). *Drought management* "Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)"

Paso 1: Balance Hidrológico

El cálculo de la PDSI comienza con un balance hídrico climático mediante largas series de precipitación mensual y los registros de temperatura como entradas. El suelo se divide en dos capas, donde la capa superior, llamada la superficie del suelo, contiene 25 mm de la humedad disponible en la capacidad de campo. Esta es la capa en la que cae la lluvia, y de la cual tiene lugar la evaporación. La pérdida por evaporación de la capa superficial, LS , se supone que tendrá lugar en la tasa de crecimiento potencial que se calcula por el método de Thornthwaite (1948)¹⁰. La humedad no puede ser retirada o recargada a la capa subyacente hasta que la capa superficial se ha agotado o saturado. La pérdida de la capa subyacente (Lu), depende del contenido de humedad inicial en la capa Su , la recarga obtenida de la capa superficial (Ls) y la capacidad de agua disponible (AWC) del sistema suelo.

Si $PE > P$, entonces:

$$Ls = \min(Ss, PE - P)$$

$$Lu = \left[(PE - P) - Ls \right] \frac{Su}{AWC} \quad \text{para } Lu < Su,$$

Donde Ss y Su son las cantidades de humedad disponible almacenados a principios de mes en la superficie y la capa subyacente, respectivamente. Se espera que se produzca escurrimiento, si y sólo si, las dos capas están saturadas de humedad, AWC .

Además de PE , se utilizan tres términos más potenciales y que se definen como sigue:

Recarga Potencial (PR) que es la cantidad de humedad necesaria para que el suelo obtenga su máxima capacidad de retención de agua posible dado por:

$$Pr = AWC - (Ss - Su)$$

Pérdida potencial (PL) que es la cantidad de humedad que podría perderse del suelo por evapotranspiración durante un período de seco ($P=0$) dada por:

$$PL = PLs + PLu$$

guidelines technical annex. Zaragoza: CIHEAM / EC MED A Water, 2007 . p. 85-102 (Option s Méditerranéennes: Série B. Etudes et Recherches; n . 58)

¹⁰ Thornthwaite, C. W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, **38**, 55–94.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

donde $PLs = \min(PE, Ss)$

$$PLu = (PE - PLs) \frac{Su}{AWC}, \text{ si } PLu < Su,$$

El escurrimiento potencial (PRO) que es la diferencia entre el potencial de precipitación y la recarga potencial. Precipitación potencial es igual a AWC, por lo tanto, PRO, está dada por:

$$PRO = AWC - PR = Ss + Su$$

Paso 2: Coeficientes climáticos

La calibración del modelo de balance de agua a los niveles normales se realiza mediante la simulación del balance hídrico durante el período de los registros históricos disponibles de temperatura y precipitación y así derivar la capacidad de humedad de la capa de suelo bajo y cuatro coeficientes para el área de estudio. Los cuatro coeficientes mensuales siguientes se calculan utilizando los cuatro términos potenciales, PE, PR, PRO y PL:

$$\alpha_j = \frac{ET_j}{PE_j}$$

$$\beta_j = \frac{R_j}{PR_j}$$

$$\gamma_j = \frac{RO_j}{PRO_j}$$

$$\delta_j = \frac{L_j}{PL_j}$$

Donde ET es la evapotranspiración
R es la recarga de agua del suelo
RO es la segunda vuelta
L es la pérdida total de agua del suelo

Son valores medios de los registros históricos de cada mes j.

Paso 3: Valores CAFEC

Los coeficientes derivados se utilizan para analizar las series de tiempo, con el fin de determinar la cantidad de humedad requerida para el tiempo "normal" durante meses individuales. En particular, los valores climáticos propios para las condiciones existentes (CAFEC, por sus siglas en inglés) se calculan y se indica por ejemplo:

$$ET_j = \alpha_j \cdot PE_j,$$

Donde PE_j es la evapotranspiración potencial para el mes en curso j . Por lo tanto, el valor de precipitación CAFEC, P , está calculando como:

$$\hat{P}_j = \alpha_j \cdot PE_j + \beta_j \cdot PR_j + \gamma_j \cdot PRO_j - \delta_j \cdot PL$$

Paso 4: Índice de anomalía de humedad

Para cada mes j , la diferencia entre la precipitación real y la precipitación CAFEC es un indicador de la deficiencia de agua o excedente para ese mes en la estación o área bajo estudio.

Esto se expresa como $d = P - \hat{P}$. Estas salidas (d) se convierten en anomalías de humedad, conocido como el índice Z de Palmer, de acuerdo a:

$$Z = K_j \cdot d$$

donde K_j es un factor de peso para el mes j , que tiene en cuenta la variabilidad espacial de las salidas d , de tal manera que son independientes del tiempo y el espacio.

$$K_j = \frac{17.67 \cdot \hat{K}_j}{\sum_{i=1}^{12} (\hat{K}_i \cdot \bar{D}_i)} \text{ para } j=1, \dots, 12$$

Donde \bar{D}_i es el promedio del valor absoluto de d para el mes i

$$\hat{K}_j = 1.5 \text{Log}_{10} \left(\frac{T_j + 2.8}{\bar{D}_j} \right) + 0.50,$$

$$T_j = \left(\frac{ET_j + R_j + RO_j}{P_j + L_j} \right)$$

El parámetro T_j es una medida de la relación de la demanda de humedad al suministro de humedad para el mes y la región. El propósito de los factores de ponderación es para ajustar las salidas de “d” precipitación normal de manera que sean comparables entre diferentes áreas y por mes diferente.

Paso 5: Grado de Sequía

En este último paso se analiza la serie de tiempo del índice Z para desarrollar criterios para el inicio y fin de los periodos de sequía y una fórmula para determinar la gravedad de la sequía. La metodología de Palmer implica el cálculo, para cada mes, con tres índices intermedios X_1 , X_2 , y X_3 y un factor de probabilidad. Palmer expresó el comienzo y la terminación de la sequía (o período húmedo) en términos de la probabilidad de que el evento de sequía o húmedo se haya iniciado o terminado. Una sequía o evento húmedo es definitivamente cuando, esta probabilidad alcanza o supera el 100%, pero la sequía o evento húmedo se considera que ha terminado el primer mes en el que la probabilidad llegó a ser mayor que 0% y se mantiene por encima de 0% hasta alcanzar 100%. Durante el período de la "incertidumbre", cuando una sequía existente (o período húmedo) puede o no haber terminado (es decir, cuando la probabilidad es de entre 0% y 100%), el modelo calcula los tres índices intermedios X_1 , X_2 y X_3 .

X_1 es el valor del índice para un periodo húmedo (siempre es positivo), X_2 es el valor del índice para un periodo de sequía (siempre es negativo) y X_3 es el valor del índice para un evento de sequía establecido o periodo húmedo. Todos los tres índices intermedios se calculan utilizando la siguiente expresión empírica:

$$PDSI_i = 0.897 \cdot PDSI_{i-1} + \frac{Z_i}{3}$$

Donde Z_i representa el valor del índice de anomalía de humedad o Z-índice para el mes i .

El modelo de Palmer selecciona el valor de uno de los índices intermedios y asignados a PDSI en función del valor del factor de probabilidad. Por ejemplo, si el factor de probabilidad toma un valor entre 0 y 1, a continuación, PDSI toma el valor de X_1 , si el factor de probabilidad toma un valor entre 0 y -1, a continuación, PDSI toma el valor de X_2 y cuando el factor de probabilidad toma valores mayor

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

que 1 o menor que -1 entonces PDSI toma el valor de X_3 . El término X_3 responde mucho más lento que PDSI a los cambios de humedad del suelo y es un índice para el largo plazo las condiciones de humedad hidrológicas conocidos como Palmer índice de sequía hidrológica (PHDI). La clasificación de tiempo basado en PDSI, PHDI y Z-Index (Palmer, 1965)¹¹ se muestra en la Tabla 2.2. Cabe señalar que el Índice Z proporciona una indicación *de la persistencia del fenómeno de la sequía*, mientras que PDSI denota *la gravedad de la sequía*.

Tabla 2.2. Clasificación del grado de sequía por medio al PDSI, PDHI e índice Z.

+4.0 y valores mayores	Extremadamente Húmedo
+3.00 a +3.99	Muy Húmedo
+2.00 a +2.99	Moderadamente Húmedo
+1.00 a +1.99	Ligeramente Húmedo
+0.50 a +0.99	Inapreciablemente Húmedo
+0.49 a -0.49	Cercano a lo Normal
-0.50 a -0.99	Inapreciablemente Seco
-1.00 a -1.99	Sequía Ligera
-2.00 a -2.99	Sequía Moderada
-3.00 a -3.99	Sequía Intensa
-4.0 y valores menores	Sequía Extrema

Así, el índice PDSI tiene un rango de valores cercano al doble del índice SPI, el que independientemente de los valores podría llegar a ser comparable.

El método de Palmer utilizado para el cálculo de la PDSI, PHDI e índice Z tiene una serie de limitaciones y deficiencias (Alley, 1984)¹². Las limitaciones del método se pueden clasificar en dos categorías: las deficiencias del modelo de balance hídrico y las características PDSI. La primera categoría de limitaciones del método Palmer incluye:

¹¹ Palmer, W. C. (1965). *Op. cit.*

¹² Alley, W. M., (1984) The Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions. *Journal climate applied meteorology*, **23**, 1100–1109.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

- (i) El uso del método de Thornthwaite para la estimación de la evapotranspiración potencial aunque otros métodos podría ser empleados. Sin embargo, con los limitados datos disponibles exigidos por el método de Palmer, sólo una metodología simple para la estimación de la evapotranspiración potencial, tal como el método de Thornthwaite, se puede utilizar.
- (ii) La cantidad arbitraria de 25 mm de la capacidad de humedad de la capa superficial del suelo. La capacidad de la humedad del suelo podría ser ampliamente modificado en función de la temperatura, la textura del suelo y la cobertura vegetal de la zona.
- (iii) La suposición de que el escurrimiento se estima sin ningún tipo de retraso en la distribución del tiempo. Thornthwaite y Mather (1955)¹³ sugieren que el 50% -75% de la escorrentía debe retrasarse cada mes con el fin de reproducir los volúmenes de los flujos mensuales observados en los arroyos. La fracción del escurrimiento retrasado varía considerablemente dependiendo de la profundidad y la textura del suelo, la fisiografía, el tamaño de la cuenca y el sistema de aguas subterráneas.
- (iv) El umbral del modelo de Palmer supone que el escurrimiento no se produce hasta que la capacidad de humedad de la parte superior y la capa inferior del suelo está lleno. Este supuesto tiende a subestimar la recarga durante el verano y los primeros meses de otoño.

Las limitaciones de las características PDSI se pueden resumir como:

- (v) La definición arbitraria de la clasificación de PDSI. Esta clasificación se han definido a partir de datos del centro de Iowa y Kansas.
- (vi) La sensibilidad de los valores PDSI a factores K_i . Sin embargo, la duración total de las sequías de diversas magnitudes es relativamente insensible a las variaciones K_j .
- (vii) La sensibilidad de PDSI valora al clima del periodo de calibración.

¹³ Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R. (1955). *The water balance*. Publication in Climatology. Laboratory of Climatology. Dresel Inst. Technol., 8(8), pp. 1-104.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

A pesar de varios supuestos utilizados en los cálculos del balance hídrico, otras limitaciones y deficiencias, así como la naturaleza empírica de algunos de los coeficientes estandarizados, el PDSI puede ser una herramienta útil para la investigación y evaluación de la sequía operacional, si se utiliza adecuadamente y reconocieron sus limitaciones antes mencionadas (Karl et al, 1987)¹⁴. También debe mencionarse que el método de Palmer aporta al difícil problema de la detección de la sequía utilizando sólo los datos mensuales de precipitación y temperatura.

Existen rutinas como la Wells *et al.*, (2004)¹⁵, que calculan el índice de Palmer y el índice Selft Calibrate PDSI (sc-PDSI) que es una modificación propuesta este programa se descarga para el código libre o para Windows en el archivo se incluyen ejemplos y se encuentran los manuales.

2.3 Anomalías de Precipitación

Porcentaje normal es un método simple para la comparación de precipitación observada con la precipitación normal para un lugar determinado y el período de tiempo. La precipitación observada es dividida por la precipitación normal (o media) (por lo general sobre la base de 30 años de datos) y el resultado se expresa como un porcentaje. Se puede calcular para cualquier escala de tiempo de interés (por ejemplo, día, semana, mes, temporada, año).

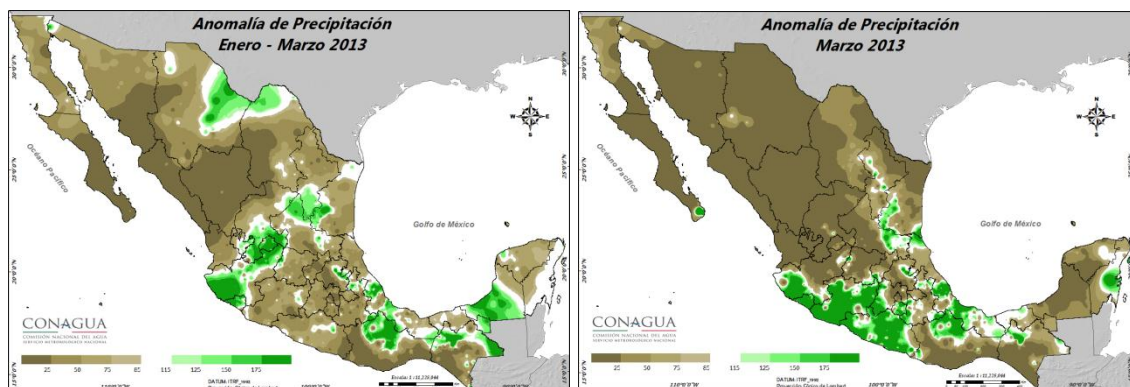


Figura 2. 2 Anomalía de precipitación para dos periodos de tiempo. Izquierda para el para el mes de Marzo del 2013. Derecha en promedio para los meses de enero a marzo del 2013. (Tomado del SMN)

¹⁴ Wells, N., S. Goddard and M. J. Hayes (2004). Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index. *American Meteorological Society*. Vol 17: 2335:2351.

¹⁵ <http://greenleaf.unl.edu/> Revisado en Septiembre, 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

2.4 Índice de Diferencia Normalizada de la Vegetación.

El índice de diferencia normalizada de la vegetación (**NDVI**, por sus siglas en Ingles), es de los primeros índices generados para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, con base a la medición de sensores remotos instalados que miden la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja.

Las plantas absorben radiación solar en la región espectral de radiación fotosintética activa (de 0.4 a 0.7 micrómetros), la cual es usada como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis. La estructura celular de las hojas, por otra lado, refleja fuertemente la luz del infrarrojo cercano (0,7 a 1,1 micras). Por lo tanto, la vegetación aparece relativamente oscura en la región de radiación fotosintética activa y relativamente brillante en el infrarrojo cercano, contrariamente, es el caso de las nubes y la nieve tienden a ser bastante brillantes en el rojo así como también en otras longitudes de onda visibles, y bastante oscura en el infrarrojo cercano. Así cuantas más hojas tiene una planta, más son las longitudes de onda de luz que se ven afectados, respectivamente (Verdín, *et. al.*, 2003)¹⁶.

Desde principios de los instrumentos de observación de la Tierra, como el Satélite de Tecnología de Recursos Terrestres (por sus siglas en inglés, ERTS) de la NASA y el Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR) de la NOAA, adquieren datos en visible e infrarrojo cercano. Así el NDVI se calcula a partir de estas mediciones individuales de la siguiente manera:

$$NDVI = \frac{IR_{cercano}(0.7 - 1.1\mu m) - Visible(0.4 - 0.7\mu m)}{IR_{cercano}(0.7 - 1.1\mu m) + Visible(0.4 - 0.7\mu m)}$$

Donde *Visible* y *IRcercano* representan las mediciones de refracción espectrales adquiridas en las bandas del visible (principalmente el rojo) y del infrarrojo cercano, estas refracciones espectrales son en sí mismas, proporciones de la radiación que se refleja sobre la radiación entrante en cada banda espectral de forma individual. Por lo tanto, toman valores entre 0,0 y 1,0. El NDVI varía entre -1,0 y 1,0. El uso del NDVI para evaluaciones cuantitativas (en lugar de las revisiones cualitativas) plantea que el NDVI ha tendido a ser utilizado en exceso en aplicaciones para las que no fue diseñado y limitar seriamente la utilidad real

¹⁶ Verdín, J., D. Pedreros y G. Eilerts (2003). Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI)", *FEWS - Red de Alerta Temprana Contra la Inseguridad Alimentaria, Centroamérica*, USGS/EROS Data Center.

"Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)"

de este índice si no se trata adecuadamente. Además el cálculo del valor NDVI resulta ser sensible a un número de factores perturbadores como son:¹⁷

Efectos atmosféricos: referente a la composición atmosférica en el momento de la observación.

La nubosidad: dado por su diferencia en la densidad dependiendo del tipo de nube.

Efectos del suelo: debido a diferencias por cambios en la humedad del suelo.

Efectos anisotrópicos: debido a las superficies que depende de cada objeto de acuerdo a su geometría de iluminación y observación en el momento de las mediciones.

Efectos espectrales: dado que cada sensor tiene sus propias características, en particular, con respecto a la posición, anchura y forma de las bandas espectrales.

A continuación se presenta la figura 2.3, que representa el NDVI para la semana 39 del 2013, en el cual se muestran los valores donde podría estar activamente vegetación representado en los tonos verdes y aquellos lugares donde hay vegetación decadencia en las regiones de amarillas a rojas.

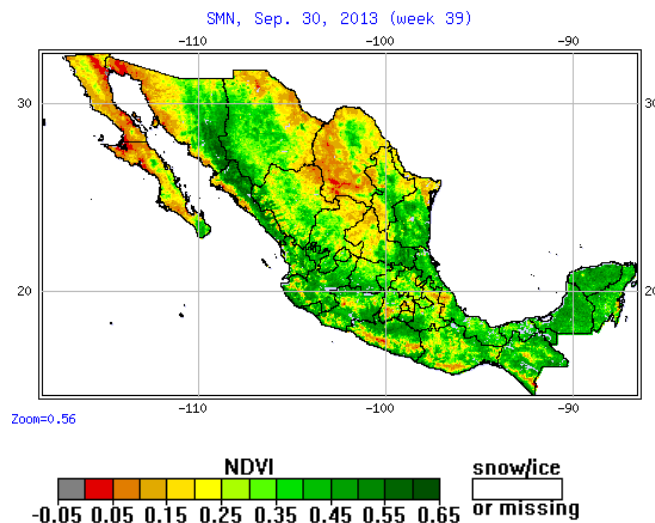


Figura 2. 3 Índice de diferencia normalizada de la vegetación para México en la semana 39 del 2013.

(Tomado de <http://www.star.nesdis.noaa.gov>)

¹⁷ <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/> Revisado en Octubre, 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

2.5 Índice de Salud de la Vegetación

El índice de Salud de la vegetación (por sus siglas en inglés, VHI), es también un producto derivado de la radiación observada por el Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (por sus siglas en inglés, AVHRR) a bordo de los satélites de órbita polar NOAA-7, 9, 11, 14, 16 y 18. Es un producto del Centro para Aplicaciones de Satélite e Investigación de NOAA / NESDIS¹⁸. Los productos generados se pueden utilizar como datos indirectos para la vigilancia de la salud vegetal.

El índice VHI se genera a partir de la temperatura de brillo (*TCI*) que detecta el AVHRR entre las longitudes de onda de 10.3 a 11.3 μm y de las condiciones de humedad de la cubierta vegetal (*VCI*). El VCI se relaciona como la anomalía del NDVI a partir de la climatología de 25 años en bases a leyes biofísicas, cabe mencionar que este valor de NDVI es depurado y suavizado eliminando la mayoría de los procesos aleatorios (ruido).

$$VHI = \alpha \cdot VCI + (1 - \alpha) \cdot TCI$$

donde α es un coeficiente de determinación de la contribución de los dos índices (VCI, TCI). De forma que el índice VHI es una caracterización de salud de la vegetación con una estimación combinada de la humedad y las condiciones térmicas.

Los productos generados son imágenes con resolución de 4 a 16 kilómetros espacialmente y 7 días de resolución temporal compuesta.

Si el índice tiene valores menores a 40 indica diferentes niveles de estrés a la vegetación, la posible pérdida de cultivos y producción de pastos se podría esperar. Cuando el índice indica valores mayores a 60 (condición favorable) se puede esperar una producción plena.

La figura 2.4 muestra la comparación anual del índice VHI para la semana número 39 de los años 2013 y 2012, en la comparación se observa como el año 2013 los estados de Baja California, Baja California Sur, la porción norte de los estado de Chihuahua, Nuevo León y Tamaulipas y la región centro y norte del estado de Coahuila muestran algún tipo de estrés en la cobertura vegetal de acuerdo al índice. Para las regiones anteriores pero en el año 2012 se puede apreciar que la afectación era mayor.

¹⁸ <http://www.star.nesdis.noaa.gov> Revisado en Octubre, 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

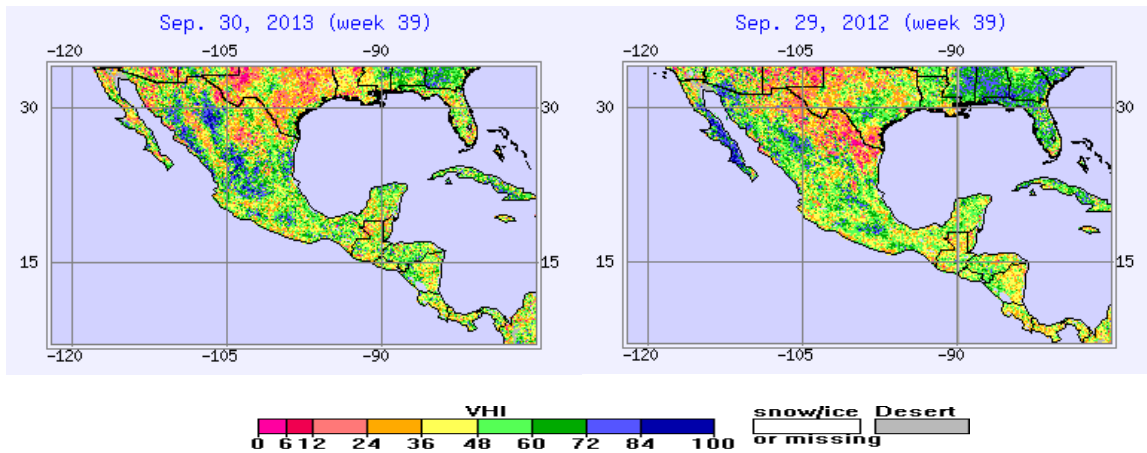


Figura 2. 4 Mapa del índice VHI. Izquierda para el 30 de septiembre del 2013 y derecha para el 29 de septiembre del 2012 (Tomado de <http://www.star.nesdis.noaa.gov>).

2.6 Anomalía de Temperatura

Anomalía de Temperatura es un método similar al de precipitación pero para temperatura, donde se realiza la comparación de temperatura media registrada en el mes a la que se sustrae la temperatura media del mes (por lo general sobre la base de 30 años de datos) para un lugar determinado. Se puede calcular para cualquier escala de tiempo de interés (por ejemplo, día, semana, mes, temporada, año). En este cabe resaltar que se puede realizar el cálculo para puntualizar aquellas zonas que tengan varios días con altas temperaturas (por ejemplo $>40^{\circ}\text{C}$) como es mostrado en la figura 2.5. De esta forma se obtiene en que zonas se podría esperar una disminución considerable de la humedad en el suelo.

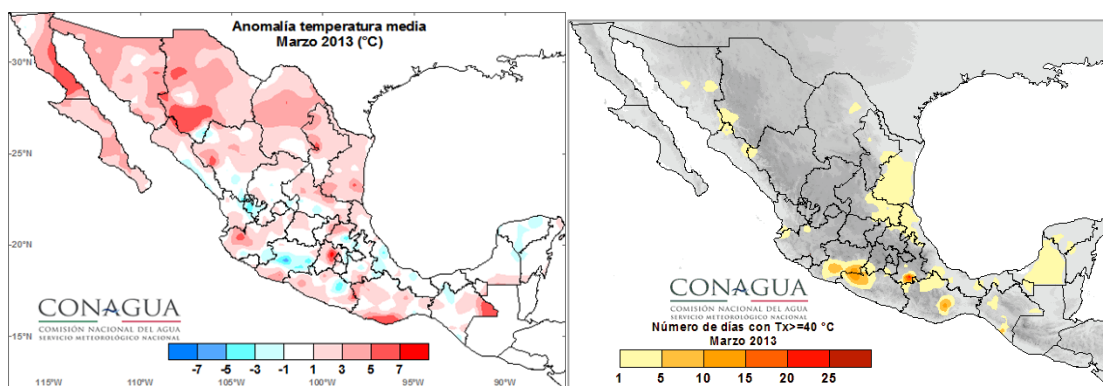


Figura 2. 5 Izquierda muestra la anomalía de temperatura para marzo del 2013 y derecha número de días con temperaturas mayores a 40°C para el mes de marzo del 2013 (Tomado <http://www.cna.gob.mx>).

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

2.7 Porcentaje de disponibilidad de agua en presas

Una de las medidas para estimarla sequía hidrológica en México es el registro de la disponibilidad de agua en las presas de México, este producto es generado por la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR), en el que se registra en almacenamiento de las principales presas del país de manera continua, en porcentaje. En esta se detalla de acuerdo a una escala medida de acuerdo al déficit de agua como: Escala mínima 80%, moderada 65%, severa 40% y crítica 25%. Ejemplo de esta se encuentra en la figura 2.6.

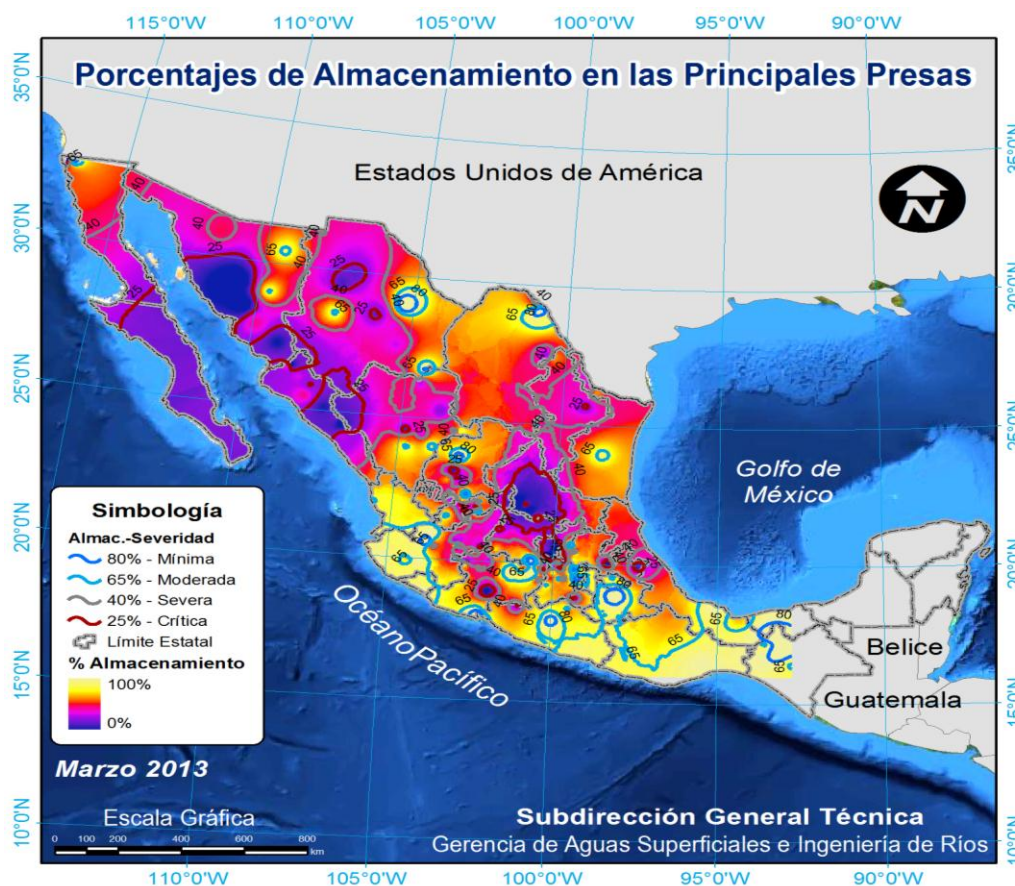


Figura 2.6 Porcentaje de almacenamiento de las principales presas en México para el mes de marzo del 2013. (Tomado de <http://www.cna.gob.mx>)

2.8 Modelo de Humedad del Suelo Leaky Bucket.

El modelo Leaky Bucket (agujero de cubeta) es un modelo que toma el nombre por su método para calcular la estimación de la humedad del suelo. El modelo la

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

estima mediante un modelo hidrológico de una sola capa (Huang *et al.*, 1996)¹⁹, el modelo viene dado por la siguiente relación:

Suponiendo para un área determinada (A)

$$\frac{dW(t)}{dt} = P(t) - E(t) - R(t) - G(t),$$

donde $W(t)$ es el contenido de agua en el suelo.
 $P(t)$ precipitación promedio en el área A, mm/mes
 $E(t)$ evapotranspiración promedio en el área A, mm/mes
 $R(t)$ escurrimiento promedio en A, mm/mes
 $G(t)$ pérdida por infiltración a aguas subterráneas en A, mm/mes

El escurrimiento se calcula en dos componentes que son el escurrimiento superficial $S(t)$ y el escurrimiento al subsuelo $B(t)$ por las siguientes relaciones:

$$R(t) = S(t) + B(t)$$

$$S(t) = P(t) \left[\frac{W(t)}{W_{MAX}} \right]^m$$

$$B(t) = \frac{\alpha}{1 + \mu} W(t),$$

donde W_{MAX} es la máxima capacidad del suelo de contener humedad.

m es un parámetro con valores mayores a 1.

α es el inverso del tiempo de respuesta del tiempo del flujo base.

μ es un parámetro adimensional que determina la porción del flujo del subsuelo que se convierte en el flujo base en el canal de drenaje hacia fuera de la zona de interés.

La porción restante se pierde en forma de flujo de agua subterránea no observada, que se da a continuación:

¹⁹ Huang, J., H. M. van den Dool, and K. G. Georgakakos, (1996) Analysis of model calculated soil moisture over the US (1931 – 1993) and applications to long range temperature forecasts, Journal of Climate., Vol 9, 1350 –1362.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

$$G(t) = \frac{\mu \cdot \alpha}{1 + \mu} W(t)$$

La evapotranspiración $E(t)$ es estimada en este modelo como:

$$E(t) = Ep \frac{W(t)}{W_{MAX}}$$

Donde Ep es la evapotranspiración potencial en mm/mes.

Para calcular la evapotranspiración potencial se emplea el método de Thornthwaite (1948)²⁰, que es expresado por las ecuaciones siguientes:

$$Ep = \begin{cases} 0, & \text{cuando } T < 0^\circ\text{C} \\ 16L \left(\frac{10T}{I}\right)^a, & \text{cuando } 0 \leq T < 26.5, \\ -415 + 32.25T - 0.43T^2, & \text{cuando } T \geq 26.5^\circ\text{C} \end{cases}$$

con

$$L = \frac{d}{30} \frac{h}{12}$$

$$I = \sum_{M=1}^{12} \left(\frac{T_M}{5}\right)^{1.514}$$

$$a = (6.75 \times 10^{-7} I^3) - (7.71 \times 10^{-5} I^2) + (1.79 \times 10^{-2} I) + 0.49,$$

Donde d es el número de días del mes.

h es el número de horas de luz durante el día en el mes.

T es la temperatura del aire promedio mensual.

Para calcular los parámetros se tienen que tener grandes registros históricos de un conjunto de estaciones para los que se pueda calcular cada uno de los parámetros anteriormente mencionados y se evalué estadísticamente su bondad de ajuste y el mínimo error, para así aplicarlos de manera uniforme sobre alguna región dada. De forma que al igual que el índice de severidad de Palmer (PDSI) hace uso de la precipitación y la temperatura mensual para calcular la humedad del suelo.

²⁰ Thornthwaite, C. W. (1948). *Op Cit.*

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

El modelo es implementado por el Centro de Predicción Climática (CPC, por siglas en inglés), ellos desarrollan el modelo para los parámetros estimados en Oklahoma a todos los Estados Unidos y dejar el modelo con espacialmente variar los parámetros para el trabajo futuro. La manera ideal de utilizar el modelo para todos consiste en estimar los parámetros del modelo para varias regiones de suelo similar y cobertura de la tierra y luego utilizar estos parámetros en cada región.

2.9 El Monitor de Sequía de Norteamérica

El Monitor de Sequía está destinado a proporcionar un resumen general de las condiciones actuales de la sequía en Canadá, EEUU y México. Este producto está diseñado para el público en general, medios de comunicación, funcionarios del gobierno y otros puedan ver lo que está sucediendo en todo el país. Para evitar que el mapa sea muy complejo, las categorías de sequía representan las intensidades de sequía o gravedad de la sequía, dentro del área.

Las entidades locales o estatales pueden monitorear los diferentes indicadores utilizados en el Monitor de Sequía para satisfacer necesidades específicas o para hacer frente a los problemas locales. Como consecuencia, podría haber escasez de agua en un área no designada como la sequía, así como no puede haber lugares con suministro adecuado de agua en un área designada con sequía²¹. A continuación se muestra en la tabla 2.3 la clasificación de sequía de acuerdo al monitor.

En México para obtener el mapa correspondiente al monitor de sequía los índices o métodos para detectar la sequía son desplegados en capas en un sistema de información geográfica (SIG) y mediante un consenso de expertos se determinan las regiones afectadas por sequía, para posteriormente dibujarlas en un archivo, a partir de estos archivos se integra una salida única para cada uno de los tres países (Canadá, EUA y México).

²¹ <http://droughtmonitor.unl.edu/classify.htm> Revisado en Septiembre, 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

Categoría	Descripción	Posibles impactos	Rangos				
			Índice de Sequía de Palmer	Modelo de humedad Leaky-Bucket (Percentiles)	USGS Caudal de ríos semanal (Percentiles)	Índice de Precipitación Estandarizada (SPI)	Porcentaje de precipitación (percentiles)
D0	Anormalmente Seco	Al entrar en la sequía: la plantación presenta desaceleración a corto plazo, el crecimiento de los cultivos o pastos. Al salir de la sequía: algunos déficits de agua persistentes, pastos o cultivos no se han recuperado totalmente	-1,0--1,9	21-30	21-30	-0,5--0,7	21-30
D1	Sequía moderada	Algunos daños a los cultivos, pastos, arroyos, embalses o pozos bajos, algunos en desarrollo, la escasez de agua es inminente, restricciones voluntarias de aprovechamiento del agua solicitada	-2,0--2,9	11-20	11-20	-0,8--1,2	11-20
D2	Sequía grave	Probabilidad de pérdidas de cultivos o pastos, la escasez de agua es común, restricciones de agua impuestas	-3,0--3,9	6-10	6-10	-1,3--1,5	6-10
D3	Sequía extrema	Pérdidas de cultivos / pastos importantes; escasez generalizada de agua o restricciones	-4,0--4,9	3-5	3-5	-1,6--1,9	3-5
D4	Sequía excepcional	Pérdidas excepcionales y generalizada de cultivos / pastos, la escasez de agua en los embalses, arroyos y pozos de agua creando situaciones de emergencia	-5,0 O menos	0-2	0-2	-2,0 O menos	0-2

Tabla 2.3. Clasificación de acuerdo al monitor de sequía (Tomado de <http://droughtmonitor.unl.edu>)

Como se aprecia de la tabla 2.3, a pesar de tomar metodologías como Palmer y el SPI, que no necesariamente coinciden con su clasificación o se encuentra superestimada, además de utilizar otros valores para considerar la sequía. El monitor de sequía es generado principalmente por los índices señalados en la tabla 2.3, pero estos antes de ser presentados son ajustados de acuerdo a diversos centros o investigadores que se encargan de revisar que representen la realidad del fenómeno.

3. Perspectiva de sequía

3.1 Descripción de la perspectiva de la sequía generada por el IRI

El Instituto Internacional de Investigación para el clima y sociedad (IRI, por sus siglas en inglés) genera predicciones probabilísticas de la sequía para los EUA. y México en base al Índice de Precipitación Estandarizada (por sus siglas en inglés, SPI) en períodos de acumulación de 3, 6, 9 o 12 meses, para los próximos meses y los muestra en su página web²², en esta se muestran dos tipos de mapas:

Probabilístico: representa un pronóstico de probabilidad espacial de obtener un valor inferior o igual de un valor de SPI dado un límite establecido. Así a una mayor probabilidad, mayor es la posibilidad de tener un valor inferior de SPI relacionado directamente con el grado de severidad de la sequía.

Valor SPI: representa el pronóstico espacial de valores de SPI de no exceder dada una probabilidad determinada. De manera que un valor de SPI, se espera sin cambio con una probabilidad asociada.

La Figura 3.1 muestra estos tipos de mapas se analizan dos situaciones diferentes en el caso de la imagen de la izquierda se plantea que con los datos de septiembre del 2013 se genera un pronóstico para octubre 2013 en el que el límite dado de SPI es de 0.0, así las regiones con valores más altos de probabilidad se pronostican un grado de la severidad de la sequía. En el caso de la imagen de la derecha se muestra el valor de SPI para la probabilidad igual a 0.5 de que no se sobrepase el valor de SPI.

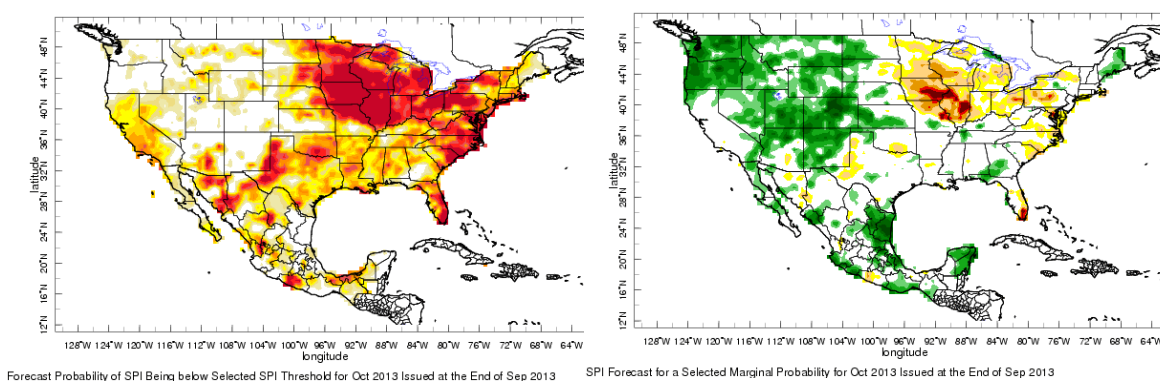


Figura 3. 1 Mapas generados por el IRI perspectiva de sequía. Izquierda probabilístico, derecha Valor SPI.

²² <http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/us-mexico-drought-predictions/>, Revisado en Octubre, 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

Lo anterior de acuerdo a McKee et al (1993)²³ y la relación de convertir una función de densidad de probabilidad gamma de precipitación a un indicador de sequía de con una distribución “normal”.

El pronóstico por medio del índice SPI depende de la persistencia del indicador de sequía, así para un valor de SPI-X, se pueden pronosticar los X-1 siguientes meses consecutivos, sin ser mayor a 6 meses, por inestabilidad en las series de acuerdo a lo propuesto por Lyon et al (2012)²⁴, donde el considera establecer la persistencia de referencia, realizando una mezcla de datos observados para generar series de tiempo sintéticas sin correlación serial y calculando su correspondiente autocorrelación: ignorando la estacionalidad mensual de la precipitación e incluyendo la estacionalidad anual.

Por otro lado debido a que la perspectiva del SPI se basa en la perspectiva estacional de la precipitación generada por el modelo Multi- Ensamble de precipitación del IRI, para elaborar la perspectiva de la sequía se usan dos métodos: el primero es debido a la habilidad de correlación de la simulación de eventos pasados (hindcast) y el segundo es la habilidad de correlación de persistencia. Así en diversos lugares de los EUA y México se emplean diferentes criterios.

Los mapas SPI proporcionan un indicador de corto a largo plazo, siendo húmedo (verde, SPI positivo) o seco (amarillo a rojo, SPI negativo) solo en base a precipitación. La mitad negativa de la escala de color utiliza los mismos colores y los umbrales de SPI correspondientes a los percentiles asociados al (30 %) D0 a D4 (2 %) de acuerdo a las categorías de intensidad de sequía utilizadas en el Monitor de Sequía de EE.UU.

Descripción del Modelo Multi-Ensamble de Precipitación

El IRI genera inicialmente la perspectiva probabilística estacional de la precipitación y temperatura de manera mensual, en terciles dominantes de manera trimestral y de escala global. La perspectiva se genera con base en información de

²³ McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January,, Anaheim, California, American Meteorological Society, 179-184

²⁴ Lyon, B., M. A. Bell, M. K. Tippett, A. Kumar, M. P. Hoerling, Xiao-Wei Quan, Hui Wang, 2012: Baseline Probabilities for the Seasonal Prediction of Meteorological Drought. J. Appl. Meteor. Climatol., 51, 1222–1237.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

varios modelos estadísticos y dinámicos, a partir de los resultados obtenidos para la perspectiva de precipitación se generan los escenarios de sequía para los siguientes meses con la metodología propuesta por Lyon et al., 2012.

La perspectiva del modelo multiensamble se prepara usando los siguientes procedimientos:²⁵

- A) Predicciones de modelos acoplados océano-atmósfera para obtener la Temperatura Superficial del Mar (TSM) del Pacífico tropical que cubre el período del pronóstico. Particularmente dando el mayor peso a las predicciones del modelo acoplado operado por los Centros Nacionales de Predicción de la NOAA.
- B) Las previsiones de la TSM del Océano Índico tropical mediante un modelo estadístico desarrollado por el IRI.
- C) Modelo de circulación general (MCG) para obtener predicciones atmosféricas globales de la respuesta de la atmósfera para predecir patrones de temperatura superficial del mar.
- D) Otras fuentes de información como el Centro de Predicción Climática CPC, el Proyecto de Predicción estacional e interanual de NASA (GSFC-NASA), así como la investigación predicción estacional en el Centro de estudios Océano- Tierra-Atmósfera.

Cabe resaltar que los procedimientos, modelos y datos utilizados para obtener esta predicción en términos de probabilidad pueden ser diferentes de los utilizados por otros servicios meteorológicos nacionales en sus diferentes regiones. Por lo tanto, este producto depende de la precisión de las predicciones de TSM, para el Pacífico tropical en relación con el fenómeno del ENSO, así estas predicciones pueden llegar a proporcionar información útil, aunque siempre hay incertidumbre en cualquier pronóstico debido a la variabilidad caótica interna de la atmósfera.

El Centro Climático de Predicción (CPC, por sus siglas en inglés), encargado de múltiples productos de carácter oficial para Estados Unidos, publica los pronósticos oficiales de corto y mediano plazo²⁶, así también presenta y genera perspectivas de la sequía de manera oficial para el corto periodo en un mes y para el largo periodo para los siguientes tres meses (estacional).

²⁵ http://iri.columbia.edu/climate/forecast/net_asmt/2013/oct2013/text/NAmerica.html, Revisado en Octubre 2013

²⁶ <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>, Revisado en Octubre 2013

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

3.2 Perspectiva de sequía mensual y estacional de EUA “Outlook Drought”.

En los siguientes apartados se presenta las herramientas utilizadas para la generación de la perspectiva mensual y estacional de la sequía para EUA. Mensualmente y en ocasiones quincenalmente el CPC genera la perspectiva del estado de la sequía en base a lo generado inicialmente por el Monitor de sequía de Norteamérica, posteriormente de las condiciones iniciales, las previsiones a corto, medio y largo plazo, las mismas perspectivas mensuales actualizadas de temperatura y precipitación del CPC y de la climatología. La figura 3.2 muestra en la izquierda la perspectiva mensual de octubre y en la derecha la perspectiva estacional para el mes de noviembre, en esta figura se muestra a grandes rasgos cuatro condiciones esperadas en las regiones coloreadas del mapa que son:

- Café** la persistencia o intensificación de un estado previo de sequía, que se encuentra referido dentro de los niveles del monitor de sequía D1 al D4.
- Caqui**, la sequía permanece pero tiende a mejorar o disminuir su grado de severidad.
- Verde**, probable disipación de sequía.
- Amarillo**, probable desarrollo de sequía.

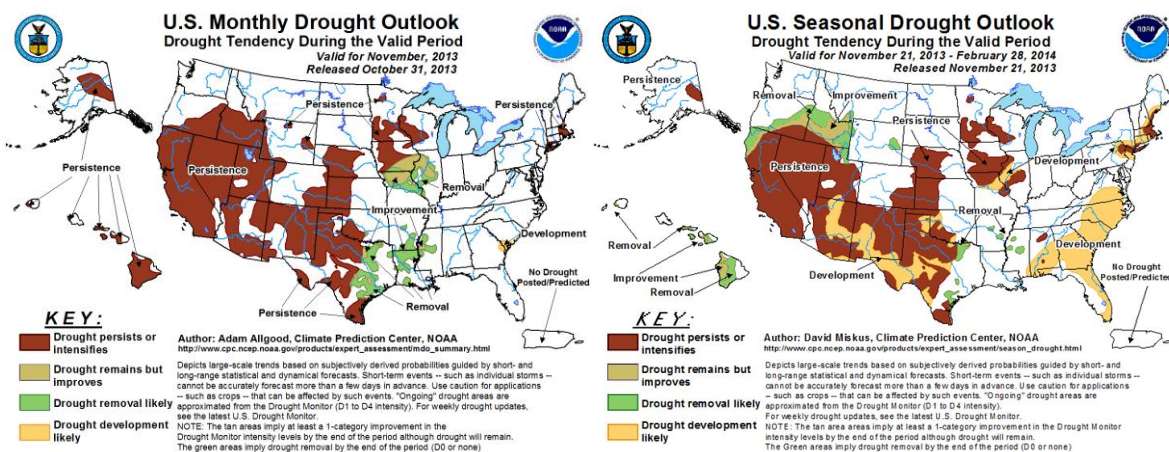


Figura 3. 2 Perspectivas de sequía generadas por el CPC. Izquierda perspectiva mensual del mes de Noviembre . Derecha perspectiva estacional del trimestre Diciembre, Enero y Febrero.

De la perspectiva mensual se detalla en la región occidente y centro de EUA la persistencia de la sequía definida y algunas mejoras en los estados de Texas, Louisiana, Missouri, Iowa e Illinois. Con respecto a la perspectiva estacional se

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

muestra que en la región sur y la costa oriente de EUA se muestra el desarrollo de la sequía para un grado D1 y algunas mejoras en los estados de Oregon e Idaho.

Para documentar el desarrollo aplicado para la elaboración de la perspectiva de sequía mensual de EUA de acuerdo con lo mostrado en la página del CPC, algunos de los productos desarrollados a corto, mediano y largo plazo, utilizados para la generación de la perspectiva mensual son los siguientes:

- **Condiciones iniciales:** Monitor de sequía, climatología, condiciones iniciales y pronóstico de ENSO, condiciones iniciales de la Oscilación Madden-Julian.
- Pronósticos del CPC de 6 -10 días y 8 – 14 días de Temperatura y Precipitación.
- Pronóstico de precipitación del NAEFS y ESRL-GEFS
- Pronóstico a 14 días, perspectiva mensual y estacional de la Humedad del suelo.
- Perspectivas mensuales y estacionales de modelos dinámicos CFSv2, NMME, e IMME.
- Pronostico de precipitación acumulada a 7 días desde el NCEP del Centro de dicción del tiempo (WPC, por sus siglas en ingles).
- Perspectivas mensuales y estacionales oficiales del CPC de Temperatura y Precipitación.

3.2.1 Condiciones iniciales, Monitor de sequía.

La entrada inicial para la generación de la perspectiva es la delimitación de zonas de sequía definida, el monitor de sequía de EUA generado cada semana, en la figura 3.3 se muestra el monitor de sequía para dos fechas el 29 de octubre y el 26 de noviembre del 2013. Las áreas iniciales son aquellas definidas con una gravedad de sequía de D1 a D4 sin descartar las regiones clasificadas como D0 por el posible desarrollo de un evento de sequía.

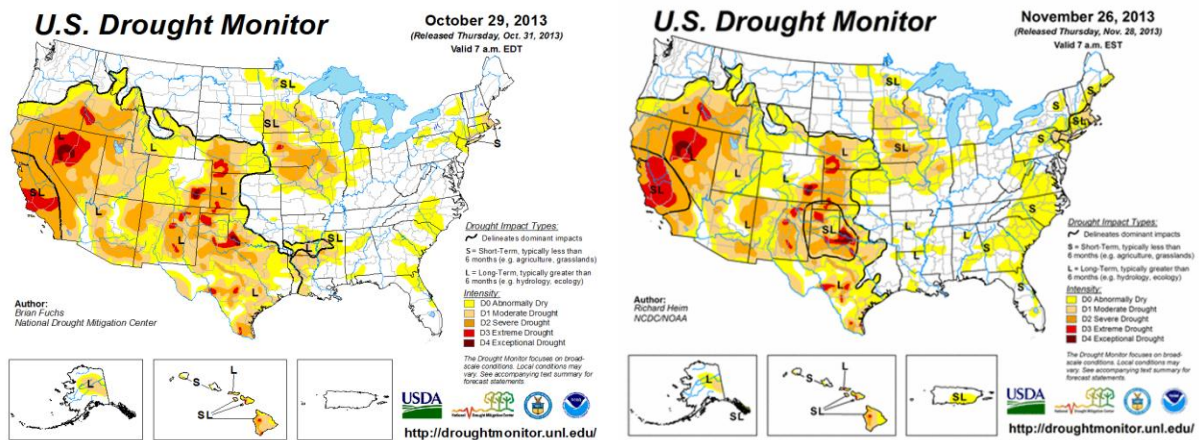


Figura 3. 3 Monitor de sequía de EUA, Izquierda para el 29 de octubre²⁷. Derecha para el 26 de noviembre del 2013²⁸.

3.2.2 Condiciones iniciales, Climatología.

La climatología de la región también es otro factor inicial para considerar como se espera que varíen las condiciones en relación al valor medio, además de dar una representación espacial del comportamiento promedio para el mes de perspectiva, los mapas son generados por el CPC²⁹ con periodo del 1979-1995.

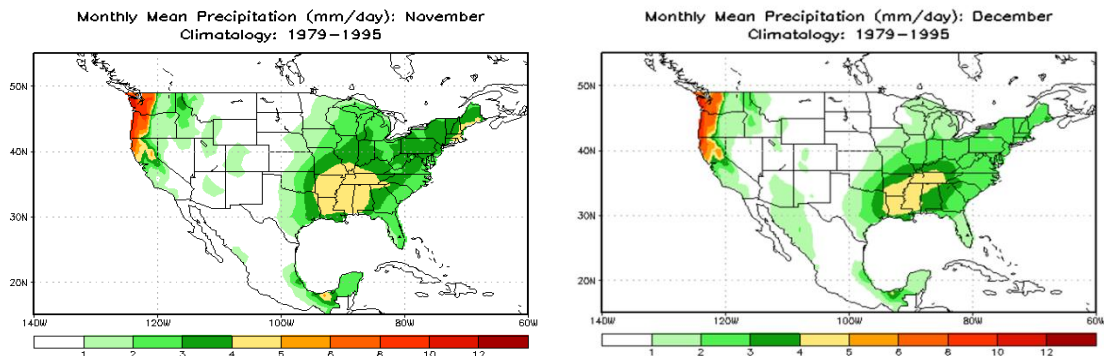


Figura 3. 4 Climatología de precipitación (mm/día) EUA y México generada por el CPC en base al periodo 1979-1995. Izquierda para el mes de noviembre. Derecha para el mes de diciembre³⁰.

²⁷ <http://droughtmonitor.unl.edu/> Revisado en Octubre, 2013

²⁸ <http://droughtmonitor.unl.edu/> Revisado en Noviembre, 2013

²⁹ <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/climatology> Revisado en Octubre, 2013

³⁰ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/climatology/usmexprecip/precip.clim.nov_y_1979-1995.gif Revisado en Octubre, 2013

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

3.2.3 Condiciones iniciales, ENSO.

Analizar las condiciones del El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) dado su patrón de relación con algunas zonas de EUA de acuerdo a lo presentado también por el CPC, así las condiciones se presentan para noviembre a ser neutrales y se espera que continúe así para los próximos seis meses. La figura 3.5 presenta por una parte las anomalías de temperatura y también la pluma de anomalías de pronóstico esperado para las condiciones del ENSO de acuerdo a modelos dinámicos y estadísticos por el trabajo conjunto del IRI/CPC.

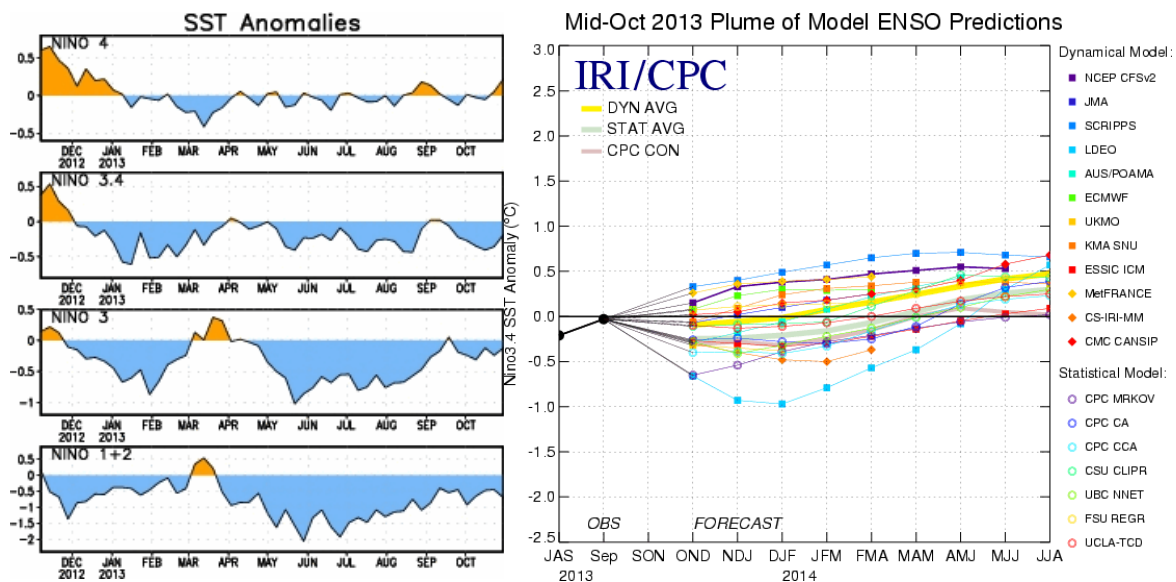


Figura 3. 5 Izquierda, condiciones actuales del ENSO; Derecha, pluma de pronósticos dinámicos y estadísticos del IRI/CPC.³¹

De acuerdo a las condiciones del ENSO el CPC ha analizado de manera general la relación de precipitación de acuerdo a lo mostrado en la figura 3.6, que se muestra el número de días por estación, en condiciones neutras de ENSO la precipitación es principalmente en la región centro y oriente de EUA y la costa oeste. En condiciones de NIÑO en su mayor parte la costa este, sur y oeste, el número de días de precipitación aumenta y en condiciones de NIÑA el patrón parece invertirse en teniendo una menor cantidad de días de precipitación en la costa este, sur y suroeste de EUA, excepto en la región costera noroeste tiende a aumentar.

³¹ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_update/ssta_c.gif
http://iri.columbia.edu/climate/ENSO/currentinfo/SST_table.gif Revisado en Noviembre, 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

La metodología empleada para la generación de la relación encontrada entre el ENSO y la temperatura y precipitación de EUA se encuentra descrito por Huang *et al.* 1996³², ellos plantean la metodología de normales climáticas óptimas, donde relacionan tendencias de temperatura, precipitación y cubierta de nieve con la ocurrencia del ENSO, las bases de datos empleadas en el análisis y su descripción se encuentra registrado en la siguiente dirección web.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/ENSO/composites/readme.shtml>

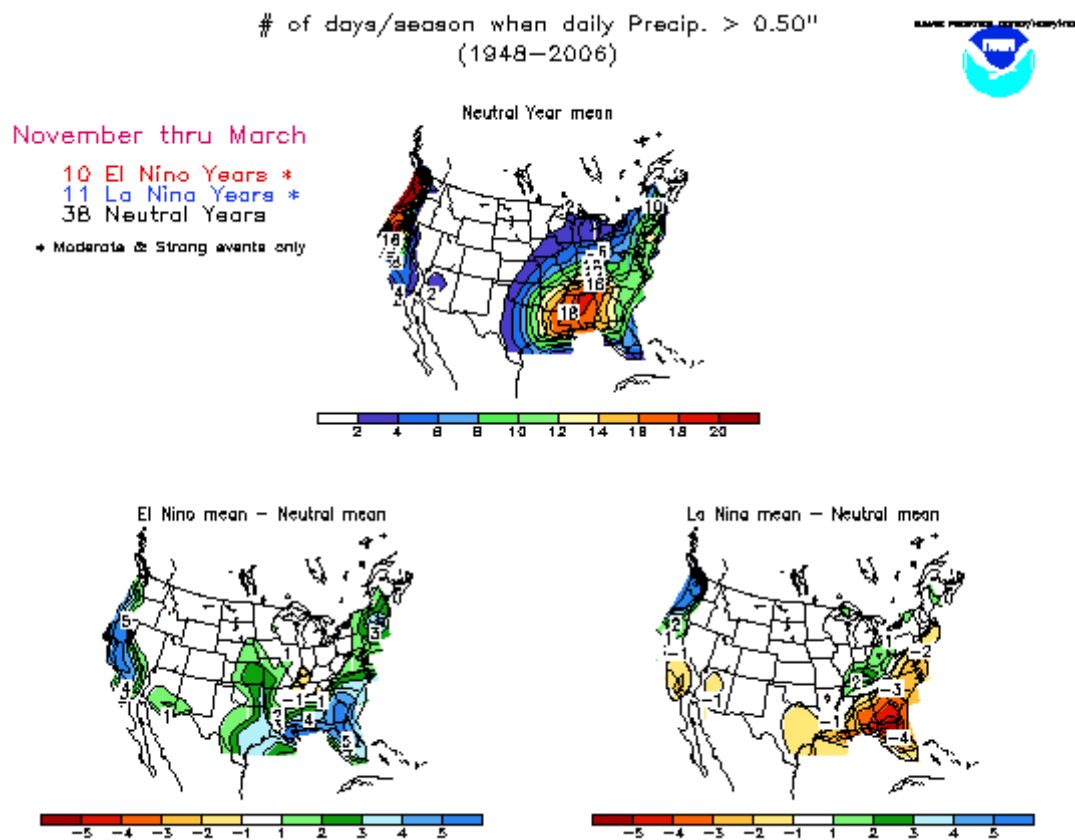


Figura 3. 6 Relación entre el ENSO y el número de días de precipitación en EUA.³³

3.2.4 Condiciones iniciales, Oscilación Madden-Julian.

La oscilación Madden-Julian (MJO, por sus siglas en inglés) es un disturbio tropical que se propaga hacia el este alrededor de los trópicos globales con un

³² Huang, J., H.M. van den Dool, and A.G. Barnston, 1996: Long-Lead Seasonal Temperature Prediction Using Optimal Climate Normals. *J. Climate*, 9, 809–817.

³³ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/lanina/us_impacts/precip_thresh.gif,

Revisado en Octubre 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

ciclo del orden de 30-60 días. La MJO tiene amplias repercusiones que van en los patrones de precipitación tropical y extratropical, la circulación atmosférica y la temperatura de la superficie alrededor de los trópicos y subtrópicos mundial. Hay evidencia de que la MJO influye en el ciclo de ENSO. No provoca El Niño o La Niña, pero puede contribuir a la velocidad del desarrollo y la intensidad de El Niño y La Niña, mostrado por Zhang y Gottschalck (2002) ³⁴.

Las condiciones iniciales de la MJO (ver figura 3.7) al igual que las de ENSO no son evidentes en nuestra región, en el periodo del 16 de mayo al 1 de noviembre del 2013 (figura 3.7, izquierda) se muestra la propagación de la MJO con características débiles en la región de los 120° oeste y en el periodo del 16 de junio al 1 de diciembre del 2013 (figura 3.7, derecha) simplemente no parece ver un episodio definido que pueda afectar a la región.

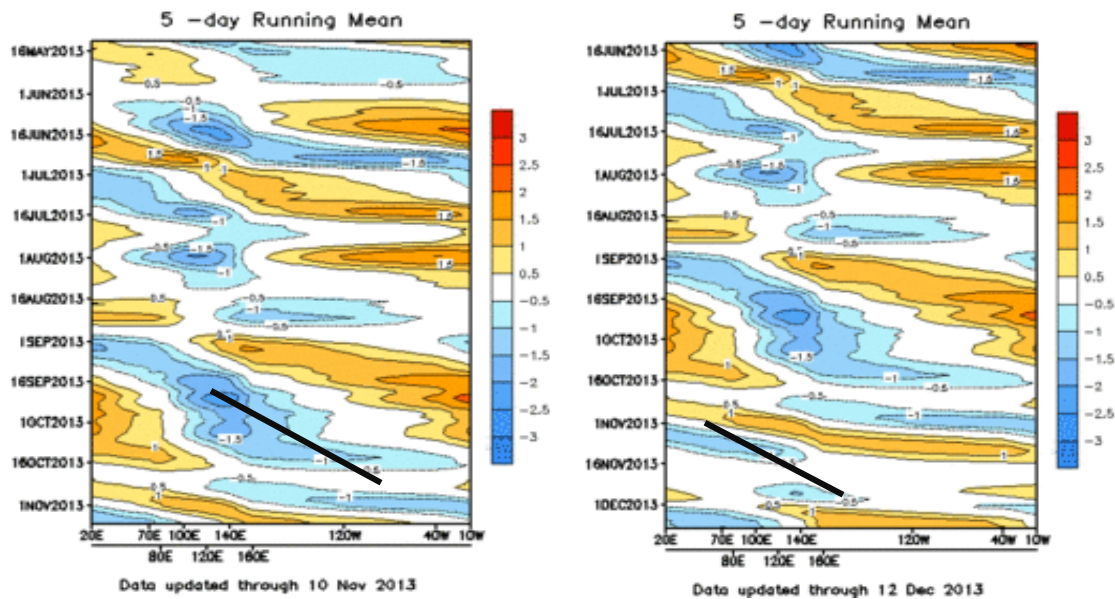


Figura 3. 7 Representación de las condiciones de la MJO, velocidad potencial a 200hPa (m2/s). Izquierda periodo del 16 de mayo al 1 de noviembre del 2013. Derecha periodo del 16 de junio al 1 de diciembre del 2013. La Línea negra indica el seguimiento de una propagación hacia el este, representación de la MJO. ³⁵

3.2.5 Pronósticos oficiales de anomalía de temperatura y precipitación de 6 - 10 días y 8 – 14 días.

³⁴ Zhang, C. and J. Gottschalck (2002): SST Anomalies of ENSO and the Madden-Julian Oscillation in the Equatorial Pacific. *Journal of Climate*, 15, 2429-2445.

³⁵ <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/mjo.shtml> Revisado en Noviembre, 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

Los mapas de pronóstico de 6 a 10 (8 a 14) días se generan como pronóstico oficial del CPC, utilizando el pronóstico de altura geopotencial de 500 hPa y su desviación de ese pronóstico con respecto al promedio 1981-2010, el período medio de la previsión cubre la fecha central y 2 (3) días antes y después de la fecha central, para un total de 5 (7) días. Por ejemplo sea el pronóstico para el día 7 de noviembre del 2013 se toman los siguientes siete días para realizar la relación de los años análogos, en la figura 3.8 el pronóstico de la altura geopotencial a 500 hPa (líneas negras) para el cual se analiza el periodo 1950 a 2010 escogiendo los diez años con las mayores correlaciones espaciales para los años análogos, posteriormente se obtienen las desviaciones de los últimos 30 años (líneas rojas indican por arriba y azules por debajo). Así para el 7 de noviembre se analiza para el 14 de noviembre más- menos 2 (3) días.

Por medio de los años análogos se obtienen los mapas de superficie de temperatura y precipitación dividiendo en tres situaciones en función de porcentajes de 100% a 50% por arriba (rojo) y más húmedo (verde) de 50% a -50% sin cambios (blanco) y -50% a -100% der debajo (azul) y más seco (café). Mostrado en las figuras 3.9 y 3.10 para las variables de temperatura y precipitación respectivamente.

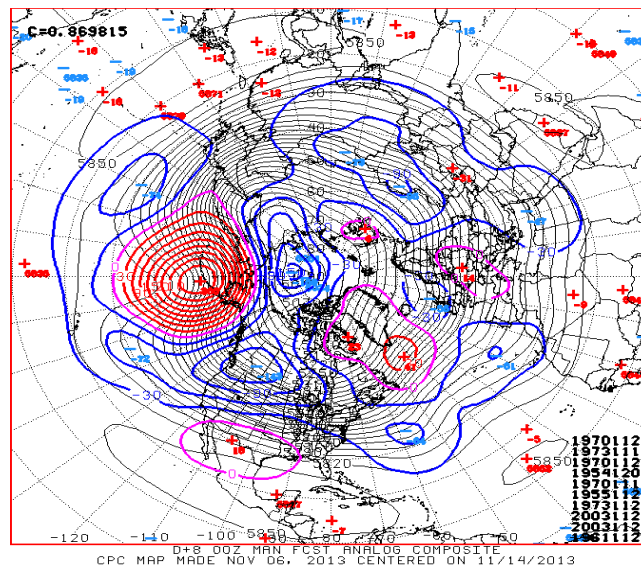


Figura 3. 8 Pronóstico de alturas geopotenciales a 500 hPa (líneas negras) para su determinación de años análogos (esquina inferior derecha) y la desviación obtenida del pronóstico en relación a lo observado en el periodo 1980-2010 (azul, indican valores por debajo del normal y rojo por arriba del valor normal).³⁶

³⁶ <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/610day/610analog.off.gif>, Revisado en Octubre, 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

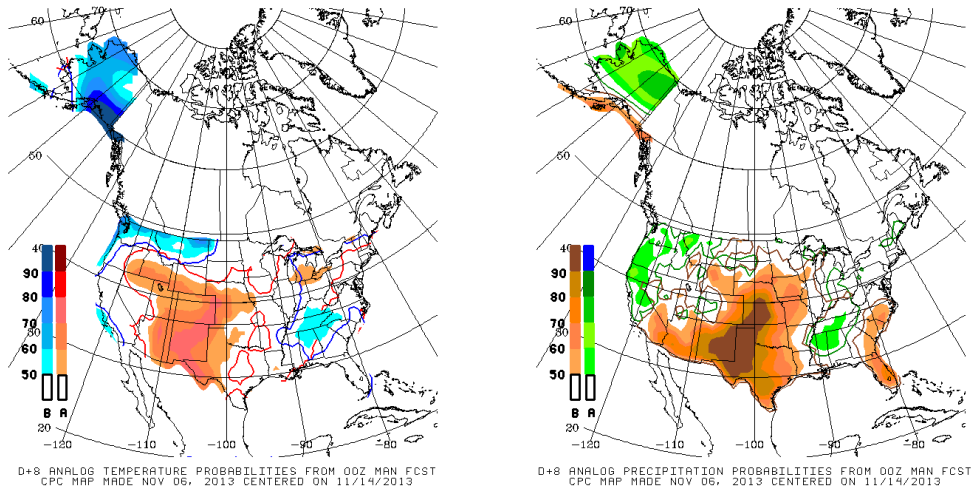


Figura 3. 9 Mapas de superficie resultado de años análogos. Izquierda probabilidad de temperatura por debajo (azul) y por arriba (rojo); Derecha probabilidad de precipitación por debajo (café) y por arriba (verde).

Los años análogos son la primera herramienta estadística para determinar las salidas oficiales de temperatura y precipitación, posteriormente el pronosticador hace uso de otras herramientas como el uso de las salidas del Sistema de Pronóstico Global (GFS, por sus siglas en inglés), el Sistema de Pronóstico de Ensamble Global (GEFS, por sus siglas en inglés) y el Centro Europeo para Pronóstico del tiempo de Mediano Plazo, la decisión del meteorólogo es fundamental es el encargado de la generación de los pronósticos oficiales de 6-10 días y 8 -14 días.

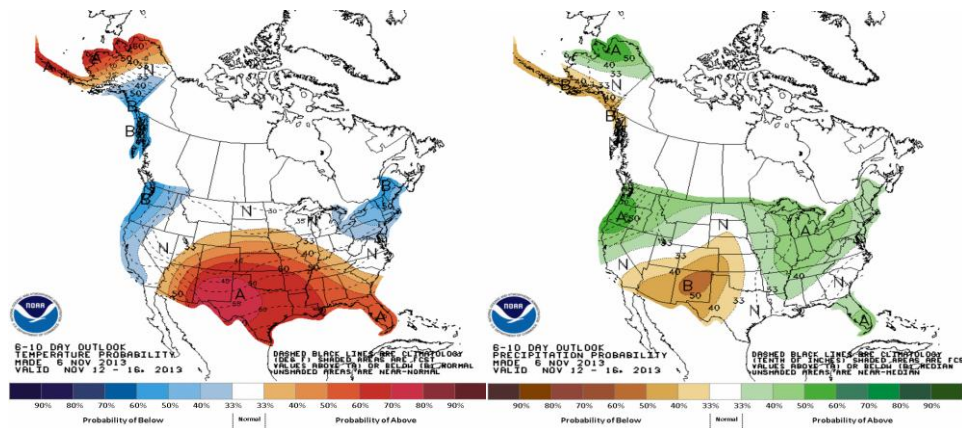


Figura 3. 10 Pronósticos oficiales del CPC para 6-10 días. Temperatura (izquierda) y Precipitación (Derecha).

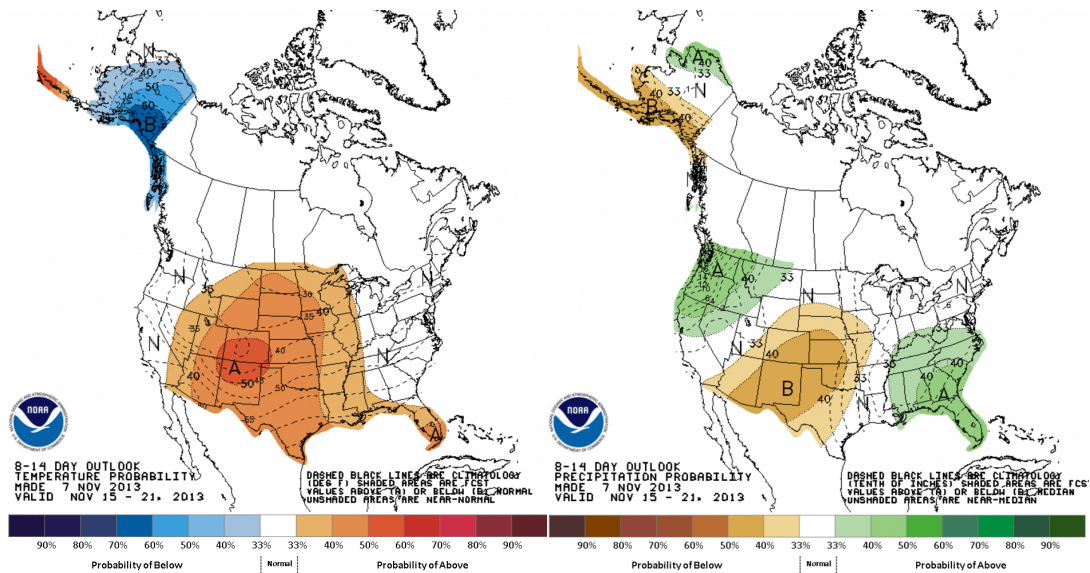


Figura 3. 11 Pronósticos oficiales del CPC para 8-14 días. Temperatura (izquierda) y Precipitación (Derecha).

Los pronósticos oficiales del CPC pueden ser consultados en las siguientes ligas <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/610day/index.php> y <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/814day/index.php>

3.2.6 Pronóstico de precipitación del NAEFS y ESRL-GEFS.

El Sistema de Pronóstico de Ensamble de Norte América (NAEFS, por sus siglas en inglés) es un proyecto conjunto entre el Servicio Meteorológico de Canadá (MSC por sus siglas en inglés), el Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos (NWS, por sus siglas en inglés) y el Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN). NAEFS fue lanzado oficialmente en noviembre de 2004 en presencia de los representantes de los tres países.

Este producto interpreta un conjunto de 40 modelos de pronósticos numéricos diferentes para producir una guía para la predicción probabilística de las temperaturas promedio de la superficie y la precipitación acumulada. Cada modelo de predicción se basa en ligeras diferencias con respecto al estado actual de la atmósfera o ligeramente diferentes de acuerdo a la física del modelo. El conjunto de soluciones representa el rango de posibles resultados para una previsión determinada. Un nuevo sistema de predicción por conjuntos está disponible cada 12 horas, tanto de los modelos canadienses y NCEP. Estos se basan en las condiciones iniciales generadas diariamente a partir de observaciones en 1200 y 0000 UTC, correspondientes a las horas de la mañana y por la noche de América del Norte.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

Las figuras 3.12 y 3.13 representan la salida del NAEFS de 6 a 10 días y en 8 a 14 días para el pronóstico de la precipitación en Norteamérica.

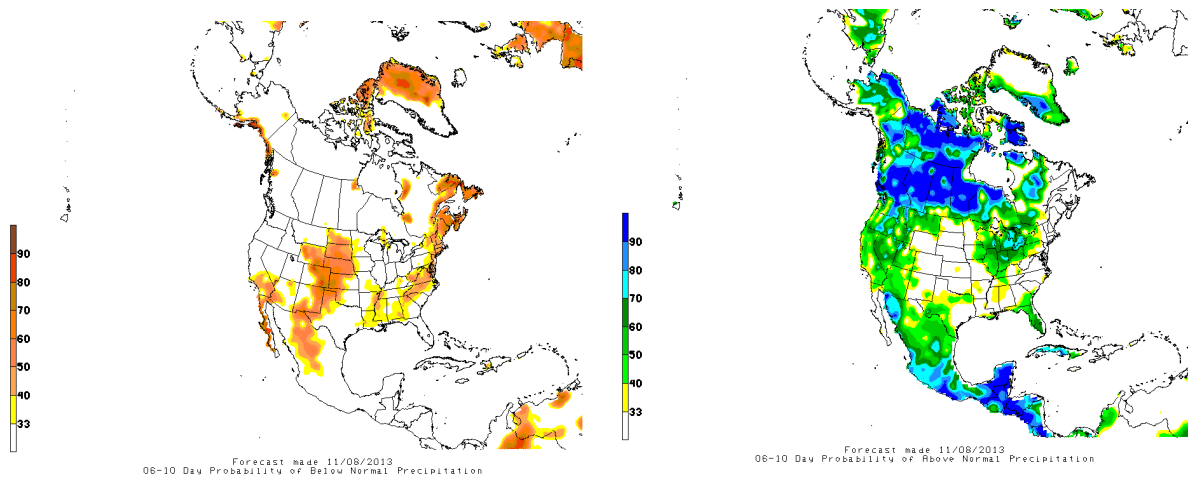


Figura 3. 12 Probabilidades de precipitación de 6 a 10 días, debajo de lo normal (izquierda) y por arriba de lo normal (derecha).

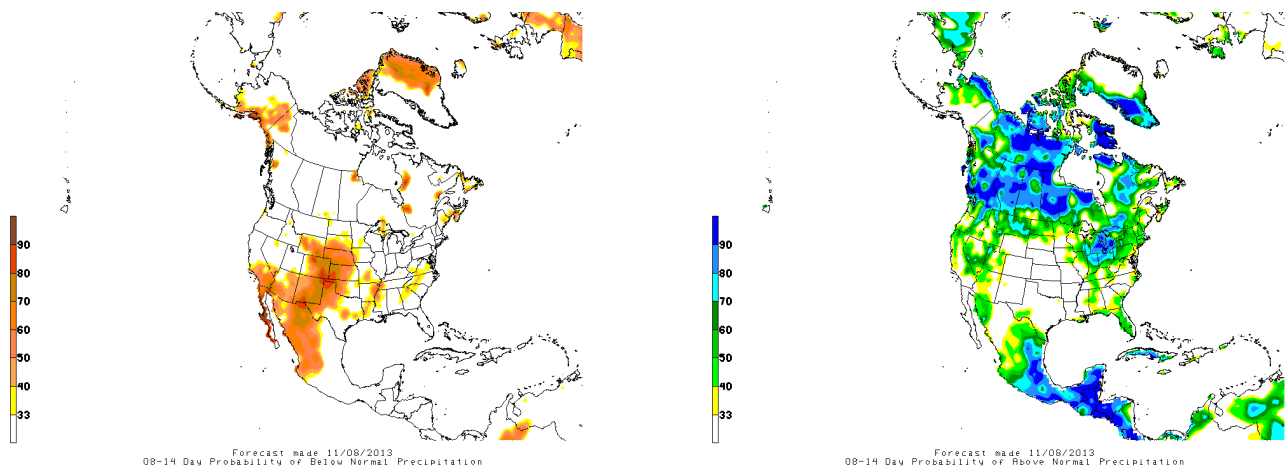


Figura 3. 13 Probabilidades de precipitación de 8 a 14 días, debajo de lo normal (izquierda) y por arriba de lo normal (derecha).

El Sistema de Laboratorio de Investigación de la Tierra (ESRL, por sus siglas en inglés), genera a partir de los datos de entrada del Sistema de Pronóstico de Ensamble Global (GEFS, por sus siglas en inglés) una metodología de análogos usando los datos de precipitación del Reanálisis Regional de América del Norte (NARR, por sus siglas en inglés), los análogos se usan para cada cuadro de malla a través de lo pronosticado y se escogen los 10 años con la precipitación similar

en el periodo de 1985 al 2010 para una descripción completa de su metodología revisar su Hamill y Whitaker (2006)³⁷.

La figura 3.14 representa la salida del modelo de análogos y el GEFS de precipitación para periodos de 8 a 14 días, en el que muestra la metodología de análogos es bajado de resolución a lo comparado con el GEFS.

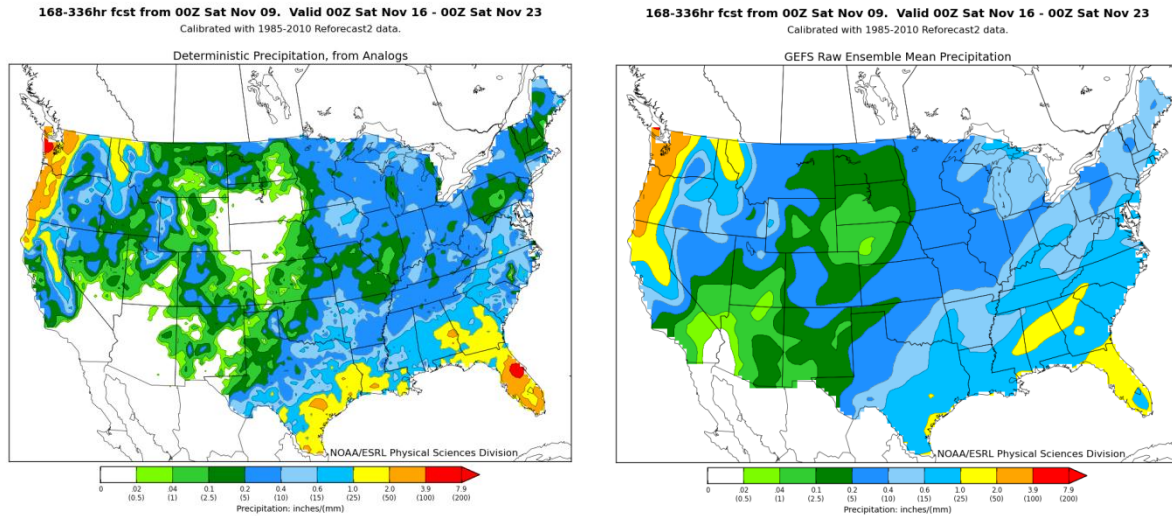


Figura 3. 14 Comparación entre el modelo de análogos de precipitación generado por el ESRL (Izquierda). Pronóstico de precipitación del GEFS (Derecha).³⁸

3.2.7 Pronóstico a 14 días, perspectiva mensual y estacional de la humedad del suelo.

El CPC ha desarrollado una herramienta de humedad del suelo para las próximas dos semanas en función del tiempo pronosticado por el GFS y otro de perspectiva mensual y estacional basado en años análogos, la metodología fue nombrada como Analogía Construida sobre la humedad del Suelo (CAS, por su nombre en inglés). La construcción es generada por los años análogos, en referencia con el modelo de humedad del suelo de Huang et al (1996)³⁹, para la aplicación del

³⁷ Hamill T. M. and J. S. Whitaker (2006) Probabilistic Quantitative Precipitation Forecasts Based on Reforecast Analogs: Theory and Application. *Monthly Weather Review*. November Vol 134: 3209-3230. http://www.esrl.noaa.gov/psd/people/tom.hamill/reforecast_analog_v2.pdf

³⁸ <http://www.esrl.noaa.gov/psd/forecasts/reforecast2/analogs/index.html> Revisado en Octubre 2013

³⁹ Huang, J., H. M. van den Dool, and K. G. Georgakakos, (1996) Analysis of model calculated soil moisture over the US (1931 – 1993) and applications to long range temperature forecasts, *Journal of Climate*, Vol 9, 1350 –1362.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

modelo utiliza los datos de temperatura media y precipitación para la generación de un pronóstico de la humedad del suelo. Para la construcción de los años análogos se utiliza como único indicador la humedad del suelo estimada por el mismo modelo en años anteriores para los EUA, extrayendo de estos los 10 años con mayor correlación encontrada.⁴⁰

A continuación se presentan los resultados generados por el CPC, de sus pronósticos de humedad del suelo. La figura 3.15 muestra los pronósticos de la anomalía de humedad del suelo en mm para el periodo del 5 (5) de noviembre al 12 (19) de noviembre del 2013 en base a las resultados del GFS en cuanto a su temperatura superficial y la precipitación esperada en el periodo.

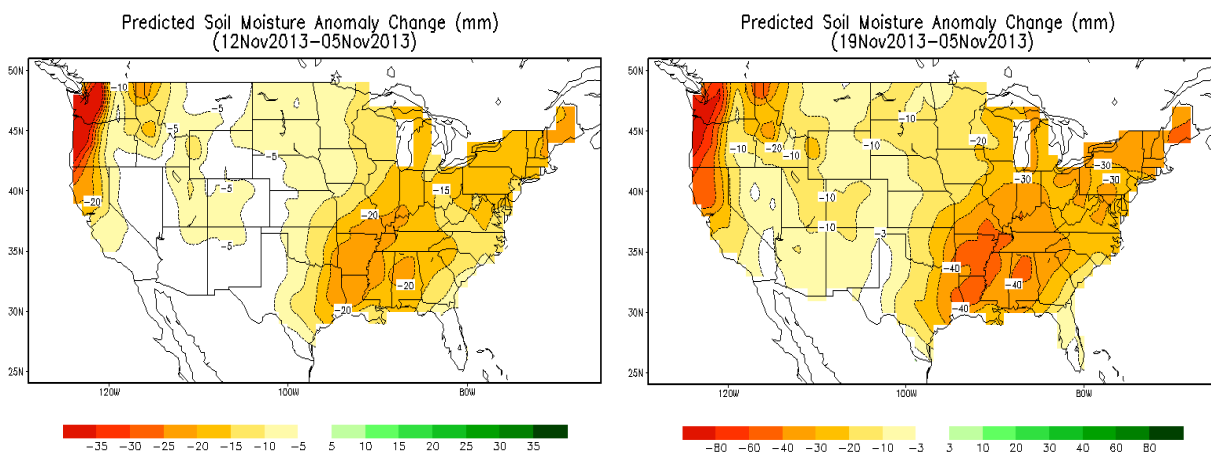


Figura 3. 15 Pronóstico de humedad del suelo en mm generado por medio del GFS para 7 días (izquierda) y para 14 días (derecha).⁴¹

⁴⁰ <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/soilmst/forecasts.shtml> Revisado en Octubre 2013

⁴¹ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/soilmst/mrf_diff.shtml Revisado en Octubre 2013

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

La figura 3.16 muestra la perspectiva mensual y estacional, en la izquierda para el mes de diciembre del 2013 y en la derecha para el mes de marzo del 2013, construido con análogos, a partir de los datos de entrada de los análogos de temperatura y precipitación generaron los cálculos de la humedad del suelo, por el método de Huang *et al.*, (1996)⁴².

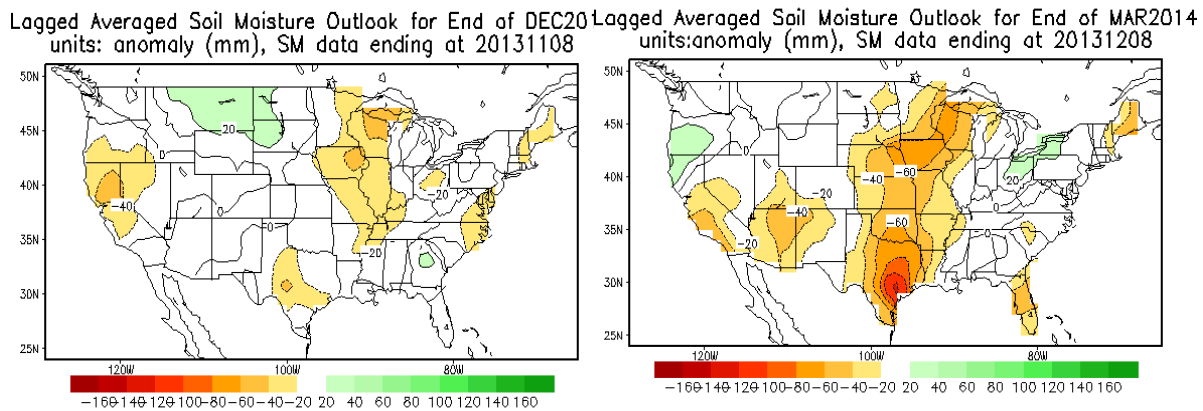


Figura 3. 16 Perspectiva en base a años análogos. Perspectiva mensual de humedad del suelo en mm para el mes de diciembre del 2013 (izquierda). Perspectiva estacional para el mes de marzo del 2014.⁴³

3.2.8 Perspectivas de modelos dinámicos CFSv2, NMME, e IMME.

El Sistema de Pronóstico del Clima (CFS, por sus siglas en inglés) es un modelo con interacción global entre océanos y continentes, continentes y atmósfera. Producido por varias docenas de científicos bajo la dirección del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés), este modelo dispone de datos por hora con una resolución horizontal de medio grado alrededor de la Tierra. El CFS utiliza lo último en proceso de asimilación de datos por medio de varias fuentes: observaciones en superficie, sondeos atmosféricos, observaciones de aviones y de satélites.

La perspectiva mensual del CFSv2 para la anomalía de precipitación visto en la figura 3.17 representa las anomalías de precipitación esperadas de diciembre 2013 en mm/día, anomalías normalizadas, así como también representa las áreas con menor grado de habilidad (correlación menor a 0.3) del modelo representadas en áreas grises. La figura 3.18 representa la perspectiva estacional en los trimestres DEF y EFM.

⁴² Huang, J., H. M. van den Dool, and K. G. Georgakakos, (1996) *op. cit.*

⁴³ <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/soilmst/cas.shtm> Revisado en Noviembre, 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

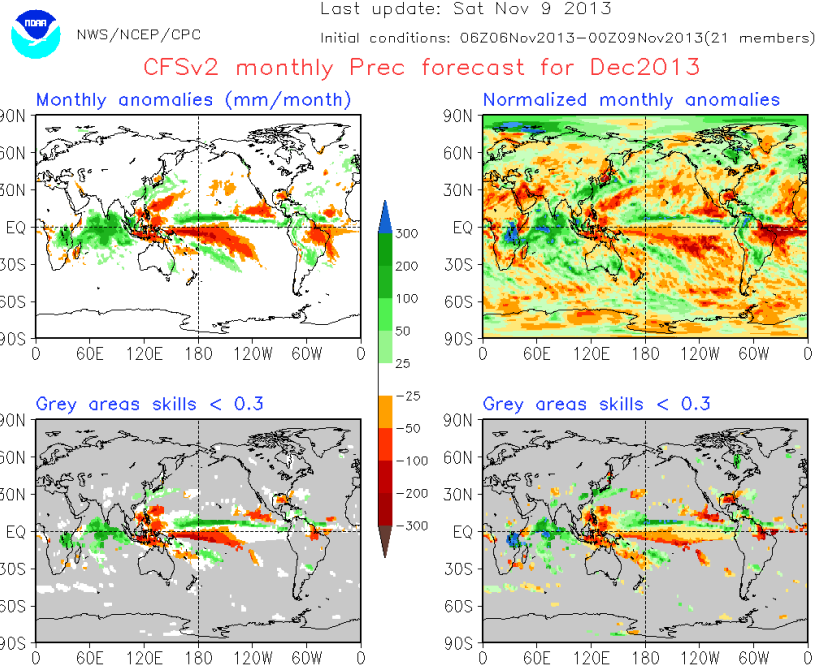


Figura 3. 17 Perspectiva mensual de precipitación del CFSv2, en anomalías para diciembre.⁴⁴

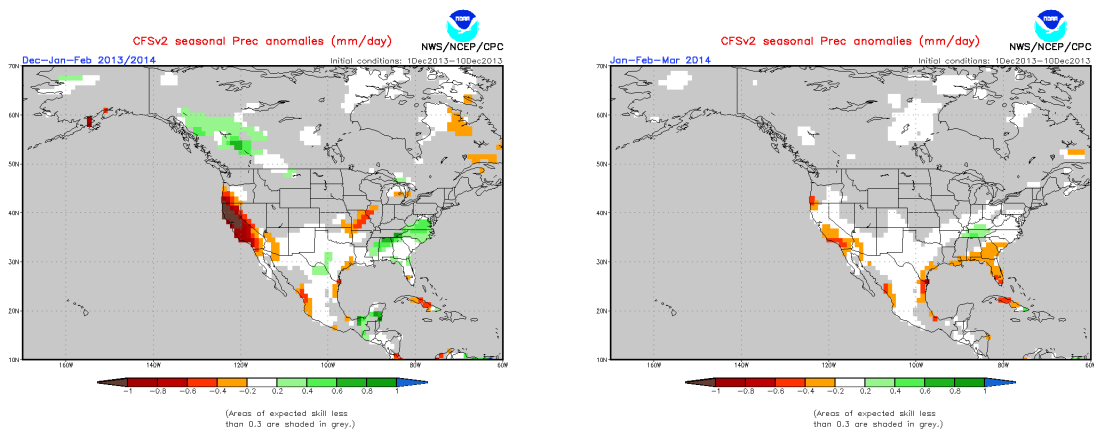


Figura 3. 18 Perspectiva trimestral de precipitación del CFSv2, en anomalías para los trimestres DEF (izquierda) y EFM (derecha).⁴⁵

El Modelo de Ensamble Multi Nacional de EUA (NMME, por sus siglas en inglés) es un sistema de predicción estacional de manera experimental que consiste en modelos acoplados de diferentes centros como NOAA, NCEP, IRI, NCAR, NASA y CMC de Canadá. Cuenta con un enfoque multi-modelo único que ha mostrado ser

⁴⁴ <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/people/mchen/CFSv2FCST/monthly/> Revisado en Noviembre 2013.

⁴⁵ <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/CFSv2/CFSv2seasonal.shtml> Revisado en Diciembre 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

extremadamente eficaz en la cuantificación de la incertidumbre de predicción debido a la incertidumbre en la formulación del modelo, y ha demostrado producir una mejor predicción de la calidad (en promedio) que ningún modelo por sí mismo. Este enfoque multi-modelo es la base de varios esfuerzos de investigación de predicción de colaboración internacional, incluyendo sistema operativo europeo⁴⁶.

La figura 3.19 representa la perspectiva mensual del NMME en mm/día para Norteamérica, los productos se encuentran en la siguiente página:

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/> .

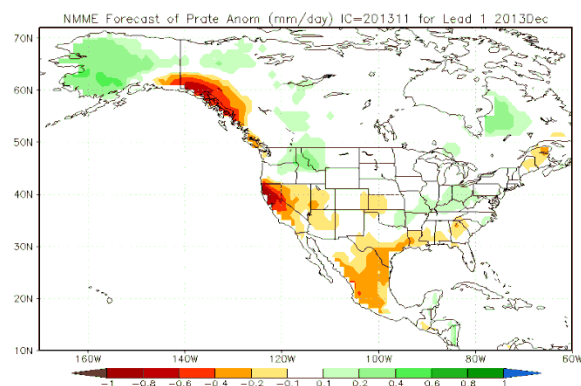


Figura 3. 19 Perspectiva de anomalía de precipitación en mm/día para diciembre del 2013 del NMME.⁴⁷

La figura 3.20 representa la perspectiva trimensual del NMME en mm/día para los trimestres EFM y FMA.

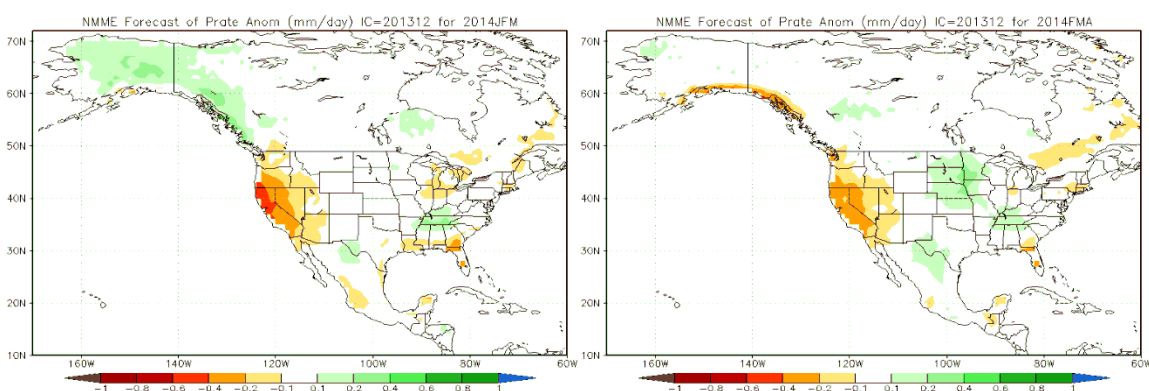


Figura 3. 20 Perspectiva de anomalía de precipitación en mm/día para los trimestres EFM (izquierda) y FMA (derecha) del NMME.⁴⁸

⁴⁶ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/NMME_description.html Revisado en Noviembre 2013.

⁴⁷ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/current/images/NMME_ensemble_prate_us_lead1.png Revisado en Noviembre 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

Por otro lado el Modelo de Ensamble Multi Internacional (IMME, por sus siglas en inglés) también presenta cartas de anomalía de precipitación a escala global también en mm/día, pero no se ha actualizado desde el mes de octubre del 2013, como la perspectiva de diciembre mostrada en la figura 3.21. Los trimestres EFM y FMA generados en diciembre se encuentran en la figura 3.22.

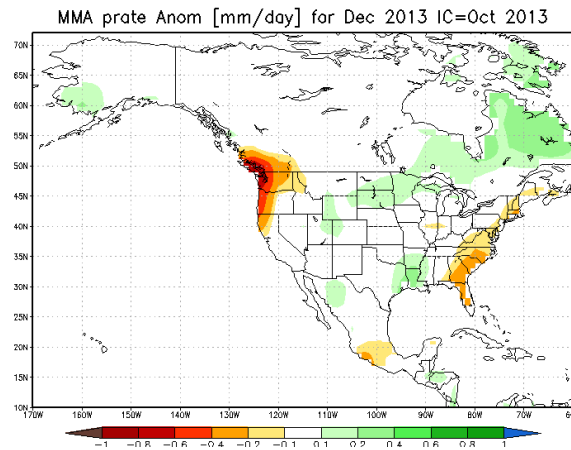


Figura 3. 21 Perspectiva de anomalía de precipitación en mm/día para diciembre del 2013 del IMME.⁴⁹

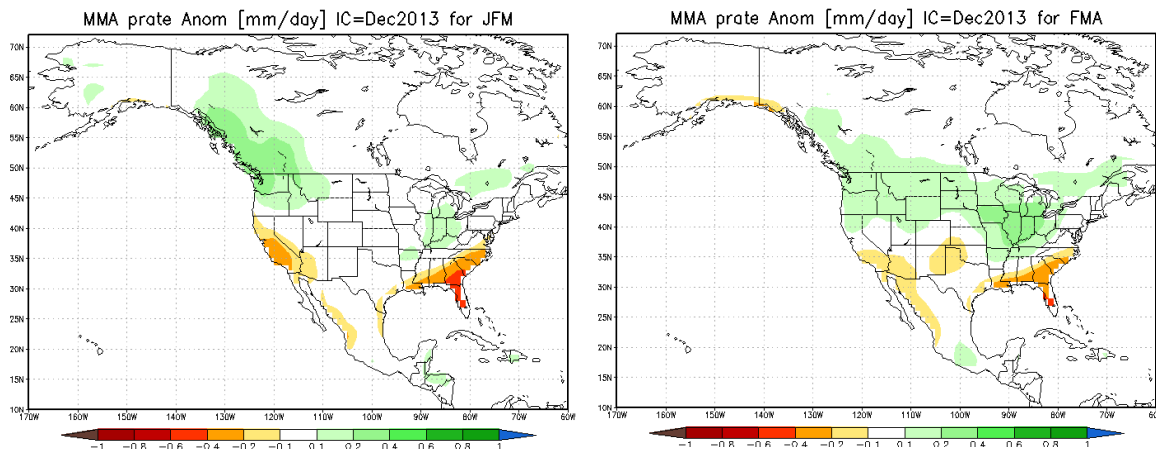


Figura 3. 22 Perspectiva de anomalía de precipitación en mm/día para los trimestres EFM (izquierda) y FMA (derecha) del IMME.⁵⁰

⁴⁸ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/current/usprate_Seas1.html Revisado en Diciembre 2013.

⁴⁹ <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/current/IMMEprate.html> Revisado en Noviembre 2013.

⁵⁰ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/current/IMMEprate_us.S.html Revisado en Diciembre 2013.

3.2.9 Pronóstico de precipitación acumulada a 7 días del WPC.

Otra de la herramienta utilizada para la perspectiva mensual es el uso del pronóstico a siete días del Centro de Predicción del Tiempo (WPC, por sus siglas en inglés), en el presentan el pronóstico en base dos criterios principalmente la salida del promedio de precipitación del GEFS y en base a correcciones manuales que realizan los pronosticadores de acuerdo a sus conocimientos de las diferentes regiones, así pasa a ser un pronóstico de precipitación cuantitativa, la figura 3.23 muestra la precipitación total acumulada en 7 días pronosticada por el WPC, que es otra herramienta utilizada para el desarrollo de la perspectiva mensual principalmente.

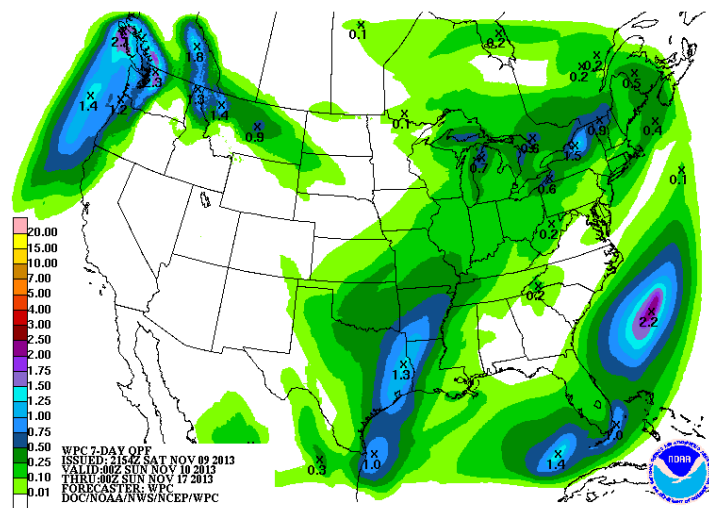


Figura 3. 23 Precipitación Total Acumulada en 7 días pronosticada por el WPC. ⁵¹

⁵¹ <http://www.wpc.ncep.noaa.gov/qpf/day1-7.shtml>. Revisado en Octubre, 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

2.3.10 Perspectivas mensuales y trimensuales oficiales del CPC de Temperatura y Precipitación.

Las perspectivas de precipitación y temperatura, es tal vez, la herramienta con mayor peso sobre las perspectivas de sequía, esta se compone de una metodología muy variable y vasta ya que depende del grupo de trabajo de los pronosticadores. Estos mapas representan al igual que el pronóstico de 6 a 10 días y de 8 a 14 días, la probabilidad de obtener condiciones por arriba (por debajo) de las condiciones normales de temperatura, y las condiciones más húmedas o secas de precipitación. Las figuras 3.24 y 3.25 representan estos mapas para el contorno de EUA donde del mapa de temperatura (izquierda) se proponen en tonos rojos condiciones de temperaturas más altas y en tonos azules temperaturas por debajo de lo normal y el de precipitación (derecha) muestra en tonos verdes condiciones más húmedas y en tonos marrón condiciones más secas de lo normal, el CPC pone a disposición las perspectivas para un mes y trimensuales desde medio mes hasta 12 meses.

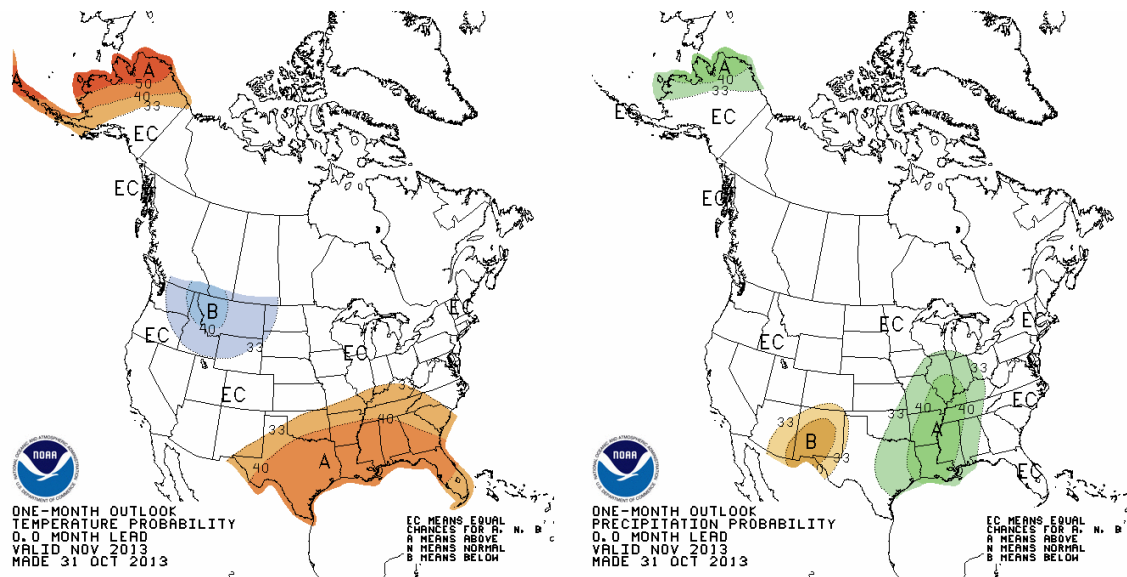


Figura 3. 24 Perspectivas mensuales probabilísticas de temperatura (izquierda) y precipitación (derecha) oficiales del CPC para el mes de noviembre.⁵²

⁵² <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/30day/> Revisado en Noviembre 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

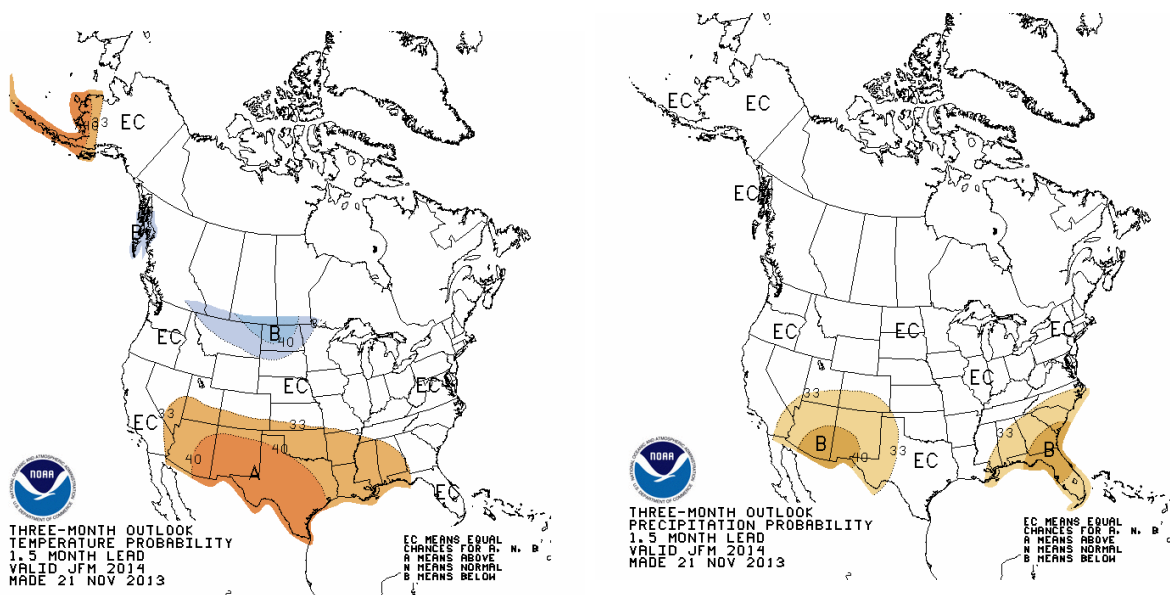


Figura 3. 25 Perspectivas trimensuales probabilísticas de temperatura (izquierda) y precipitación (derecha) oficiales del CPC para el trimestre de Enero-Febrero-Marzo, EFM 2014, para mes y medio de perspectiva.⁵³

De acuerdo con la discusión de la perspectiva mensual y estacional enumera que los principales factores y herramientas utilizadas son:⁵⁴

- I) Las condiciones actuales del ENSO, debido en sus patrones de relación en la precipitación, presentado en apartado anterior.**
- II) Los mejores ajustes de tendencias de los últimos 10 años en temperatura y para 15 años de precipitación, al analizar su comportamiento en cuanto a tendencias de manera espacial y temporal.**
- III) La oscilación Madden-Julian, presentado en apartado anterior.**
- IV) Patrones de teleconexión: OA, NAO y PNA (Descripción)**

La oscilación del Ártico (AO, por sus siglas en inglés), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés), patrón del Pacífico de Norte América (PNA, por sus siglas en inglés) son indicadores en relación a patrones espaciales temporales encontrados por técnicas estadísticas que son utilizados como

⁵³ <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/90day/> _ Revisado en Diciembre 2013.

⁵⁴ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/long_range/fxus07.html Revisado en Noviembre 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

auxiliares, a continuación se presentan sus condiciones actuales así como su patrón de relación con EUA de acuerdo al área de patrones de teleconexiones del CPC.

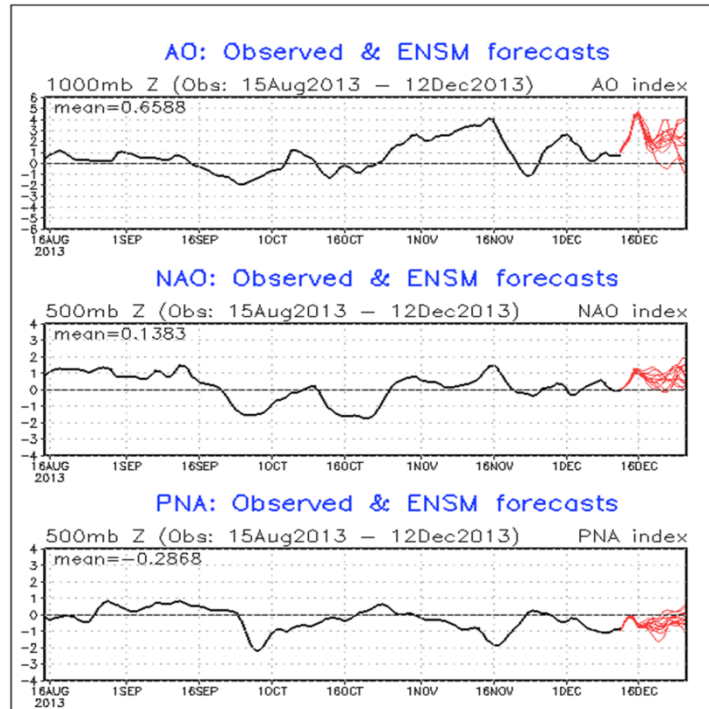


Figura 3. 26 Indicadores del OA, NAO y PNA y su pronóstico de acuerdo a modelos de ensamble.⁵⁵

Así los indicadores diferentes relaciones en la precipitación y temperatura aquí se hace mención de dos, la NAO en la que se muestra en la figura 3.27, su correlación encontrada para cuatro meses del año para la precipitación (izquierda) y temperatura (derecha). La figura 3.28 representa lo mismo pero para el patrón PNA.

⁵⁵ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/teleconnections.shtml

Revisado en Noviembre, 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

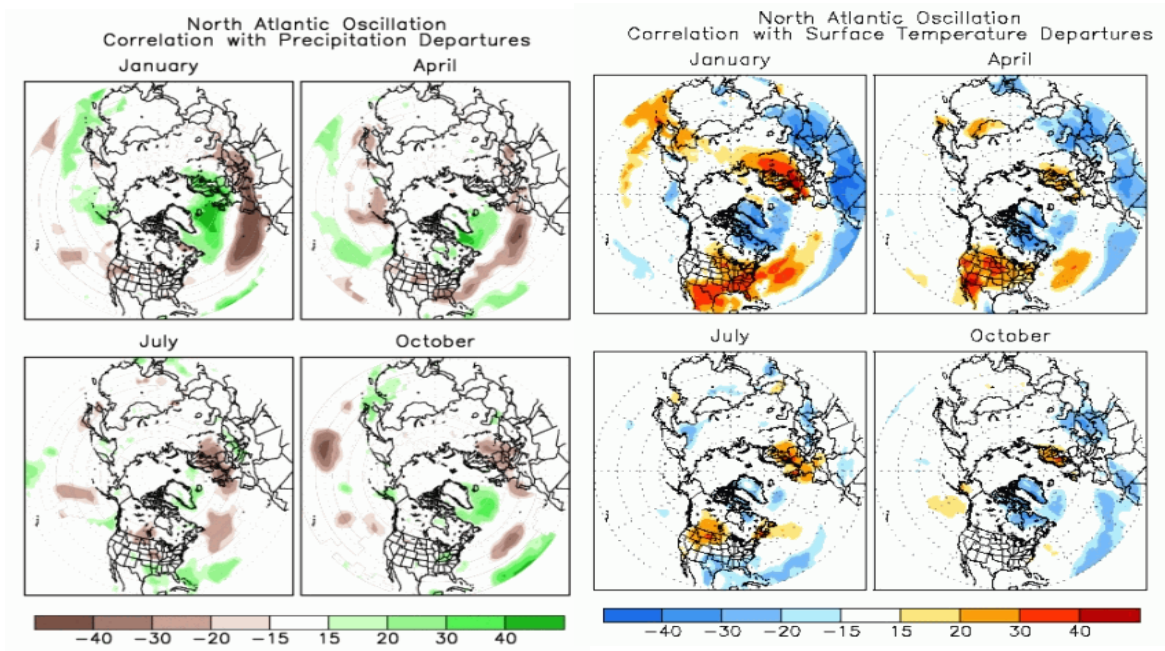


Figura 3. 27 Correlación entre la NAO, precipitación (derecha) y Temperatura (izquierda).⁵⁶

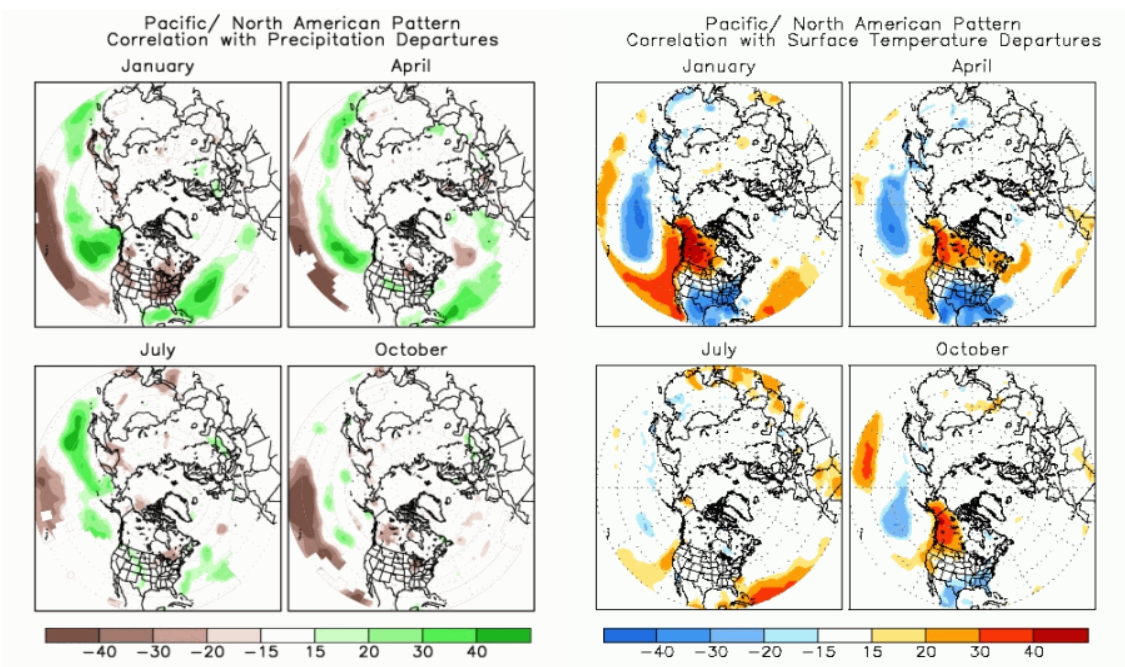


Figura 3. 28 Correlación entre el patrón PNA, precipitación (derecha) y Temperatura (izquierda).⁵⁷

⁵⁶ <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml>, Revisado en Noviembre 2013.

⁵⁷ <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/pna.shtml>, Revisado en Noviembre 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

V) La Oscilación Decadal del Pacífico

La Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) es un patrón de variabilidad del clima del Pacífico similar a ENSO en carácter, pero que varía en una escala de tiempo mucho más largo. El PDO puede permanecer en la misma fase de 20 a 30 años, mientras que los ciclos ENSO normalmente sólo duran de 6 a 18 meses. La PDO, como ENSO, se compone de una fase cálida y fría que altera los vientos atmosféricos de nivel superior. Los cambios en la fase de PDO pueden tener importantes consecuencias para el clima global, que afecta el Pacífico y la actividad de huracanes en el Atlántico, las sequías y las inundaciones en la cuenca del Pacífico, la productividad de los ecosistemas marinos, y los patrones globales de la temperatura del suelo. Los expertos también creen que el PDO puede intensificar o disminuir los efectos del ENSO en función de su fase. Si tanto ENSO y la PDO se encuentran en la misma fase, se cree que los impactos El Niño / La Niña pueden ser magnificados. Por el contrario, si ENSO y la PDO están fuera de fase, se ha propuesto que puedan compensarse entre sí, evitando que se produzcan "verdaderos" impactos de ENSO, obtenido de nc-climate.ncsu.edu⁵⁸.

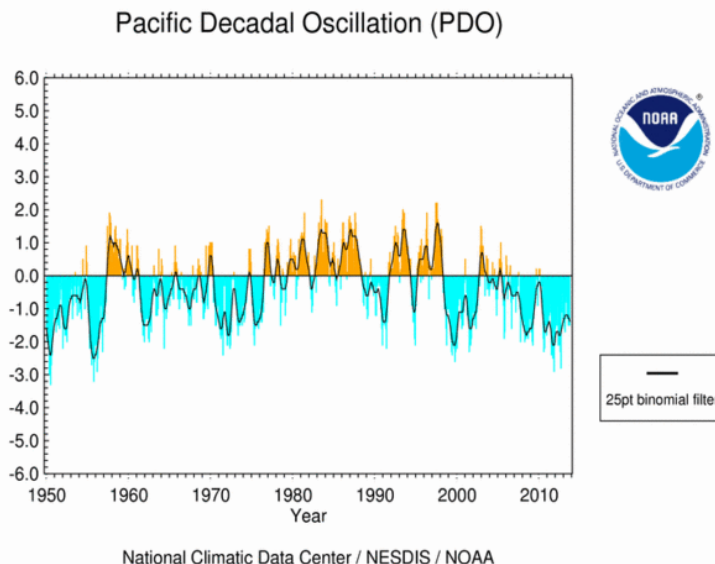


Figura 3. 29 Serie de tiempo de la Oscilación Década del Pacífico, que muestra una fase negativa en la actualidad.⁵⁹

⁵⁸ <http://www.nc-climate.ncsu.edu/climate/patterns/PDO.html>, Revisado en Noviembre 2013.

⁵⁹ <http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/cmb/teleconnections/pdo-f-pg.gif>, Revisado en Noviembre 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

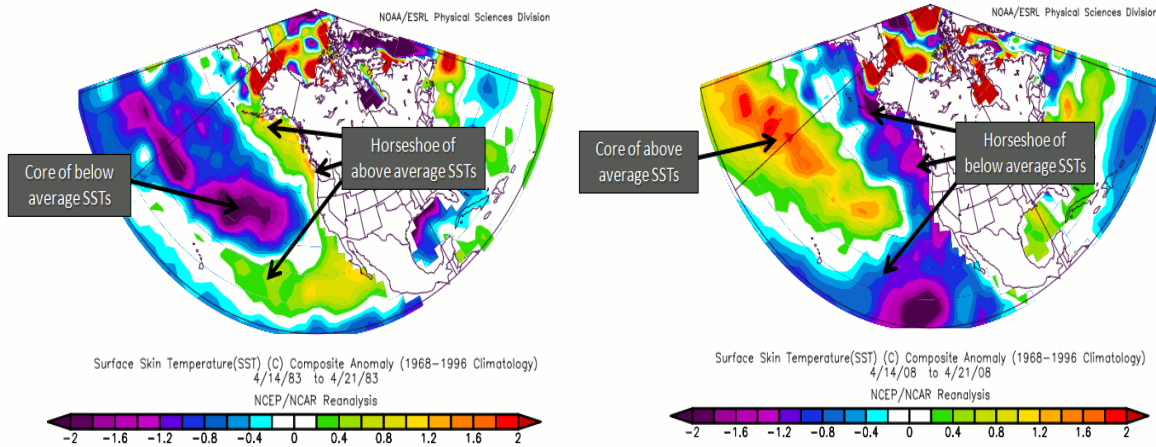


Figura 3. 30 Representación de los patrones de las fases positiva (izquierda) y negativa (derecha) de la PDO.⁶⁰

VI) La persistencia de suelos húmedos o secos en la primavera y verano, anomalías de nieve y cubierta de hielo en el invierno, siendo estos factores tienden a persistir por largos períodos y actuar como un tipo de la memoria en el sistema climático.⁶¹

VII) Modelos estadísticos:

Análisis de correlación canónica (CCA, por sus siglas en inglés), es un análisis lineal que predice la evolución de patrones de temperatura y precipitación basados en patrones globales de temperatura superficial del mar y altura geopotencial de 700 hPa y los datos de temperatura y precipitación de EUA, el CCA toma los efectos del ENSO y de otros modos de baja frecuencia como el NAO.

El CPC genera productos estacionales por el método de CCA para los siguientes doce meses, la figura 3.31 muestra la perspectiva estacional de temperatura (izquierda) y precipitación (derecha) en el periodo trimestral de noviembre, diciembre del 2013 y enero del 2014, estos campos son previstos para medio mes, pero existen las perspectivas hasta los 12 meses de previsión

⁶⁰ <http://www.nc-climate.ncsu.edu/climate/patterns/PDO.html>, Revisado en Noviembre 2013.

⁶¹ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/long_range/fxus07.html, Revisado en Noviembre 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

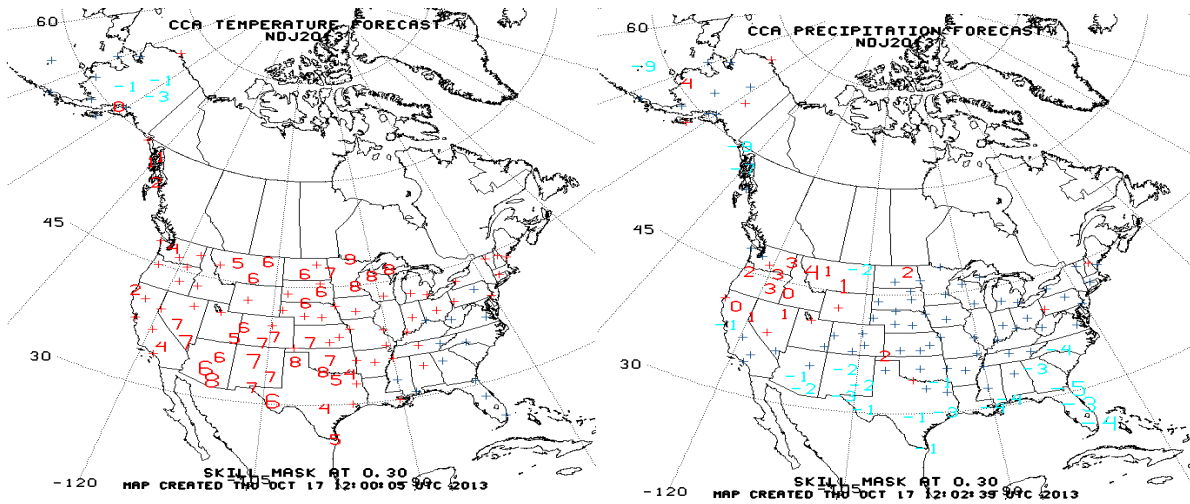


Figura 3. 31 Perspectiva estacional obtenida con CCA por el CPC para el periodo Noviembre-Diciembre-Enero.⁶²

Regresión lineal de la humedad del suelo (SMLR, por sus siglas en ingles), es una herramienta de regresión lineal que utiliza el pronóstico de la humedad del suelo como predictor para la generación de la perspectiva de temperatura y precipitación mensual. El procedimiento utiliza los mismos campos predictores que para el CCA, pero se aplica a estaciones individuales en lugar de patrones de anomalías múltiples. También cuenta con previsiones trimensuales a 12 meses.

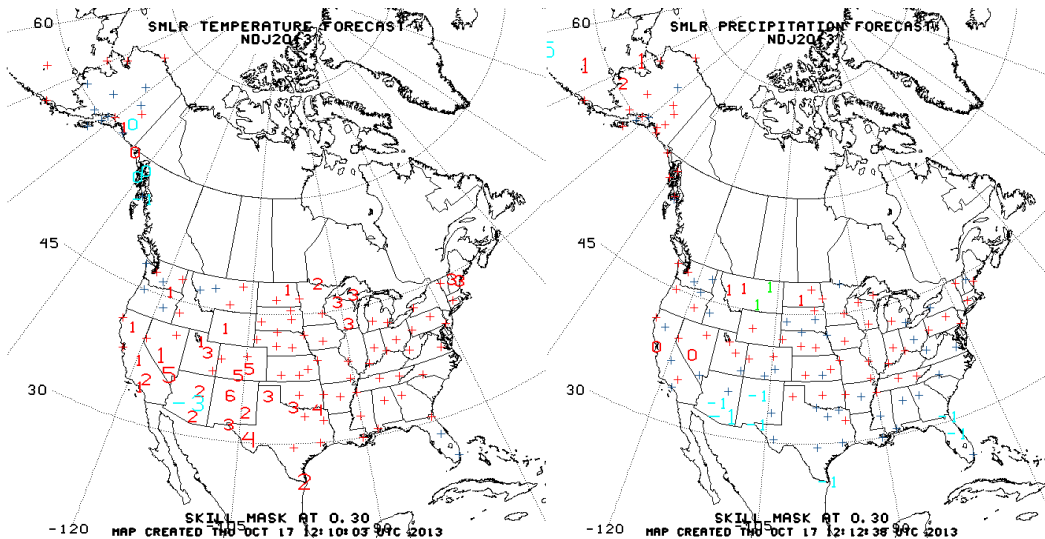


Figura 3. 32 Perspectiva estacional obtenida con SMLR por el CPC para el periodo Noviembre-Diciembre-Enero.⁶³

⁶² http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/long_range/cca.php?lead=1, Revisado en Noviembre 2013.

⁶³ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/long_range/smt.php?lead=1, Revisado en Noviembre 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

Ensamble de Análisis de Correlación Canónica (ECCA), utiliza la metodología del CCA con predicción lineal de la temperatura y la precipitación, maximizando la correlación entre las variables dependientes e independientes, utilizando datos que desde 1953. El ensamble se crea haciendo pronósticos, utilizando predictores pronosticados, los predictores utilizados son la velocidad potencial Global a 200 hPa, las temperaturas de la superficie del mar globales, la presión a nivel del mar y datos de humedad del suelo de EUA.

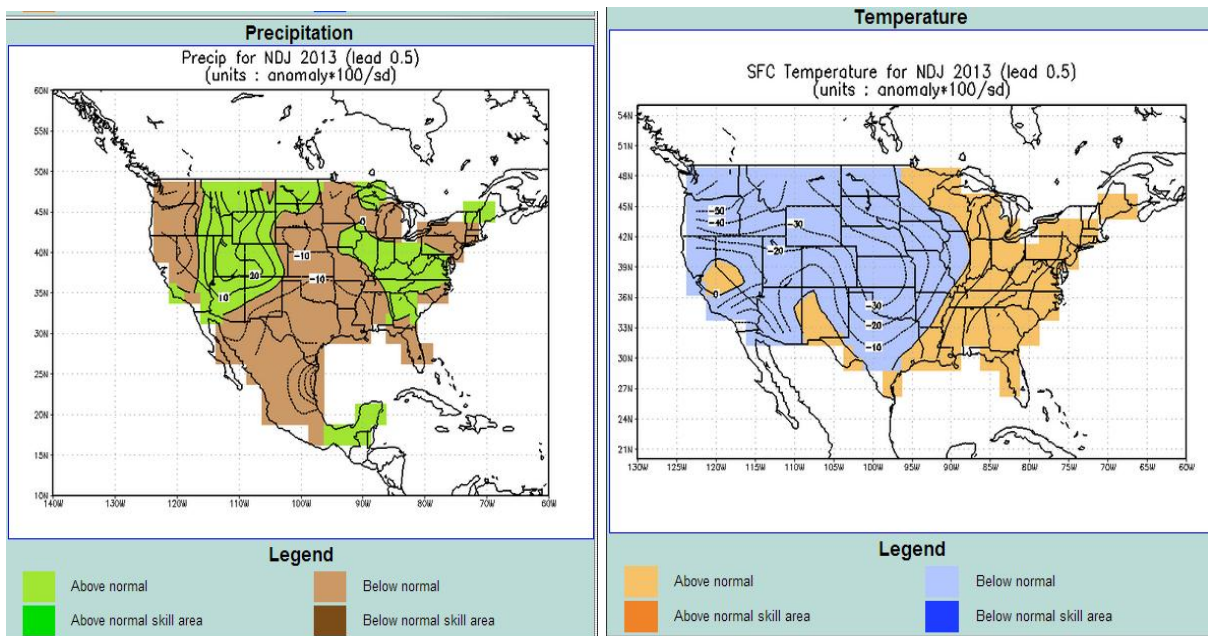


Figura 3. 33 Perspectiva estacional obtenida con SMLR por el CPC para el periodo Noviembre-Diciembre-Enero.⁶⁴

VII) Modelos dinámicos: el CFSv2, el GEFS, el NMME. Presentados en apartados anteriores.

⁶⁴ http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/long_range/ecca.php?lead=1 Revisado en Noviembre 2013.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

3.2.11 Generación de la perspectiva mensual y estacional.

Finalmente los productos clave o los de mayor peso para la generación de la perspectiva de la sequía tienden a ser las condiciones iniciales, y los pronósticos oficiales mensuales de temperatura y precipitación, en ausencia de fenómenos extremos y condiciones del ENSO. La figura 3.34 muestra el monitor de sequía, la perspectiva de sequía mensual y las perspectivas de precipitación y temperatura.

En este caso se muestra como las condiciones de sequía mayor a D1 se encuentran delimitado por los tonos marrón de la perspectiva de la sequía y como el área con probabilidad de disminuir o disiparse la sequía coincide con el área representada como precipitación por arriba de lo normal de acuerdo con la perspectiva mensual de precipitación y el área de desarrollo de sequía mostrado como D0 puede ser posible a anomalías positivas de temperatura mostrado en la perspectiva mensual de temperatura y posiblemente de otros factores que no se analizaron en este análisis.

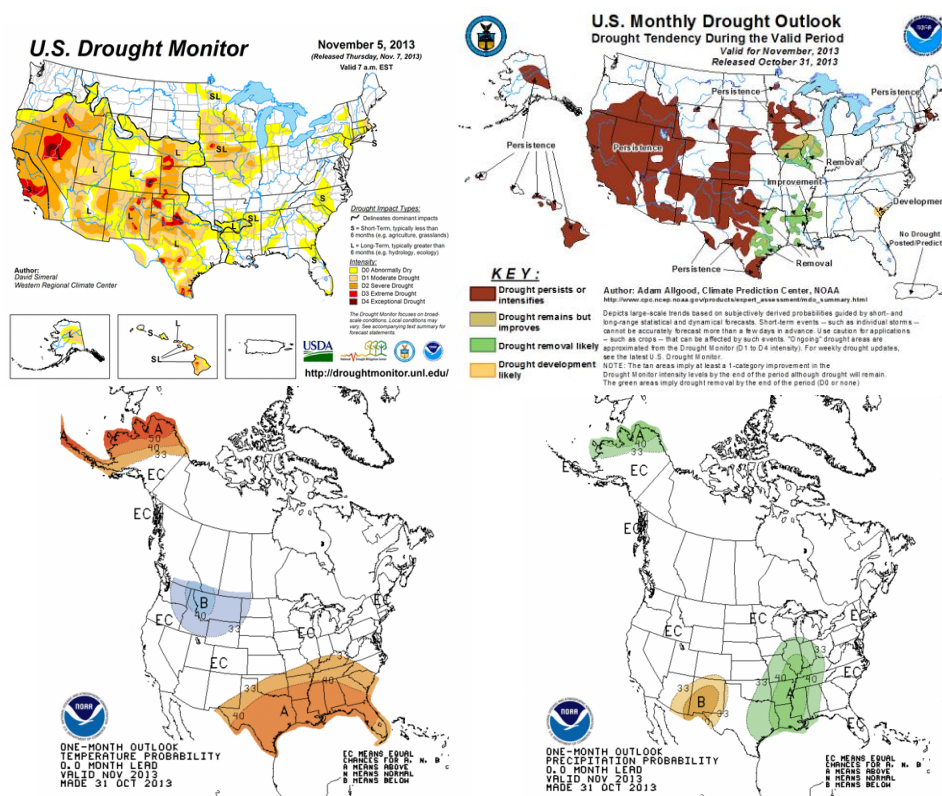


Figura 3. 34 Monitor de sequía a finales de octubre, perspectiva de sequía mensual y las perspectivas de precipitación y temperatura, para el mes de noviembre 2013.

La figura 3.35 muestra el monitor de sequía, la perspectiva de sequía estacional y las perspectivas de precipitación y temperatura correspondientes a los meses de DEF, EFM y FMA.

En este caso se muestra como las condiciones de sequía mayor a D1 se encuentran delimitado por los tonos marrón de la perspectiva de la sequía y como el área con probabilidad de disminuir o disiparse la sequía coincide con el área representada como precipitación por arriba de lo normal y temperatura en condiciones normales de acuerdo con la perspectiva trimensual DEF. También es previsto el desarrollo de la sequía en condiciones D0 con lo mostrado con las perspectivas de precipitación que se encuentra condiciones por debajo de lo normal, principalmente en la costa sureste y la región sur de EUA, también la perspectiva de temperatura trimensual muestra para las mismas regiones condiciones de temperatura por arriba de lo normal, favoreciendo el establecimiento de sequía.

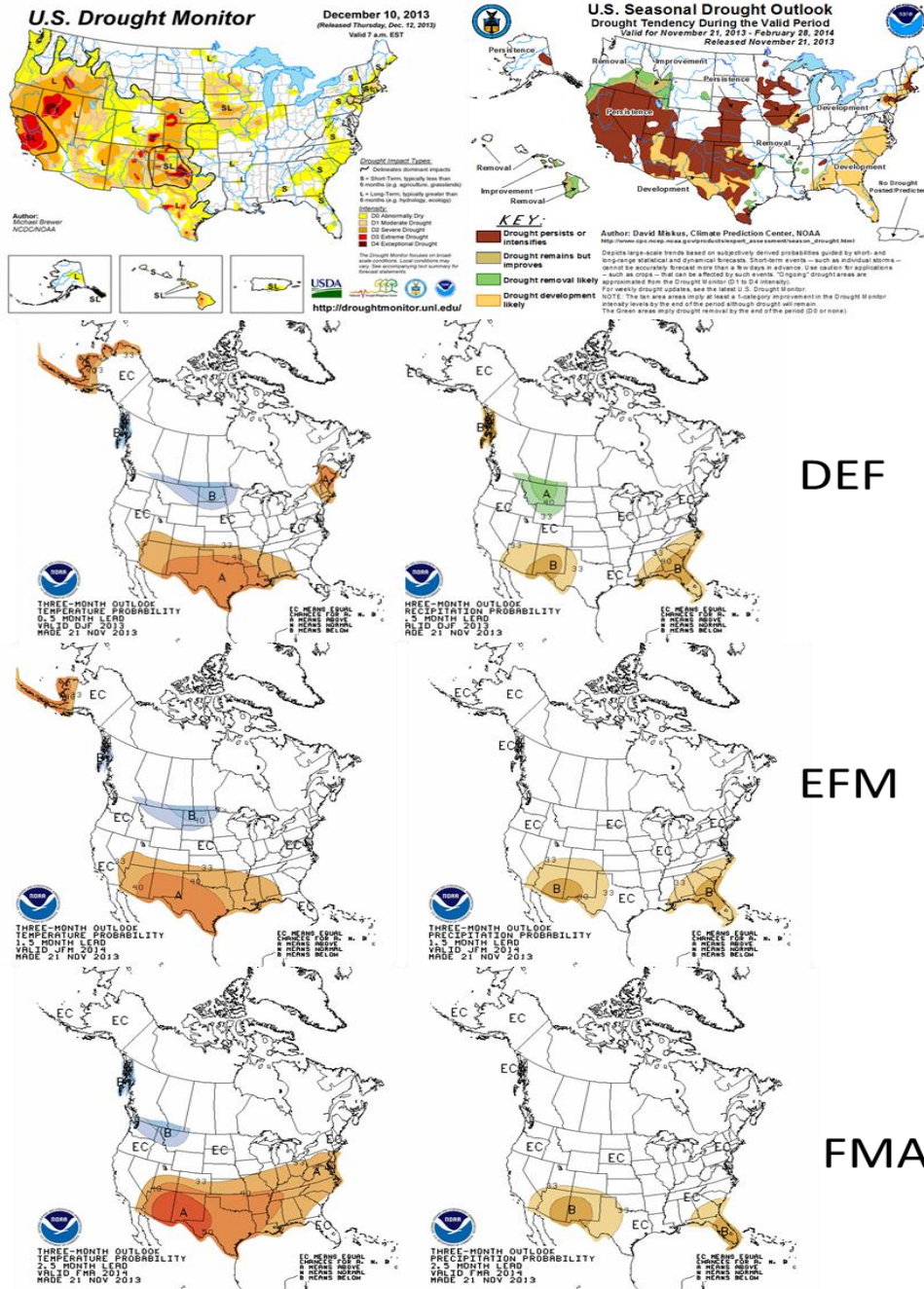


Figura 3. 35 Monitor de sequía para el 10 de diciembre del 2013, perspectiva de sequía estacional y las perspectivas trimensuales de precipitación y temperatura, para los trimestres de DEF, EFM y FMA del siguiente año.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

3.2.12 Verificación de la perspectiva de sequía

El presente apartado es para mostrar el esquema de verificación que empleo en años pasados el CPC, ya que actualmente la unidad encargada de generar la perspectiva de la sequía no se ha elaborado la verificación correspondiente de acuerdo a las salidas mensuales y estacionales. Debido a que depende fuertemente de las perspectivas oficiales de temperatura y precipitación mensual y estacional el CPC se ha enfocado más a la verificación de estos apartados.

Las secciones de verificación se encuentran desactualizadas se encuentran en conjunto con la discusión en texto y las imágenes oficiales de la perspectiva mensual y estacional. La perspectiva estacional se encuentra disponible desde el 2004 a la fecha y la perspectiva mensual se encuentra disponible desde julio del 2013 a la fecha. La última salida de la verificación de la perspectiva estacional disponible es de febrero – abril del 2010.

Las ligas de los archivos de verificación son las siguientes:

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/expert_assessment/sdo_archive/

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/expert_assessment/mdo_archive/

Se utilizó como ejemplo la verificación con salida del 21 de enero del 2010, para la perspectiva de sequía para los meses de Febrero-Marzo-Abril (FMA), se muestra en la figura 3.36 en la esquina superior izquierda el monitor de sequía con fecha del 19 de enero del 2010, en la parte superior derecha se encuentra la perspectiva estacional, entre el monitor y la perspectiva estacional se observa que se esperaba que mejoraran las condiciones de sequía en la región sur y occidente, y la intensificación de la sequía en la región noroeste. De la figura 3.36 parte inferior derecha se muestra el monitor de sequía para el 27 de abril del 2010 y de la figura la parte inferior izquierda se presenta una combinación de imágenes entre la perspectiva estacional y el monitor de sequía para el 27 de abril, el cual muestra las regiones en las que fue acertado la perspectiva estacional presentada para el trimestre FMA. Artusa et al 2012⁶⁵, presenta una forma de verificación, así como un resumen de las herramientas utilizadas para la generación de la perspectiva de sequía estacional y mensual del CPC.

Desde inicios del año 2013 el CPC pone a disposición las perspectivas de la sequía en formato “*Shapefile*” utilizado en sistemas de información geográfica, encontrados en la siguiente dirección:

⁶⁵ Artusa, A., B. Pugh, A. Allgood, R. Thinker and D. Miskus (2012). Current and Future Applications of Tools for U.S. Seasonal Drought Outlook. *En: 37th Climate Diagnostics & Prediction Workshop (Ft. Collins Colorado, October 25, 2012). Hilton Fort Collins. 38 slide.*
http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/outreach/proceedings/cdw37_proceedings/AArtusa.pdf

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

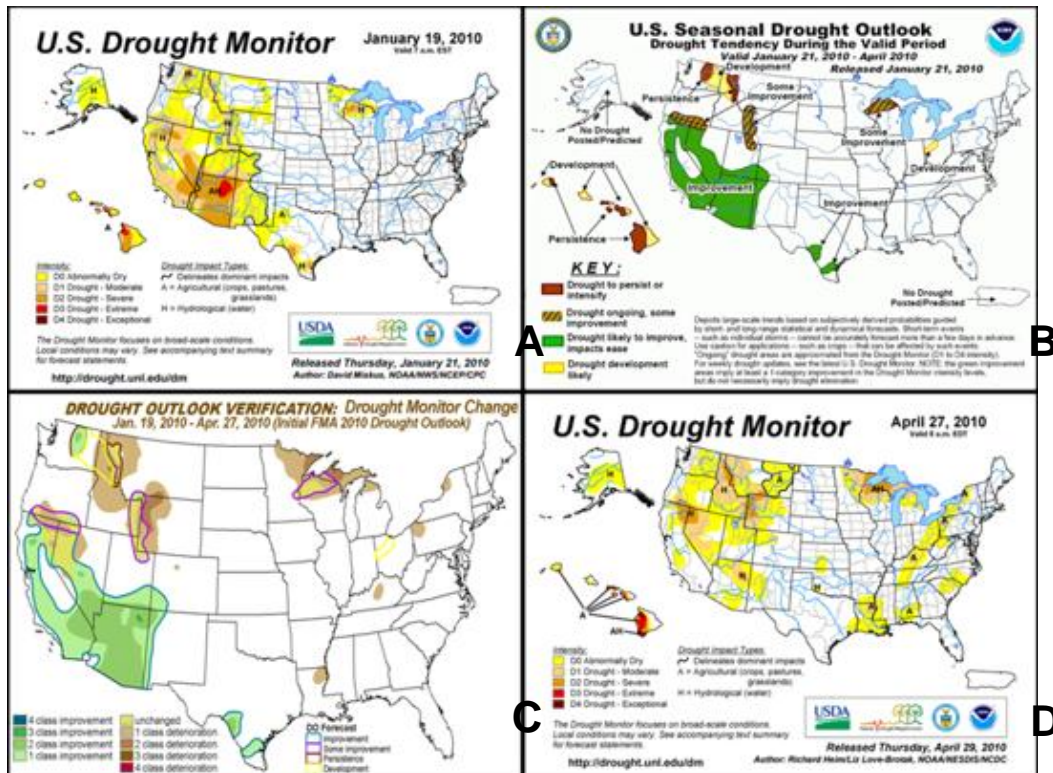


Figura 3. 36 Verificación de la perspectiva de la sequía de EUA imagen compuesta. “A” el monitor de sequía de EUA del 19 de enero del 2010. “B” Perspectiva estacional del periodo FMA. “C” imagen de verificación obtenida a partir de la Perspectiva estacional del periodo FMA. “C” imagen de verificación obtenida a partir de la perspectiva estacional FMA y el y el monitor de sequía con fecha del 27 de abril del 2010. “D” monitor de sequía de EUA del 27 de abril del 2010.

4. Validación del modelo CFS y generación de pronóstico estacional.

Los objetivos principales:

- a) Validar el modelo CFS para el periodo julio 2012 a julio 2013 para México.
- b) Generar productos gráficos para México de las condiciones futuras a 9 meses de temperatura mínima, máxima y precipitación con datos del modelo Sistema de predicción climática (CFS, por sus siglas en ingles).

4.1 Metodología

Como se mencionó anteriormente en el presente trabajo se utilizaron las simulaciones del CFS para generar un pronóstico climático a 9 meses, por tal motivo es importante conocer las características principales de dicho modelo y entender cómo están estructuradas sus simulaciones lo cual se describe en la sección 3.1. Posteriormente, dada la importancia de conocer el desempeño del CFS para México se realizó una validación del modelo (sección 3.4) utilizando como datos observados los de ERA-Interim (sección 3.2), debido a que no hay suficientes datos climáticos en la República Mexicana. Sin embargo considerando que las dos bases de datos (CFS y ERA-Interim) tienen diferentes atributos y características se tuvieron que homogeneizar, lo cual se describe en la sección 3.3. Finalmente se realizó un pronóstico estacional de diciembre 2013 a agosto 2014, ver sección 3.5. En general las actividades desarrolladas fueron las siguientes:

- a) Conocer las simulaciones del modelo CFS (sección 3.1).
- b) Cálculo de un ensamble quincenal y mensual de datos diarios (sección 3.1).
- c) Descripción de ERA-Interim (sección 3.2).
- d) Descarga de datos de ERA-Interim (sección 3.2.1).
- e) Procesamiento de los datos de ERA-Interim (sección 3.2.2).

- f) Homogeneizar las bases de datos CFS y ERA-Interim, es decir, que ambas bases de datos tengan la misma malla, las mismas unidades, etc. (descrito con más detalle en la sección 3.3).
- g) Validación Modelo CFS (sección 3.4) tanto cualitativa (subsección 3.4.1) como cuantitativamente (subsección 3.4.2).
- h) Generar un pronóstico estacional para los próximos 9 meses (sección 3.5)

Para facilitar la comparación del CFS con ERA-Interim se escogieron tres regiones del país, una en la parte monzónica (en el noroeste), otra en la región centro (con grandes variaciones de topografía) y la región sur (con una alta precipitación en el verano), ver figura 4.1. Estas zonas fueron utilizadas tanto para graficar las medias mensuales como para graficar el MAE.

Para facilitar la comparación del CFS con ERA-Interim se escogieron tres regiones del país, una en la parte monzónica (en el noroeste), otra en la región centro (con grandes variaciones de topografía) y la región sur (con una alta precipitación en el verano), ver figura 4.1. Estas zonas fueron utilizadas tanto para graficar las medias mensuales como para graficar el MAE.

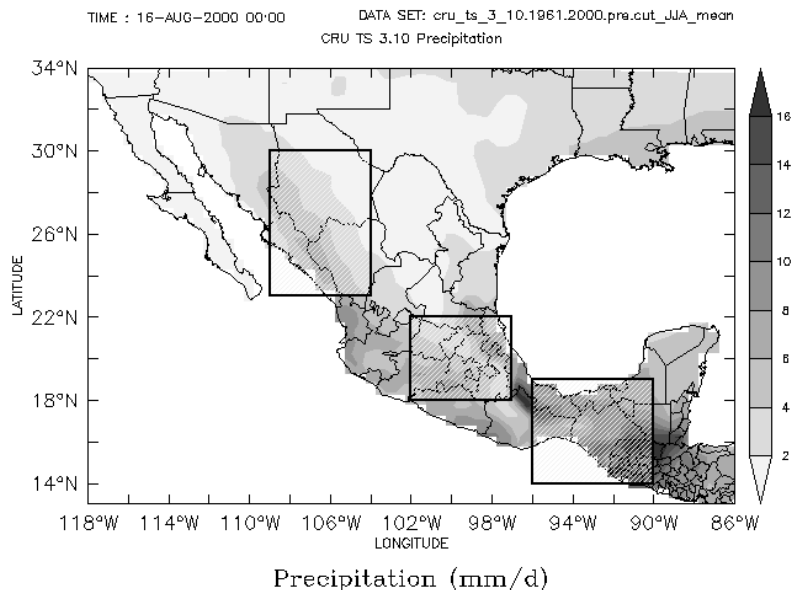


Figura 4. 1 Regiones utilizadas para el análisis: norte, centro y sur. Mapa del fondo, precipitación media de agosto con datos del CRU periodo 1961-2000.

4.2 Descripción del Modelo climático CFS.

El CFS versión 2 es un modelo de circulación general acoplado atmosfera-océano, que fue desarrollado por NCEP, y es operacional desde el 2004, desde entonces ha sido mejorado (Saha, *et al.* 2011). Las tres grandes mejoras en el sistema de pronóstico respecto a sus versiones anteriores son:

- Actualización de modelos: El modelo oceánico MOM1 se reemplazó por el MOM3 y el modelo atmosférico SFM se reemplazado por una versión de resolución más burda del modelo GFS (Este cambio incluye una actualización en la resolución vertical del SFM de 28 a 64 capas sigma con el GFS).
- Acoplamiento de modelos océano-atmósfera. El acoplamiento océano-atmósfera es casi global (desde 64°N a 74°S), en vez de hacerse únicamente en el océano pacífico tropical y sin aplicarse ninguna corrección de flujo.
- Datos históricos. Se generó un conjunto de pronósticos retrospectivos para cubrir un periodo de 24 años (1981-2004), prescribiendo una temperatura superficial del mar, para obtener un histórico del modelo y usarse para calibrar y establecer la habilidad del modelo en el pronóstico de tiempo real.

Las primeras dos mejoras incluyen varios avances en la física y un mejor sistema acoplado, tanto en corridas multidecadales como pronósticos a 9 meses a partir de muchas condiciones iniciales (*Wang et. al 2005*). En la tercera mejora, referente a pronósticos retrospectivos implicaron costos en términos computacionales, estos pronósticos son muy importantes debido a que suministran herramientas para poder analizar la habilidad del modelo para el usuario de estos pronósticos.

El CFS es un modelo capaz de representar las interacciones entre los océanos, el suelo y la atmósfera de la tierra que determinan el clima. Como se mencionó anteriormente la componente atmosférica del modelo CFS es el modelo atmosférico GFS del Centro Nacional de Estados Unidos para la Predicción Ambiental (NCEP), versión de febrero del 2003. Dicha versión del GFS actualizó en ese año las parametrizaciones de la transferencia de la radiación solar, difusión

vertical en la capa límite, convección de cúmulos y arrastre de ondas de gravedad (Saha, *et al.* 2011).

Por otro lado la componente oceánica del modelo CFS es el modelo oceánico MOM 3 (Modular Oceánico versión 3) del laboratorio de dinámica de fluidos geofísicos (*Pacanowsky y Griffies 1998*), el cual es una versión con diferencias finitas de las ecuaciones con las aproximaciones hidrostáticas y de Boussinesq. Utiliza coordenadas esféricas en la horizontal con una malla escalonada de Arakawa tipo B y la coordenada z en la vertical, la frontera en superficie del océano es calculada de una superficie libre explícita; con un dominio casi global extendiéndose de 70°S a 64°N, su resolución horizontal es de 1°, la resolución meridional es de 1/3° entre 10°S y 10°N, incrementándose gradualmente a través de los trópicos hasta ajustarse a 1° hacia los polos (Saha, *et al.* 2011).

Además de las componentes oceánica (MOM3) y atmosférica (GFS), el CFS también tiene el modelo de la superficie terrestre, NOAH (con 4 capas) y un modelo interactivo de 3 capas mar-hielo.

El modelo CFS emite simulaciones para varios periodos de tiempo (45 días, 9 meses), de la página <http://cfs.ncep.noaa.gov>. Para estas simulaciones se encuentran disponibles una amplia gama de variables, clasificadas en 4 grupos: FLXF (flujos superficiales: superficie, forzamientos radiativos, etc.), PGBF (datos en niveles de presión), OCN (datos oceánicos) y IPVF (datos en niveles isotrópicos). Para el desarrollo de éste reporte se utilizó el grupo FLXF, que es donde se encuentra la razón de precipitación.

Después de seleccionar un grupo de datos a descargar se procede a escoger la resolución temporal que se desee, en este trabajo se escogió cada 6 horas, con los cuales se calcularon promedios diarios. Diariamente están disponibles simulaciones a las 00UTC, 06 UTC, 12 UTC y 18Z UTC.

4.2.1 Estructura de las simulaciones.

Para emitir un pronóstico del mes de octubre, por ejemplo, se descargan los datos diariamente con sus cuatro realizaciones y para cada realización se calcula un promedio simple diario y posteriormente un ensamble mensual. Finalmente quedan 4 archivos (con promedios mensuales o diarios), uno para cada realización, con los cuales se calcula un promedio simple de éstos. Y este último

ensamble (mensual o diario) es el que se utiliza para emitir las proyecciones estacionales (ver fig.2). Este procedimiento se hace tanto de manera mensual como quincenal. Cabe mencionar que el procesado de las simulaciones del modelo se realizó en un trabajo previo de Rojas y Colorado (2012).

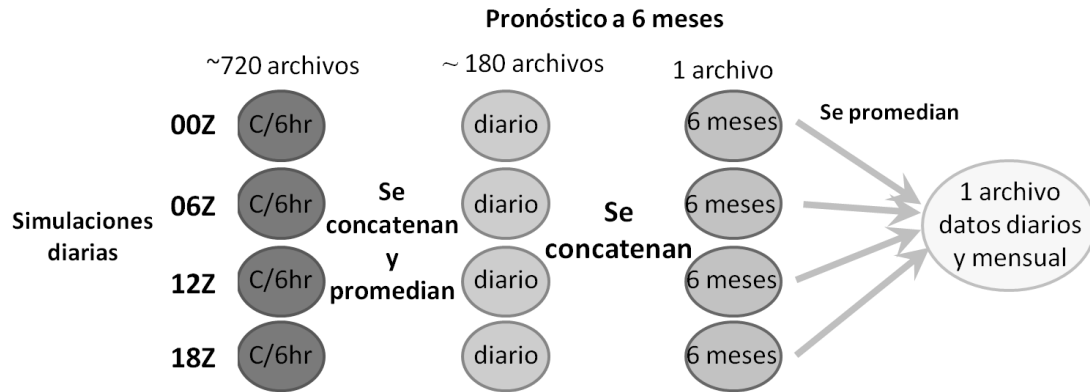


Figura 4. 2 Esquema para realizar pronóstico a 6 meses.

En el IMTA se comenzaron a descargar las simulaciones del modelo CFS en junio 2012, y se han descargado continuamente hasta la fecha. Por lo que en el presente trabajo se tomarán dichas simulaciones y se validarán para ese periodo con datos de ERA-Interim.

4.3 Descripción de ERA-Interim

ERA-Interim es un re-análisis “provisional” del periodo 1979 a la actualidad en la preparación para el re-análisis extendido de la próxima generación para reemplazar ERA-40. Ambas fueron desarrolladas por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas (ECMWF), que es una organización intergubernamental con el apoyo de 34 estados, con sede en el Reino Unido (ERA-Interim, 2013)

El Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas ha producido también tres nuevos análisis importantes: FGGE, ERA-15(ECMWF boletín no. 73) y ERA-40 (ECMWF boletín no.101), y ERA-Interim (boletín no. 110), el penúltimo de ellos consistió en un conjunto de análisis globales que describen el estado de la atmósfera y las condiciones de la tierra y de la onda del océano desde mediados de 1957 hasta mediados de 2002.

ERA (re-análisis ECMWF) proporciona estimaciones consistentes del estado de la atmósfera generada usando una versión fija, de menor resolución de 4DVAR (análisis variacional de cuatro dimensiones) para las últimas décadas. El último producto de ERA: ERA-Interim abarca el período comprendido desde 1979 y continúa en el tiempo real para apoyar la vigilancia del clima.

Los datos de ERA-Interim se actualizan una vez al mes, lo que permite un retraso de dos meses para el aseguramiento de la calidad y de la corrección de los problemas técnicos de la producción. Existen productos diarios desde el 1 de enero de 1979. Los archivos ERA-Interim son más extensos que los ERA-40, esto, debido a que el número de niveles de presión se aumenta desde 23 hasta 37. Sin embargo en el presente trabajo se utilizarán datos en superficie.

La asimilación de datos ERA-Interim y suites pronóstico produce: Cuatro análisis por día, con 00, 06, 12 y 18 UTC; y dos predicciones a 10 días al día, inicializados de los análisis a las 00 y 12 UTC.

4.3.1 Descarga de datos de ERA-Interim

Para descargar los datos de ERA-Interim, se ingresa a la página: http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/, donde el primer paso a realizar es el registro para poder descargar los datos, enseguida se procede a la selección de variables, tiempo, pasos, etc.

Existen datos disponibles con diferentes niveles en la vertical: de temperatura potencial, vorticidad potencial, de precipitación y superficiales. También se encuentran disponibles en diferentes campos: Diario, invariantes, medias mensuales sinópticas y medias mensuales de medias diarias. Posteriormente se selecciona el periodo de tiempo que se quieren descargar, que en nuestro caso fueron datos en superficie, diarios y para el periodo de junio 2012 a junio 2013 (ver figura 4.3).

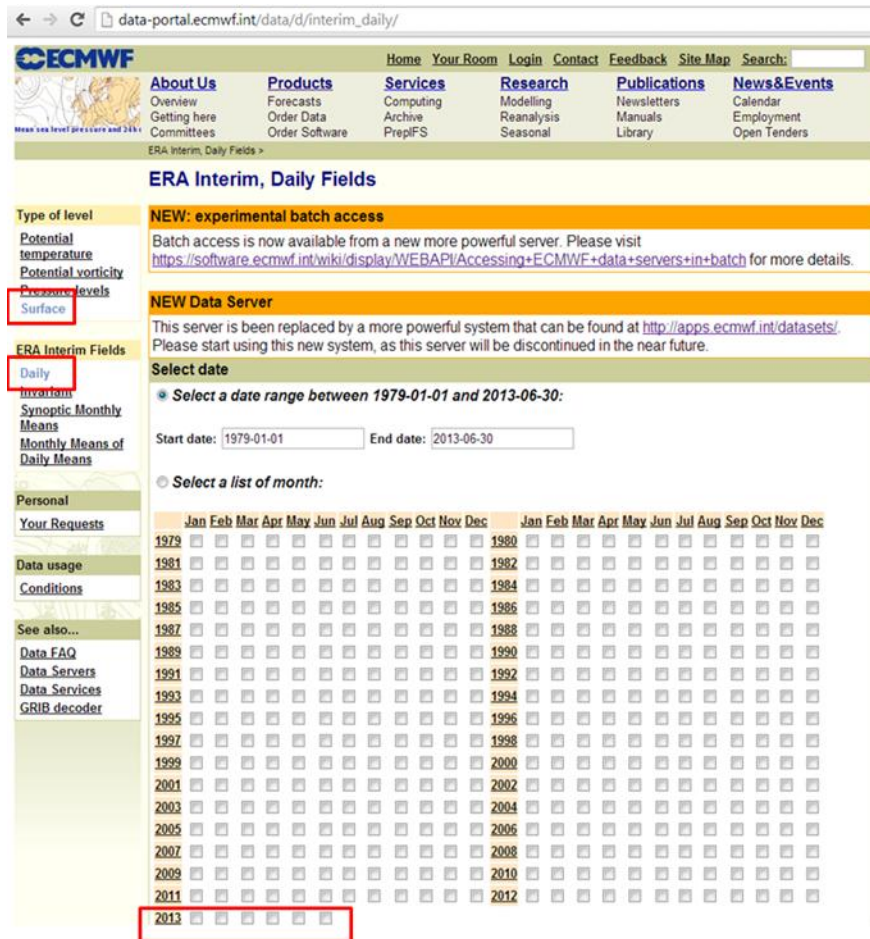


Figura 4.3 Selección de nivel, tipo de archivo, y meses y años para descargar archivos.

Después de seleccionar lo anterior aparece otro menú (figura 4.4) en donde se despliegan diferentes tiempos a los que se ejecutó el modelo (00, 06, 12 y/o 18 UTC), los pasos de tiempo (0, 3, 4, 9, 12), y las variables disponibles. Nosotros escogimos dos ejecuciones del modelos 00, para el paso de tiempo 03 y para la variable de “total precipitation”.

data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/

Select Time

00:00:00 06:00:00 12:00:00 18:00:00

[Select All](#) or [Clear](#)

Select Step

0 3 6 9 12

[Select All](#) or [Clear](#)

Select parameters

<input type="checkbox"/> 10 metre U wind component	<input type="checkbox"/> 10 metre V wind component
<input type="checkbox"/> 10 metre wind gust since previous post-processing	<input type="checkbox"/> 2 metre dewpoint temperature
<input type="checkbox"/> 2 metre temperature	<input type="checkbox"/> Albedo
<input type="checkbox"/> Boundary layer dissipation	<input type="checkbox"/> Boundary layer height
<input type="checkbox"/> Charnock	<input type="checkbox"/> Clear sky surface photosynthetically active radiation
<input type="checkbox"/> Convective available potential energy	<input type="checkbox"/> Convective precipitation
<input type="checkbox"/> Convective snowfall	<input type="checkbox"/> Downward UV radiation at the surface
<input type="checkbox"/> Eastward gravity wave surface stress	<input type="checkbox"/> Eastward turbulent surface stress
<input type="checkbox"/> Evaporation	<input type="checkbox"/> Forecast albedo
<input type="checkbox"/> Forecast logarithm of surface roughness for heat	<input type="checkbox"/> Forecast surface roughness
<input type="checkbox"/> Gravity wave dissipation	<input type="checkbox"/> High cloud cover
<input type="checkbox"/> Ice temperature layer 1	<input type="checkbox"/> Ice temperature layer 2
<input type="checkbox"/> Ice temperature layer 3	<input type="checkbox"/> Ice temperature layer 4
<input type="checkbox"/> Instantaneous eastward turbulent surface stress	<input type="checkbox"/> Instantaneous moisture flux
<input type="checkbox"/> Instantaneous northward turbulent surface stress	<input type="checkbox"/> Instantaneous surface sensible heat flux
<input type="checkbox"/> Large-scale precipitation	<input type="checkbox"/> Large-scale precipitation fraction
<input type="checkbox"/> Large-scale snowfall	<input type="checkbox"/> Logarithm of surface roughness length for heat
<input type="checkbox"/> Low cloud cover	<input type="checkbox"/> Maximum temperature at 2 metres since previous post-processing
<input type="checkbox"/> Mean sea level pressure	<input type="checkbox"/> Mean wave direction
<input type="checkbox"/> Mean wave period	<input type="checkbox"/> Medium cloud cover
<input type="checkbox"/> Minimum temperature at 2 metres since previous post-processing	<input type="checkbox"/> Northward gravity wave surface stress
<input type="checkbox"/> Northward turbulent surface stress	<input type="checkbox"/> Photosynthetically active radiation at the surface
<input type="checkbox"/> Runoff	<input type="checkbox"/> Sea surface temperature
<input type="checkbox"/> Sea-ice cover	<input type="checkbox"/> Significant height of combined wind waves and swell
<input type="checkbox"/> Skin reservoir content	<input type="checkbox"/> Skin temperature
<input type="checkbox"/> Snow albedo	<input type="checkbox"/> Snow density
<input type="checkbox"/> Snow depth	<input type="checkbox"/> Snow evaporation
<input type="checkbox"/> Snowfall	<input type="checkbox"/> Snowmelt
<input type="checkbox"/> Soil temperature level 1	<input type="checkbox"/> Soil temperature level 2
<input type="checkbox"/> Soil temperature level 3	<input type="checkbox"/> Soil temperature level 4
<input type="checkbox"/> Sunshine duration	<input type="checkbox"/> Surface latent heat flux
<input type="checkbox"/> Surface net solar radiation	<input type="checkbox"/> Surface net solar radiation, clear sky
<input type="checkbox"/> Surface net thermal radiation	<input type="checkbox"/> Surface net thermal radiation, clear sky
<input type="checkbox"/> Surface pressure	<input type="checkbox"/> Surface roughness
<input type="checkbox"/> Surface sensible heat flux	<input type="checkbox"/> Surface solar radiation downwards
<input type="checkbox"/> Surface thermal radiation downwards	<input type="checkbox"/> TOA incident solar radiation
<input type="checkbox"/> Temperature of snow layer	<input type="checkbox"/> Top net solar radiation
<input type="checkbox"/> Top net solar radiation, clear sky	<input type="checkbox"/> Top net thermal radiation
<input type="checkbox"/> Top net thermal radiation, clear sky	<input type="checkbox"/> Total cloud cover
<input type="checkbox"/> Total column ice water	<input type="checkbox"/> Total column liquid water
<input type="checkbox"/> Total column ozone	<input type="checkbox"/> Total column water
<input type="checkbox"/> Total column water vapour	<input checked="" type="checkbox"/> Total precipitation

Figura 4. 4 Selección de tiempo y pasos a descargar.

Después de haber seleccionado la o las variables que se necesitan, se elige la variable y el formato para descargar los datos (figura 4.5). En nuestro caso seleccionamos la variable “total precipitation” en formato netcdf.

<input type="checkbox"/> Sea-ice cover	<input type="checkbox"/> Significant height of combined wind waves and swell
<input type="checkbox"/> Skin reservoir content	<input type="checkbox"/> Skin temperature
<input type="checkbox"/> Snow albedo	<input type="checkbox"/> Snow density
<input type="checkbox"/> Snow depth	<input type="checkbox"/> Snow evaporation
<input type="checkbox"/> Snowfall	<input type="checkbox"/> Snowmelt
<input type="checkbox"/> Soil temperature level 1	<input type="checkbox"/> Soil temperature level 2
<input type="checkbox"/> Soil temperature level 3	<input type="checkbox"/> Soil temperature level 4
<input type="checkbox"/> Sunshine duration	<input type="checkbox"/> Surface latent heat flux
<input type="checkbox"/> Surface net solar radiation	<input type="checkbox"/> Surface net solar radiation, clear sky
<input type="checkbox"/> Surface net thermal radiation	<input type="checkbox"/> Surface net thermal radiation, clear sky
<input type="checkbox"/> Surface pressure	<input type="checkbox"/> Surface roughness
<input type="checkbox"/> Surface sensible heat flux	<input type="checkbox"/> Surface solar radiation downwards
<input type="checkbox"/> Surface thermal radiation downwards	<input type="checkbox"/> TOA incident solar radiation
<input type="checkbox"/> Temperature of snow layer	<input type="checkbox"/> Top net solar radiation
<input type="checkbox"/> Top net solar radiation, clear sky	<input type="checkbox"/> Top net thermal radiation
<input type="checkbox"/> Top net thermal radiation, clear sky	<input type="checkbox"/> Total cloud cover
<input type="checkbox"/> Total column ice water	<input type="checkbox"/> Total column liquid water
<input type="checkbox"/> Total column ozone	<input type="checkbox"/> Total column water
<input type="checkbox"/> Total column water vapour	<input checked="" type="checkbox"/> Total precipitation
<input type="checkbox"/> Vertical integral of cloud frozen water	<input type="checkbox"/> Vertical integral of cloud liquid water
<input type="checkbox"/> Vertical integral of divergence of cloud frozen water flux	<input type="checkbox"/> Vertical integral of divergence of cloud liquid water flux
<input type="checkbox"/> Vertical integral of divergence of geopotential flux	<input type="checkbox"/> Vertical integral of divergence of kinetic energy flux
<input type="checkbox"/> Vertical integral of divergence of mass flux	<input type="checkbox"/> Vertical integral of divergence of moisture flux
<input type="checkbox"/> Vertical integral of divergence of ozone flux	<input type="checkbox"/> Vertical integral of divergence of thermal energy flux
<input type="checkbox"/> Vertical integral of divergence of total energy flux	<input type="checkbox"/> Vertical integral of eastward cloud frozen water flux
<input type="checkbox"/> Vertical integral of eastward cloud liquid water flux	<input type="checkbox"/> Vertical integral of eastward geopotential flux
<input type="checkbox"/> Vertical integral of eastward heat flux	<input type="checkbox"/> Vertical integral of eastward kinetic energy flux
<input type="checkbox"/> Vertical integral of eastward mass flux	<input type="checkbox"/> Vertical integral of eastward ozone flux
<input type="checkbox"/> Vertical integral of eastward total energy flux	<input type="checkbox"/> Vertical integral of eastward water vapour flux
<input type="checkbox"/> Vertical integral of energy conversion	<input type="checkbox"/> Vertical integral of kinetic energy
<input type="checkbox"/> Vertical integral of mass of atmosphere	<input type="checkbox"/> Vertical integral of mass tendency
<input type="checkbox"/> Vertical integral of northward cloud frozen water flux	<input type="checkbox"/> Vertical integral of northward cloud liquid water flux
<input type="checkbox"/> Vertical integral of northward geopotential flux	<input type="checkbox"/> Vertical integral of northward heat flux
<input type="checkbox"/> Vertical integral of northward kinetic energy flux	<input type="checkbox"/> Vertical integral of northward mass flux
<input type="checkbox"/> Vertical integral of northward ozone flux	<input type="checkbox"/> Vertical integral of northward total energy flux
<input type="checkbox"/> Vertical integral of northward water vapour flux	<input type="checkbox"/> Vertical integral of ozone
<input type="checkbox"/> Vertical integral of potential+internal+latent energy	<input type="checkbox"/> Vertical integral of potential+internal+latent energy
<input type="checkbox"/> Vertical integral of temperature	<input type="checkbox"/> Vertical integral of thermal energy
<input type="checkbox"/> Vertical integral of total energy	<input type="checkbox"/> Vertical integral of water vapour
<input type="checkbox"/> Volumetric soil water layer 1	<input type="checkbox"/> Volumetric soil water layer 2
<input type="checkbox"/> Volumetric soil water layer 3	<input type="checkbox"/> Volumetric soil water layer 4

Select All or Clear

Retrieve GRIE | **Retrieve NetCDF** | Plot data | View batch request

Figura 4. 5 Selección de variable a descargar y formato en que se va a descargar la variable.

Por último aparece una ventana para que el usuario pueda corroborar que todas las opciones sean las correctas, y se muestra el área a descargar, si el usuario está de acuerdo, selecciona y da clic en *Now* para proceder con la descarga (figura 4.6).

ECMWF Home Your Room Login Contact Feedback Site Map Search:

About Us **Products** **Services** **Research** **Publications** **News&Events**
 Overview Forecasts Computing Modelling Newsletters Calendar
 Getting here Order Data Archive Reanalysis Manuals Employment
 Committees Order Software PreIFs Seasonal Library Open Tenders

Personal > Temporary items > netcdf14>

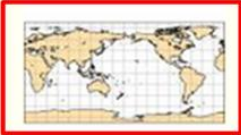
netcdf14

ERA Interim, Atmospheric model

Type: Forecast
 Type of level: Surface
 Date: 2013-06-01 to 2013-06-30
 Time: 00:00:00, 12:00:00
 Parameter: Total precipitation
 Step: 3
 Grid: 1.5° x 1.5°

The netcdf will be done using the following attributes:

Area:



Default (as archived)

Retrieve and convert to NetCDF:

[Now](#)

15-10-2013 © ECMWF

Figura 4. 6 Seleccionar área o agregar coordenadas para área personalizada; y descarga de los datos con atributos seleccionados anteriormente.

4.3.2 Procesamiento de los datos de ERA-Interim

Después de descargar los datos de ERA-Interim para el periodo junio 2012 – agosto 2013 se le hicieron los siguientes procesos:

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

- a) Se cambiaron los tipos de variables de short a double con nco, utilizando el comando 'ncea' (ncea archivo_entrada archivo_salida), que cambia las variables automáticamente. Esto con la finalidad de poder realizar modificaciones a los datos con cdo (Schulzweida, *et al.* 2009).
- b) Como en los archivos descargados anteriormente se encontraban varios meses en un solo archivo, se separaron para que se tuviera un archivo por mes, utilizando el comando de cdo 'splitmon' (cdo -r splitmon archivo_entrada.nc archivo_salida.nc).
- c) Se recortaron los datos para México con cdo utilizando el comando sellonlatbox (cdo -r sellonlatbox, 240, 280, 10, 40 input.nc output.nc); debido a que se encontraban para todo el mundo (figura 4.7 y figura 4.8)

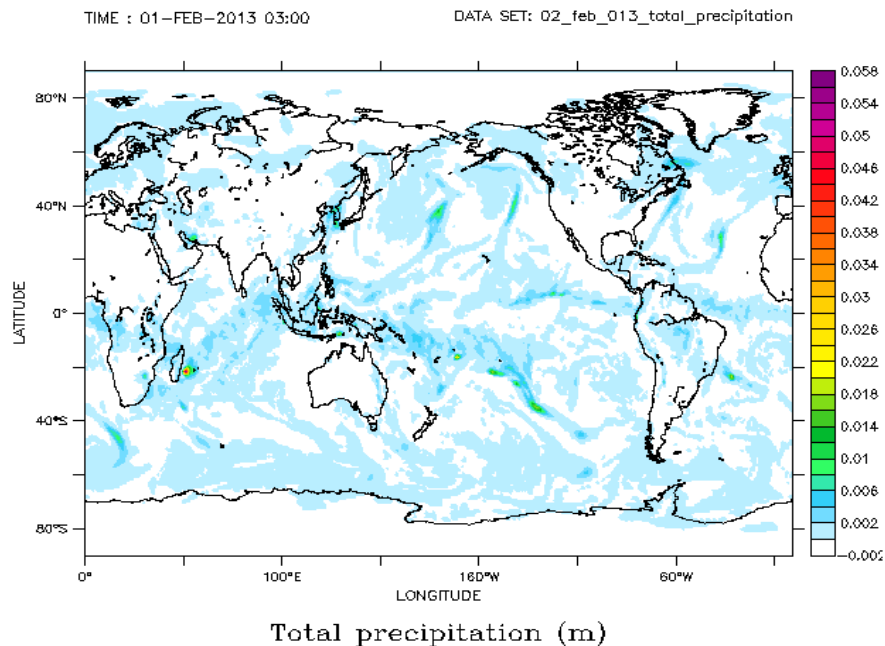


Figura 4. 7 Gráfica del mes de febrero del 2013, antes de recortar para México.

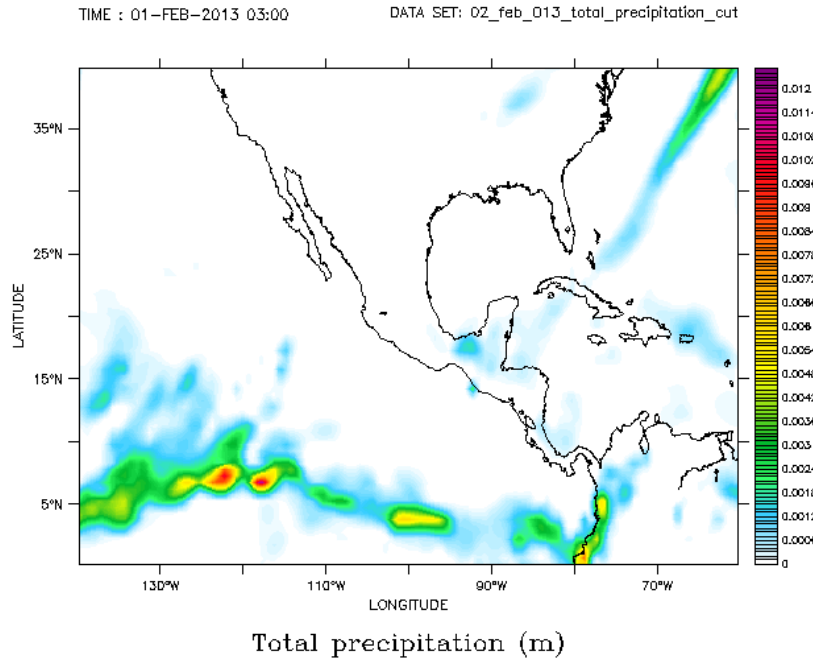


Figura 4. 8 Gráfica del mes de febrero, utilizando los datos recortados para México.

- d) Debido a que los datos de precipitación de ERA-Interim se encontraban en metros (figura 4.9) se convirtieron a mm/día (figura 4.10), para lo cual se multiplicó primero los datos de ERA-Interim por 1000, para convertirlos a mm con el comando de cdo “mulc”; “cdo -r mulc,1000 archivo_entrada.nc archivo_salida.nc”. Ya que los datos de precipitación de ERA-Interim son acumulados cada doce horas se separaron todos los tiempos utilizando el comando de cdo “splithour” y luego se utilizó el comando de cdo “mergetime”, para tener sólo un archivo de salida con los dos tiempos requeridos (ver anexo 3; este anexo se utilizó para cambiar las unidades y para la suma diaria de precipitación); finalmente se calculó una sumatoria diaria con el comando de cdo “daysum” (ejemplo: cdo -r daysum salida_2tiempos.nc suma_diaria_ene.nc).

TIME : 01-FEB-2013 15:00 DATA SET: 02_feb_013_total_precipitation_acumulados_diarlos_mm

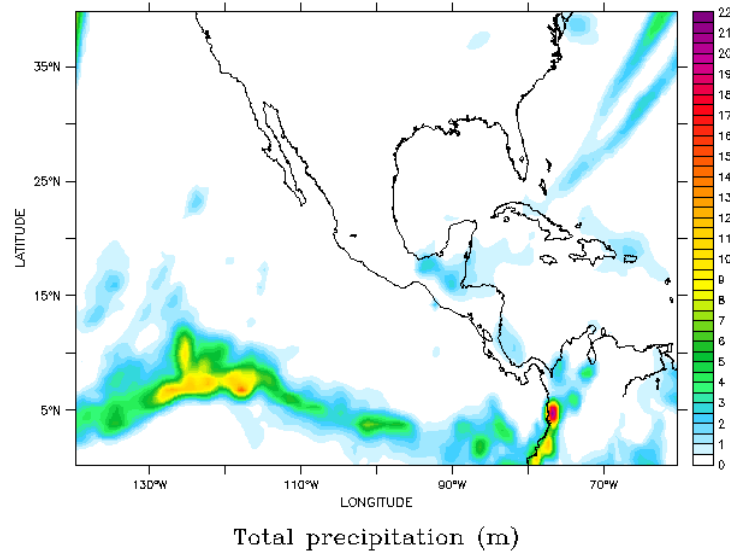


Figura 4. 9 Gráfica del mes de febrero para los datos acumulados diarios de precipitación.

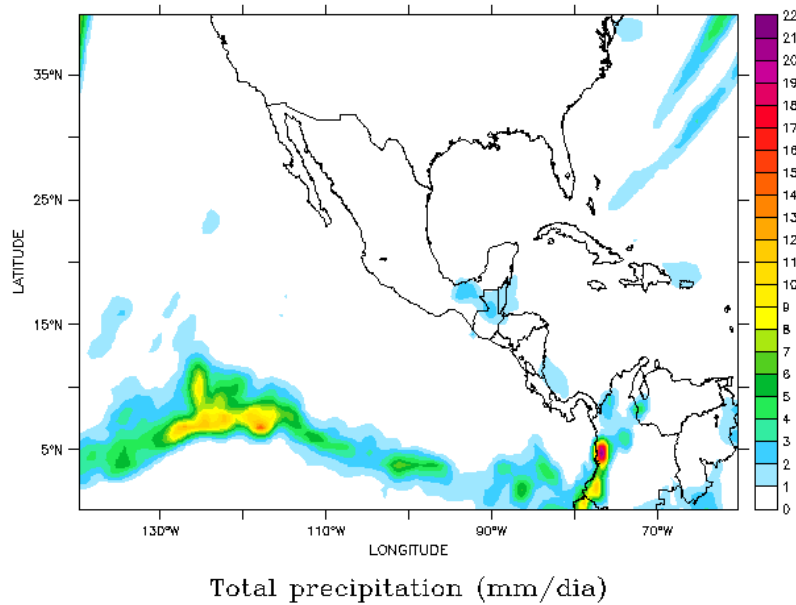


Figura 4. 10 Gráfica del mes de febrero para los datos acumulados diarios de precipitación en mm/día.

4.4 Homogeneización de bases de datos

Para poder realizar operaciones entre dos archivos netcdf con cdo se necesita que ambos tengan los mismos atributos. Por tal motivo se hicieron los siguientes procesos tanto para los datos del CFS como de ERA-Interim:

- a) Dado que los datos de ERA-Interim y CFS tenían diferente resolución (75 km y 100km respectivamente) se interpolaron los archivos del ERA-Interim a la malla de CFS para ambas tengan la misma resolución.

Para lo anterior se generó un programa para interpolar los archivos de ERA-Interim a la malla del modelo CFS, con el comando de cdo “remapbil”; “cdo -r remapbil, archivo_cfs.nc archivo_ERA.nc archivo_ERA_interpolado.nc” (ver anexo 2)

- b) En los datos de ERA-Interim cambiar unidades a milímetros y grados centígrados, así como modificar las etiquetas correspondientes en los atributos del archivo:

Las unidades de los archivos de precipitación descargados de ERA-Interim fueron “metros”, por lo que se necesitaban convertir a milímetros, en cuanto a los archivos de temperatura máxima y mínima, se encontraban en grados kelvin y se convirtieron a grados centígrados. Para lo anterior fue necesario generar un programa en Shell script (ver anexo 3) para convertir las unidades de todos los archivos, utilizando el comando de cdo “mulc”; “cdo -r mulc,1000 achivo_entrada.nc archivo_salida.nc” para la precipitación y “subc” para temperatura; “cdo -r subc,273.15 archivo_entrada.nc archivo_salida.nc”. Para que haya consistencia en los datos y sus unidades se cambiaron los nombres de las variables en los atributos del archivo utilizando el comando de nco “ncatted”; “ncatted -O -h -a units,mx2t,m,c,"C" archivo_entrada.nc”.

- c) Para poder comparar los datos de ERA-Interim con las simulaciones del CFS que tienen medias mensuales, se procedió a calcular la media mensual de los datos ERA-interim con el comando monmean de cdo (cdo -r monmean archivo_entrada.nc archivo_salida.nc) (figura 4.11).

- d) Recortar los archivos procesados de ERA-Interim y los del CFS para las tres variables (precipitación, temperatura máxima y mínima) a las tres regiones seleccionadas: norte, sur y centro. Para realizar el recorte de las regiones mostradas en la figura 4.1 se utilizó el comando de cdo “sellonlabox” (ver anexo 5).

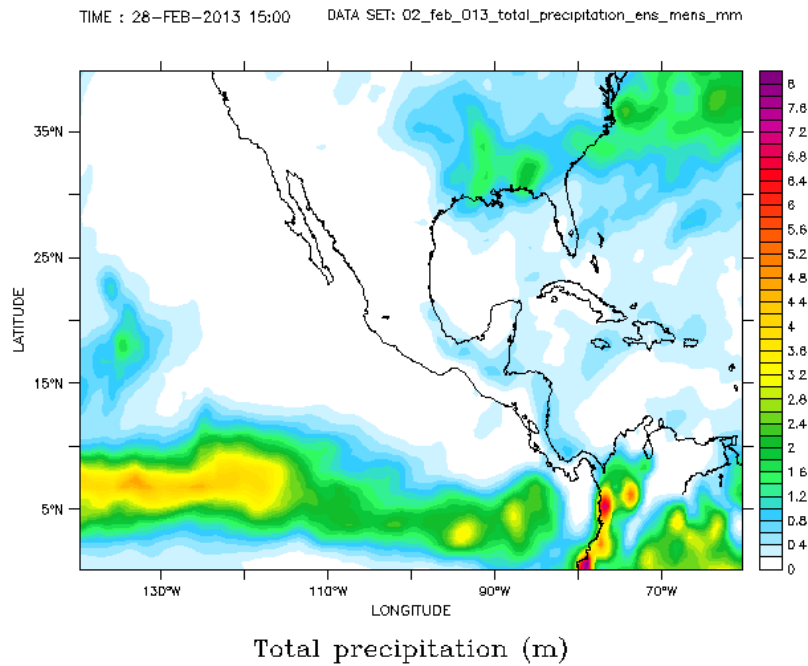


Figura 4. 11 Gráfica del mes de febrero, media mensual.

4.5 Validación del Modelo CFS.

Para validar el modelo CFS se procedió de dos maneras, primero con la finalidad de tener una idea general se realizaron comparaciones cualitativas, es decir, se graficó la precipitación y temperatura máxima para un mes aleatorio para todo México y se compararon con los datos de ERA- Interim, también se utilizaron gráficos interanuales de junio 2012 a junio 2013 para las tres regiones seleccionadas. Posteriormente para tener algo más formal se procedió a una comparación cuantitativa, utilizando el error medio absoluto (MAE, por sus siglas en inglés), que de acuerdo con Willmott y Matsuura (2005) es una medida más natural del error promedio e inequívoco.

4.5.1 Validación cualitativa.

Con la finalidad de tener una primera idea de que tan bueno es el CFS para simular el clima en México se calcularon medias mensuales tanto del CFS como de los datos de ERA-interim para el periodo junio 2012 a junio 2013. Posteriormente se comparó una simulación que hizo el CFS de precipitación y temperatura máxima en diciembre del 2012 para enero del 2013 con los datos de Era-interim.

Aunado a las gráficas espaciales también se generaron gráficos interanuales, los cuales muestran la variación de las tres variables estudiadas del periodo junio 2012 a junio 2013 en cada una de las tres regiones de la figura 4.1. Para lo anterior se realizó un programa en R para generar gráficas de líneas para la validación del modelo CFS con ERA-Interim. En dicho programa se llaman los archivos de todos los meses de ERA-Interim y del modelo CFS, después se define la variable que se va a utilizar. En el caso de los archivos del modelo CFS que tienen 9 tiempos de los meses posteriores, es decir, el mes de agosto de 2012 contiene los meses de septiembre, octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo, abril y mayo del 2013, por lo que al graficarse cada mes, fue necesario asignar el punto de inicio y fin de cada línea, como siguiente paso, se generaron 11 líneas, una para ERA-Interim y 10 más para el modelo CFS; se agregó la leyenda para poder identificar la línea de los diferentes meses. Las líneas del CFS se van desfasando por cada mes de simulación.

Para crear la línea con los datos de ERA-Interim fue necesario juntar los meses en una sola variable para así poder crear una línea con los diferentes meses (junio 2012 a junio 2013) (ver anexo 6).

4.5.2 Validación cuantitativa.

Para realizar la validación cuantitativa se utilizó el error absoluto medio (MAE), el cual es una medida común de error de pronóstico en el análisis de series de tiempo, donde los términos significan “desviación absoluta”.

El MAE mide la magnitud promedio de los errores en un conjunto de pronósticos, sin tener en cuenta su dirección. Mide la precisión para las variables continuas; en otras palabras, el MAE es la medida de la muestra de verificación de los valores absolutos de las diferencias entre la predicción y la observación correspondiente. El error absoluto medio es un puntaje lineal que significa que todas las diferencias individuales se ponderan por igual en el promedio. El cálculo del MAE es relativamente simple. Se trata de la suma de las magnitudes (valores absolutos) de los errores para obtener el “error total” y luego dividiendo el error total por n.

La ecuación del MAE se define a continuación:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |D_{\text{sim}} - D_{\text{obs}}|$$

Donde D_{sim} y D_{obs} , representan los datos simulados y observados, respectivamente, y n es el número de observaciones en cada punto de malla.

Para graficar el MAE se realizaron gráficos para el periodo de Julio 2012 a julio 2013 del modelo CFS y ERA-Interim que llevaron el procedimiento siguiente:

Utilizando los archivos del modelo CFS, que contienen los meses de febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio y agosto, se extrajeron meses para generar archivos de 8, 7, 6, 5, 4, 3 y 2 meses para que sólo tuvieran meses hasta agosto, es decir, si tomamos a febrero que en este caso contiene nueve meses (de febrero a octubre), utilizando el comando de `cdo selmon, 2,3,4,5,6,7,8,9 input.nc output.nc` generamos un archivo que sólo contiene 8 meses; para utilizarlo posteriormente al calcular el MAE; se hizo el mismo procedimiento para los siguientes meses (marzo a agosto); cabe mencionar que se realizó este procedimiento porque los archivos del modelo CFS contiene nueve pasos de tiempo y en este caso no eran requeridos todos los pasos de tiempos; mientras que para ERA-Interim sólo fue necesario unir los meses para 8, 7, 6, 5, 4, 3 y 2 meses, el procedimiento anterior se hizo para las tres variables utilizadas: precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. Los archivos generados se recortaron para las tres regiones utilizadas y que fueron mencionadas en la introducción (norte, sur y centro), Como

último paso se procedió a generar un programa para calcular y graficar el mae en el lenguaje ncl (NCAR Command Language) y la estructura es la siguiente:

- Se llaman los archivos a utilizar, los del modelo CFS (julio de 2012, octubre de 2012 y enero 2013) y de ERA-Interim (de julio de 2012 a junio de 2013).
- Se cambia el fill_Value a los archivos de ERA-Interim, para que sea el mismo de los archivos del modelo CFS. Esto, es muy importante ya que de no hacerlo se pueden mezclar los fill_Value y darte valores inesperados.
- Dado que los datos de ERA-Interim los tenemos en archivos individuales al abrirlos lo hace como variables separadas, por tal motivo se tuvo que generar otra variable para almacenar los archivos individuales, y tener así una variable con 12 pasos de tiempo de junio de 2012 a junio de 2013.
- Después de tener todos los tiempos en una variable, se cambió el tipo de dato a “float” para homogeneizarlo con el CFS.
- Como el MAE se calcula para el periodo que manejan los archivos del CFS que en este caso es para la simulación de: a) agosto 2012 se necesitan los meses de septiembre 2012 a abril 2013, b) Octubre 2012 los meses de noviembre 2012 a junio 2013 y c) enero2013 los meses de febrero a junio2013. Para lo cual se crearon tres variables para almacenar estos meses de los datos de ERA-Interim.
- Con los datos acomodados en tiempo y en atributos, se calculó del error cuadrático medio (MAE).

$$\text{MAE}(i) = \text{Dim_avg_n}(\text{dim_avg_n}(\text{abs}(\text{vm0}(i) - \text{rest0}(i)), 1), 1).$$

Donde maeE es la variable en la que se guardan los errores medios absolutos (MAE), dim_avg_n es una función en ncl para sacar el promedio de las dimensiones, abs es la función para sacar el valor absoluto en ncl, vm0 corresponde a los tiempos de enero del modelo CFS, y rest0 a los tiempos de enero de ERA-Interim.

Teniendo los errores para los meses de Agosto de 2012- Agosto 2013, se procedió a graficar. Ncl es un lenguaje muy completo, aunque tiene sus pros y sus contras, en cuanto a lo segundo cabe mencionarse que por cada atributo a la gráfica es una línea con instrucciones, por lo que al graficar se estableció el ancho de la gráfica, los colores para las barras, las etiquetas de los meses, el número de gráficas que deberían poner en cada imagen, etc. (ver anexo 7).

En el segundo reporte se generaron tres gráficas de MAE (por variable y para cada región) para los meses de agosto- abril, octubre-junio y enero a junio; las cuales fueron sustituidas por una gráfica que contiene los meses de julio de 2012 a julio de 2013.

4.6 Pronóstico estacional - Terciles.

Los pronósticos de tiempo son usualmente muy certeros en términos de predecir las características significantes del tiempo para los próximos dos días, no obstante dicha certeza disminuye conforme pasan los días, especialmente después de 4 días. Sin embargo para realizar pronósticos a mayor escala de tiempo (meses) no se puede hacer de una manera determinista, debido a la gran incertidumbre, por tal motivo se recurre a procedimientos probabilísticos, con la finalidad de captar las características generales del clima futuro.

Para realizar el pronóstico estacional en el presente trabajo se utilizan las simulaciones del modelo CFS y se utilizaron tres categorías para determinar si las condiciones climáticas se encontrarán arriba, debajo o dentro de lo normal, que es lo que se denomina como terciles. Para definir dichos terciles se utilizó la climatología del CFS para el periodo 1982 – 2010, con la cual se definieron umbrales, es decir, si en la simulación de enero 2014 es mayor que 25% de la climatología se considera que se encuentra arriba de lo normal, y si es menor del 25% es debajo de lo normal, el rango de -25% a 25% se considera como dentro de lo normal.

Después de definir los terciles, para tener una mayor información sobre el comportamiento del modelo se calcularon porcentajes de afinidad de los miembros del ensamble, dicho en otras palabras, si la media de las simulaciones del mes de enero 2014 dice que se encontrará arriba de lo normal, se busca entre los miembros del ensamble que porcentaje de ellos simula lo mismo. Por tal motivo al final del proceso se tienen dos gráficos uno que dice si se encontrará arriba o debajo de lo normal y otro que da el porcentaje de confianza de que eso ocurra, tomando en cuenta la dispersión de los miembros del ensamble.

4.7 Resultados.

4.7.1 Homogeneización de bases de datos de CFS y ERA-Interim.

A continuación se muestran resultados de gráficas generadas para un día de marzo del 2013, para ver los cambios antes (figura 4.13) y después de la interpolación de ERA-Interim y el modelo CFS (figura 4.14).

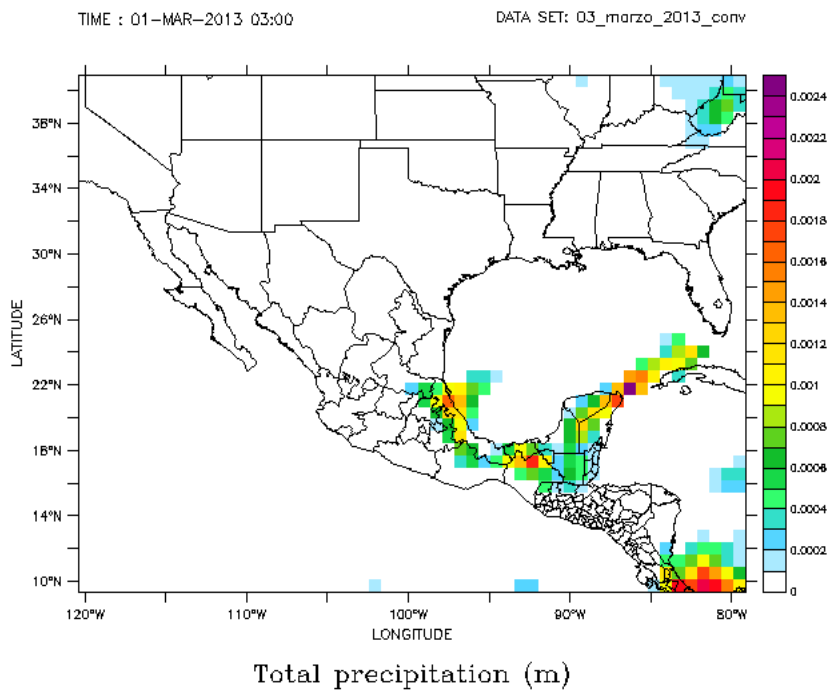


Figura 4. 12 Gráfica de precipitación de ERA-Interim del 01 de marzo de 2013 a las 3:00 hrs antes de interpolarse.

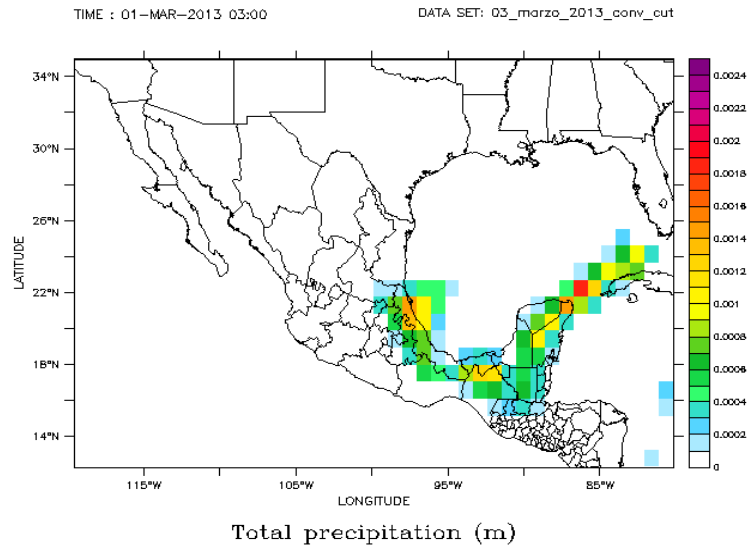


Figura 4. 13 Gráfica de precipitación interpolada para el 01 de marzo de 2013 a las 3:00 hrs.

Con los datos ya interpolados se procedió a realizar el cambio de unidades a mm/día y grados centígrados (C) para precipitación y temperatura respectivamente (figura 4.15); y posteriormente se sacó la media mensual (figura 4.16).

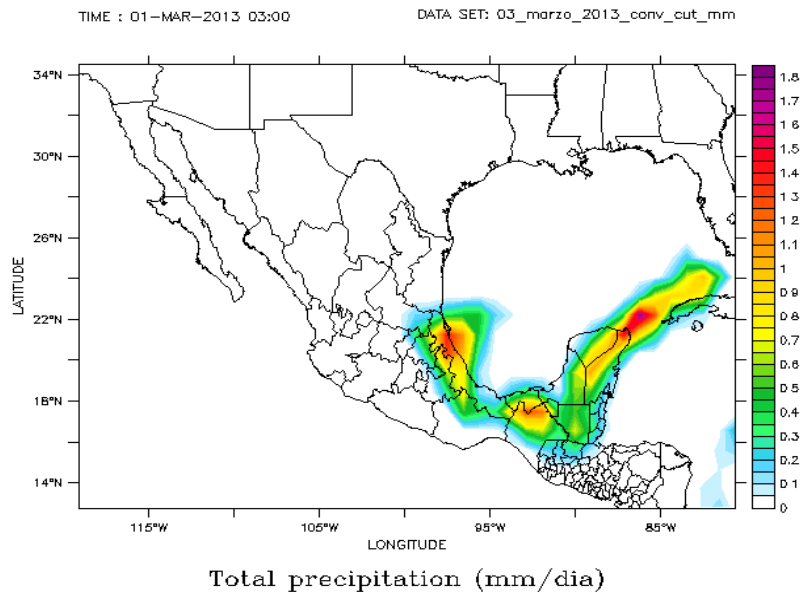


Figura 4. 14 Gráfica de precipitación interpolada para el mes de marzo de 2013.

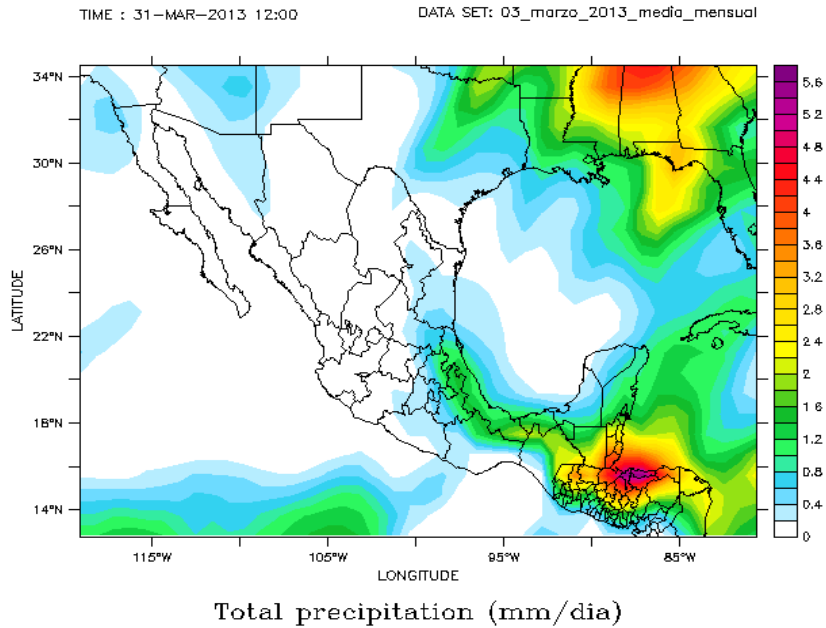


Figura 4. 15 Gráfica de media mensual de precipitación para marzo de 2013.

Los datos de temperatura máxima y mínima de ERA-Interim también fueron modificados en sus unidades y atributos. A continuación se muestran una serie de imágenes donde se aprecian los cambios realizados; Primero se muestra un gráfico de la temperatura máxima en grados kelvin, con valores de 278° a 306° kelvin antes de ser interpolados (figura 4.17), y en seguida se muestra otro gráfico donde los datos ya fueron interpolados y cambian sus atributos y el rango de sus valores va de 13.5 a 32.5°Centígrados (figura 4.18).

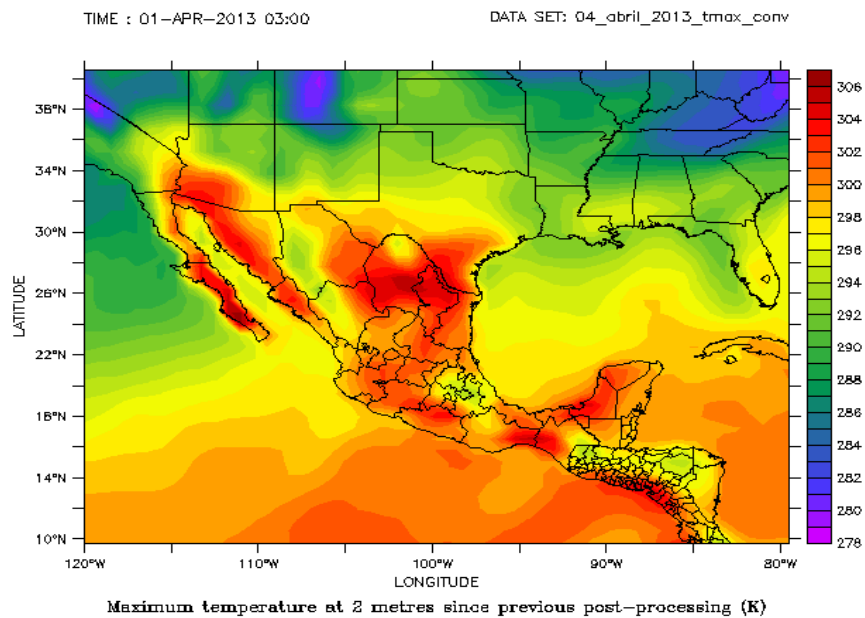


Figura 4. 16 Gráfica de temperatura máxima de ERA-Interim para el 01 de abril de 2013 a las 03:00 hrs.

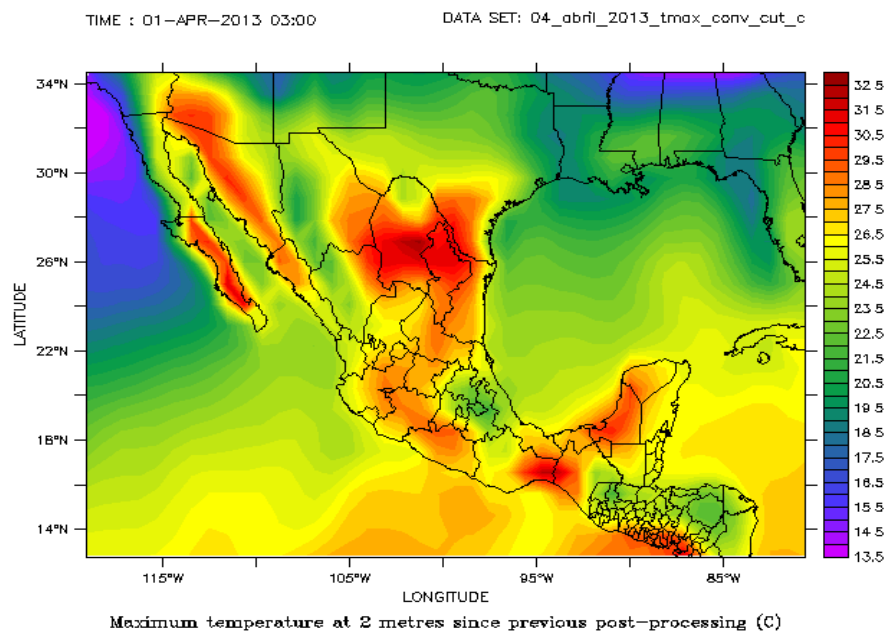


Figura 4. 17 Gráfica de cambio de unidades de temperatura máxima de ERA-Interim para el 01 de abril de 2013 a las 03:00 hrs.

Después de interpolar archivos, cambiar atributos y unidades, se sacó la media mensual y se graficó; La figura 4.19 muestra la media mensual de la temperatura máxima de ERA-Interim y se nota que los valores mínimos se encuentran en zonas montañosas, mientras que las temperaturas máximas se observan en la península de Yucatán, Oaxaca, Tabasco y sur de Veracruz con valores arriba de 25°C.

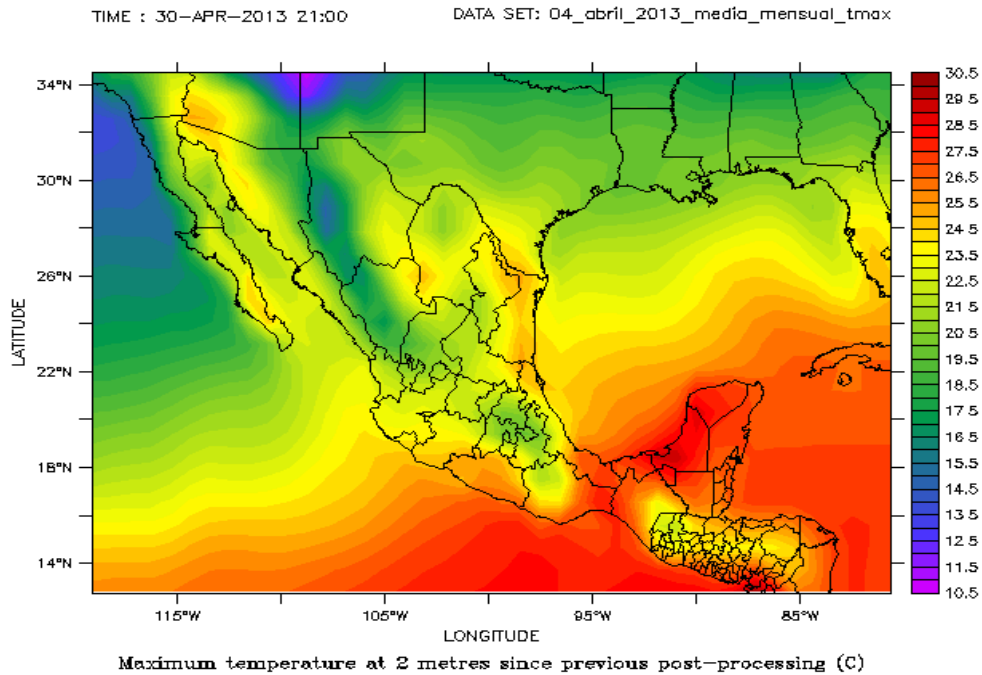


Figura 4. 18 Gráfica de media mensual de temperatura máxima.

4.7.2 Validación del Modelo CFS (cualitativa y cuantitativa)

Validación cualitativa.

En la figura 4.19 se muestra la precipitación del mes de febrero tanto del modelo CFS como de ERA-Interim, donde se observa que los patrones generales son bien capturados por el modelo, sin embargo la intensidad de la precipitación es subestimada. No obstante el máximo en las costas de Yucatán y la precipitación a lo largo de las costas del Golfo de México fueron bien representados.

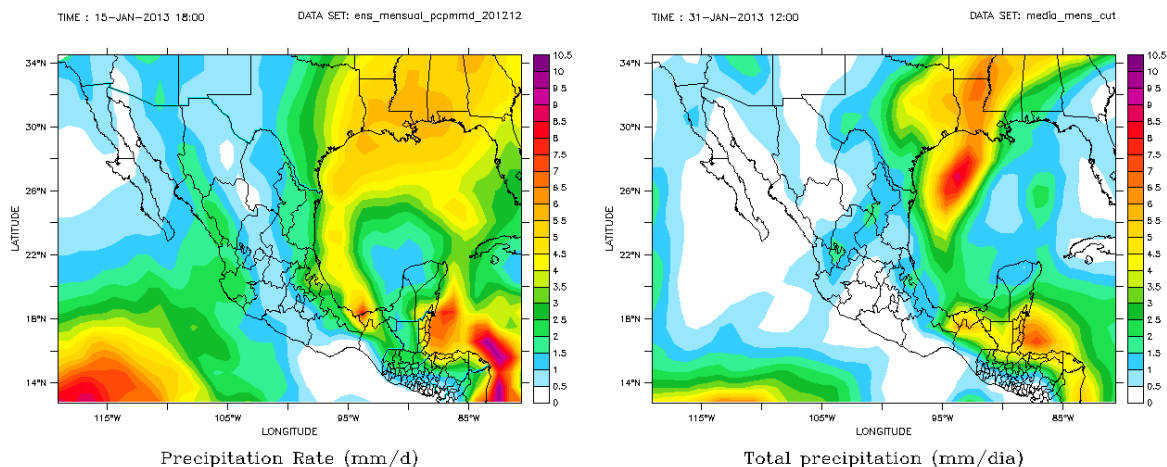


Figura 4. 19 Comparación del modelo CFS (izquierda) y ERA-Interim (derecha), para el mes de febrero del 2013 de precipitación.

En el caso de la temperatura máxima (figura 4.20) para el mismo mes tanto del modelo CFS como de ERA-Interim se aprecia que la temperatura del CFS es subestimada, en especial sobre ambos océanos donde el CFS simuló aproximadamente 2°C menos que el ERA-Interim.

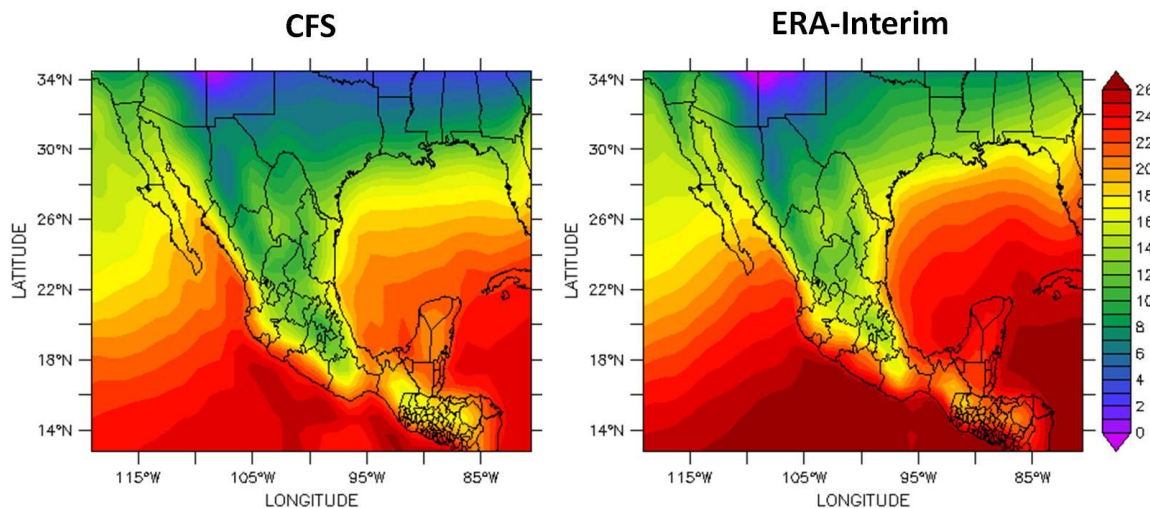


Figura 4. 20 Comparación del modelo CFS (izquierda) y ERA-Interim (derecha), para el mes de febrero del 2013 de precipitación.

Después de calcular la media mensual (como se describió anteriormente), se procedió a recortar por regiones: norte (109°O, 104°O, 23°N, 30°N), sur (96°O, 90°O, 19°N, 14°N) y centro (102°O, 97°O, 22°N, 18°N). Para comparar cualitativamente los datos del ERA-Interim con los datos del modelo CFS se

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

realizaron gráficos interanuales, los llamamos así debido a que cubren el periodo de junio 2012 a junio 2013. En dichos gráficos se despliega la variable de estudio (tmax, tmin y pcp) del ERA-Interim de manera continua, y cada simulación del CFS en ese periodo para cada región.

En la región centro para la precipitación con los datos de ERA-Interim (línea negra) se observa que se tuvo un déficit de precipitación de noviembre 2012 a abril 2013, en junio del 2012 hay una precipitación promedio de poco más de 5 mm/d, y para junio de 2013 bajó a menos de 5 mm/d. Cabe resaltar que por cada mes que se descargó del modelo CFS, es una línea de color y contiene los 8 meses posteriores al mes descargado. Las simulaciones de julio para agosto-abril respecto a la simulación en agosto fue casi la misma que la observada con ERA-Interim, aunque conforme pasa el tiempo se va alejando de las observaciones. Es interesante ver que un mes antes el modelo se acerca más a las observaciones, por ejemplo en diciembre y enero se observa que la simulación del mes anterior es mejor que la de diciembre. Sin embargo en la simulación de enero se ve que falló más en la simulación para el mes de junio 2013 que la simulación de septiembre (figura 4.20).

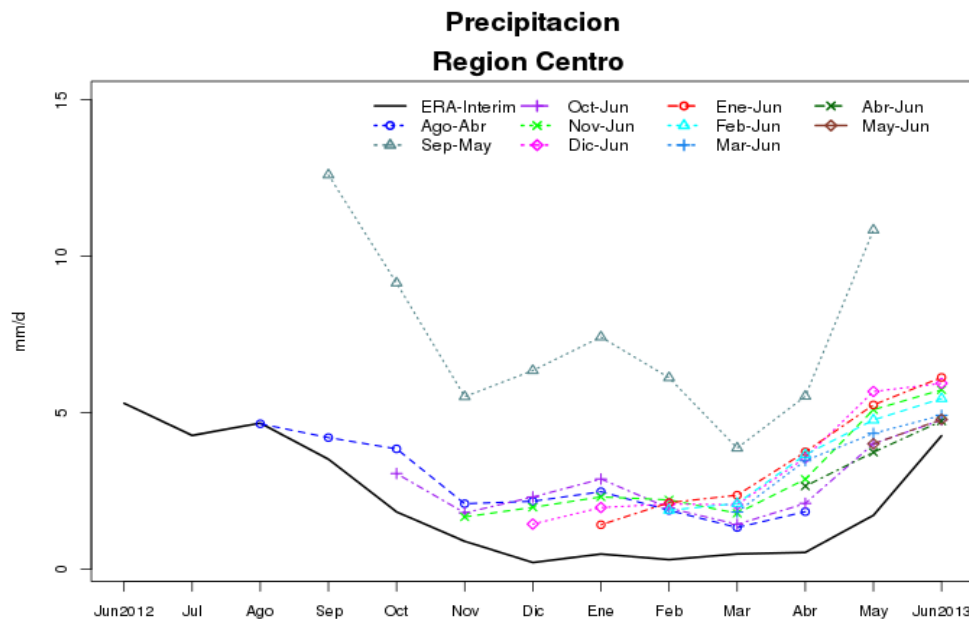


Figura 4. 21 Gráfica de ciclo anual de precipitación para la región centro.

En la región norte se ve nuevamente la simulación de agosto que sobreestima demasiado la precipitación (figura 4.21). En esta región se observa que la temporada de lluvias es de julio a septiembre principalmente, lo que asociamos a la presencia del Monzón mexicano. Nuevamente el CFS tiende a sobreestimar la

precipitación principalmente en invierno. Sin embargo el modelo si detecta el comienzo de la temporada de lluvias.

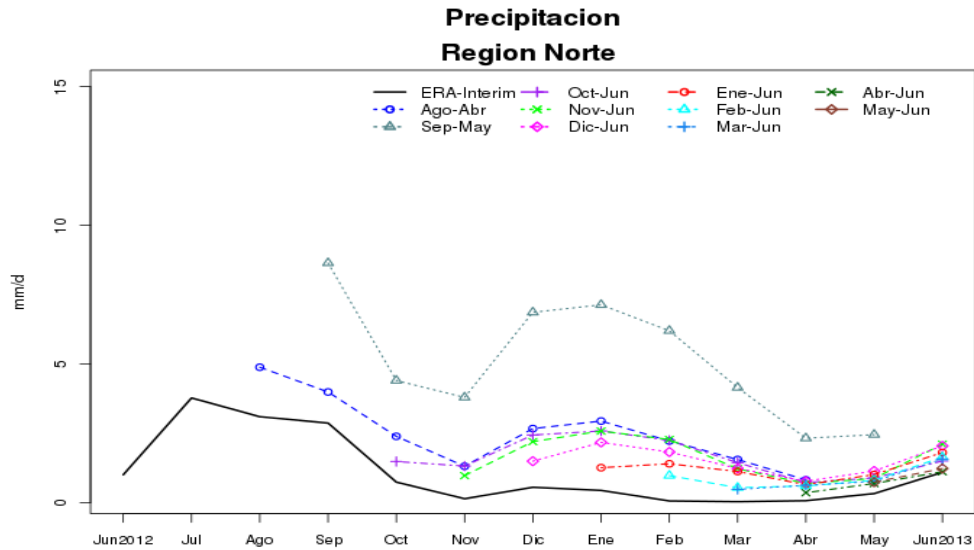


Figura 4. 22 Gráfica de ciclo anual de precipitación para la región norte

En la región sur la precipitación tiene dos máximos uno en junio y otro en agosto, esto es lo llamado la canícula (figura 4.22). Donde se puede ver que en el mes de septiembre hay mayor precipitación de un aproximado de 10 mm/d y para octubre disminuyó 2.5 mm/d; este mes es el más destacado para la precipitación para todas las regiones. En esta región el modelo tiende a subestimar la precipitación en la época de lluvias, contrario a las otras regiones.

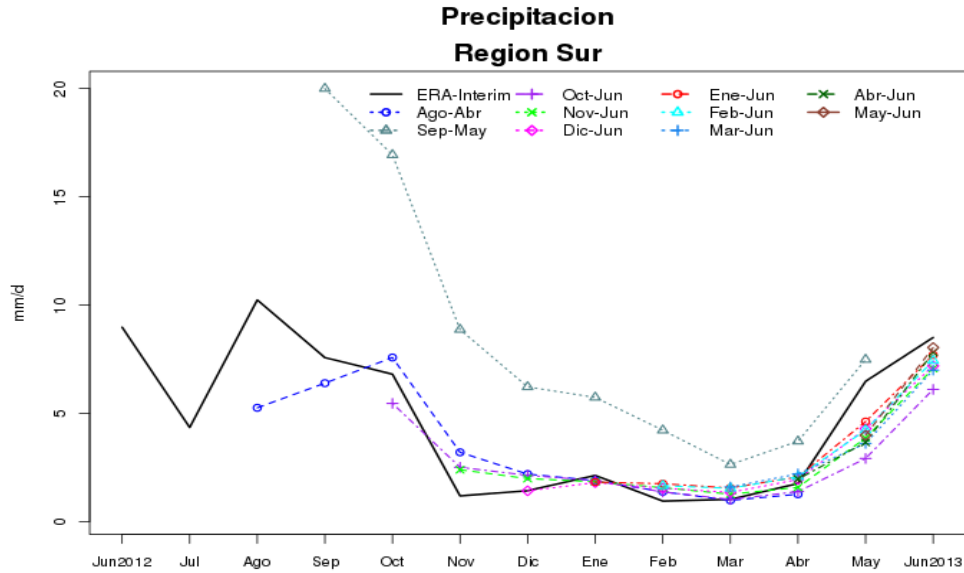


Figura 4. 23 Gráfica de ciclo anual de precipitación para la región sur.

En el caso de la temperatura máxima de la región centro el CFS tiende a subestimarla todo el año (figura 4.23). Lo anterior puede ser debido a la orografía que utiliza el modelo. Sin embargo esta subestimación disminuye conforme se acerca el mes de simulación. Por ejemplo en la simulación de julio para el periodo de agosto 2012 a abril 2013 la proyección para enero estaba casi 4°C debajo de lo observado, sin embargo en la simulación de diciembre la proyección es de 2°C.

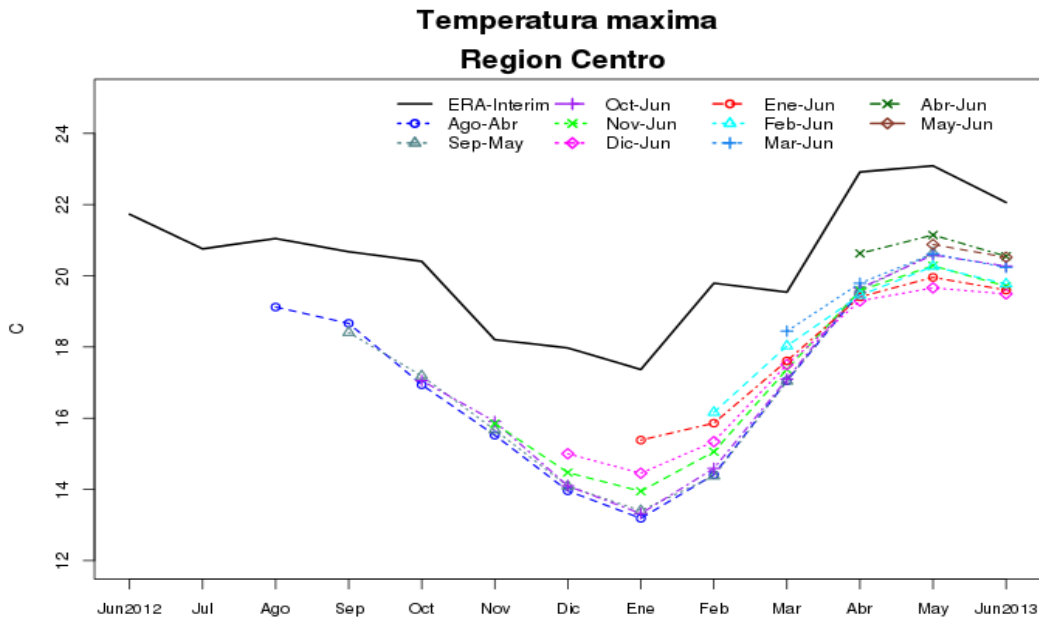


Figura 4. 24 Gráfica de ciclo anual de temperatura máxima para la región centro.

En la región sur nuevamente existe una subestimación de la temperatura máxima, principalmente en los meses de invierno (figura 4.24). En la temporada de calor de abril a junio es donde existe menos diferencia entre lo proyectado por el modelo y lo observado con ERA-Interim. Se tiene muy poca variación entre las simulaciones del modelo en esta región.

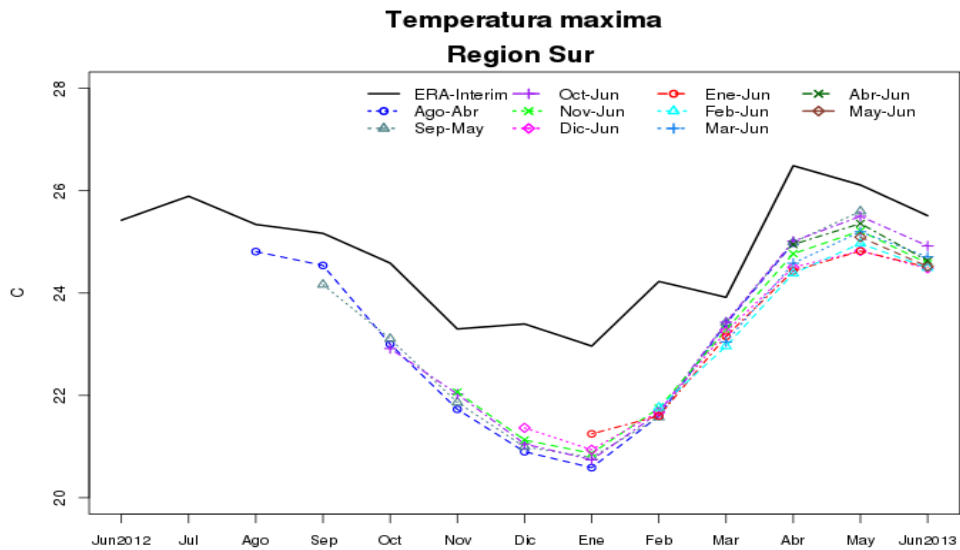


Figura 4. 25 Gráfica de ciclo anual de temperatura máxima para la región centro.

En la región norte para la temperatura máxima se observa que en enero hay una diferencia de 2°C de ERA-Interim con respecto al modelo CFS, al igual que la gráfica anterior los meses se mantienen dentro del mismo rango que va de 25 °C en agosto, con un leve descenso hasta enero de 2013 llegando casi a 20°C, y aumentando casi un grado por mes hasta llegar a los 25°C en mayo (figura 4.25). En esta región el CFS hace un buen trabajo simulando la temperatura máxima.

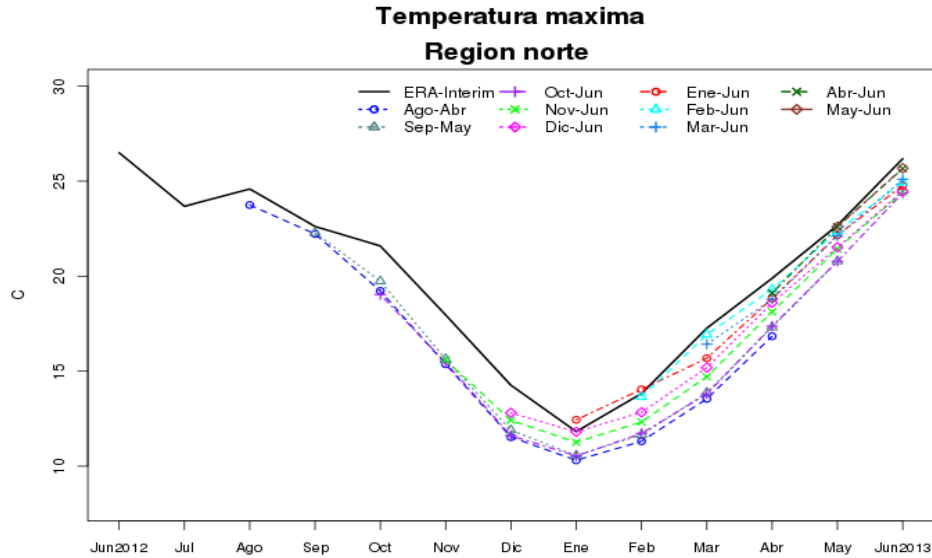


Figura 4. 26 Gráfica de ciclo anual de temperatura máxima para la región norte.

Respecto a la temperatura mínima en la región norte la temperatura mínima es subestimada en general casi 2°C (figura 4.26). Para esta variable y región se tiene poca dispersión entre las simulaciones del CFS. De acorde con ERA-Interim la región presenta un descenso de temperatura donde el mínimo se encuentra en enero con un valor de 10°C, mientras que su máximo se presenta en junio con valores cercanos a 25°C.

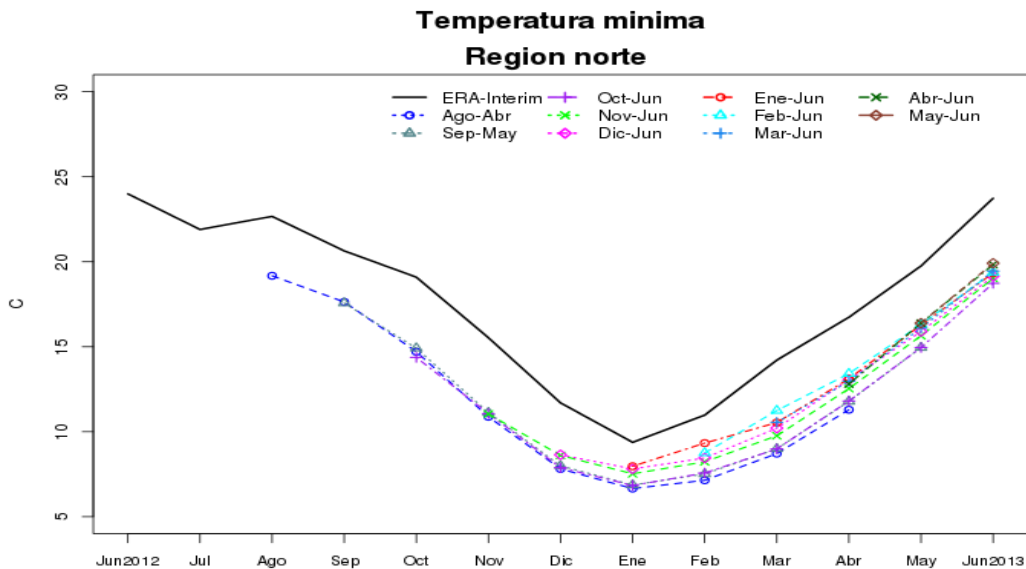


Figura 4. 27 Gráfica de ciclo anual de temperatura mínima para la región norte.

- En la región centro la temperatura mínima con los datos de ERA-Interim oscila entre 21 °C y 16°C; mientras que el modelo CFS se encuentra entre

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

los 15°C y los 10°C (figura 4.27). Es decir se tiene una subestimación de 6°C en esta región, la cual es mayor en los meses de invierno. Aunque mejora levemente en las simulaciones de diciembre (enero-junio 2013) y enero (febrero-junio 2013)

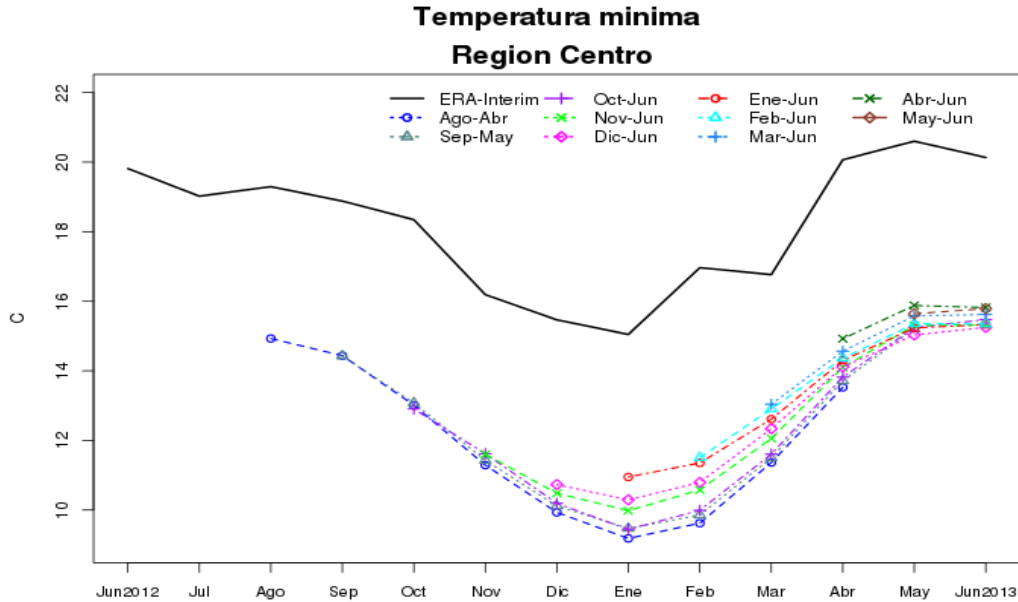


Figura 4. 28 Gráfica de ciclo anual de temperatura mínima para la región centro.

En la región sur la temperatura mínima simulada por el modelo CFS se mantiene en el rango de 22°C a 18°C (aproximadamente), mientras que los datos de ERA-Interim está entre 25°C y 22°C, con una diferencia de más de 2°C respecto al modelo CFS, nótese que hay un ascenso de marzo a abril de casi 2 °C en ERA-Interim y en los meses posteriores la temperatura se mantiene en 24°C (figura 4.28). En esta región se tiene nuevamente una subestimación de la temperatura mínima de 4°C en el invierno y 2.5°C en el verano. Las simulaciones del CFS no tienen mucha variación entre sí para esta variable.

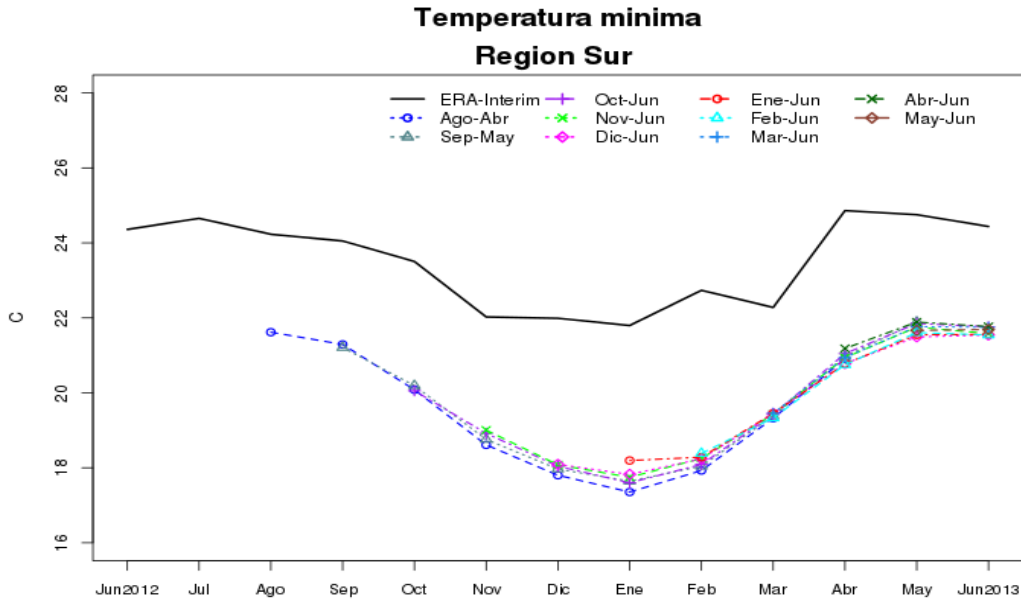


Figura 4. 29 Gráfica de ciclo anual para la temperatura mínima región sur.

Validación cuantitativa.

Las gráficas que se muestran, reemplazan a las mostradas en el 2do reporte para el error cuadrático medio, porque se observa con más detalle la variación del error en el tiempo, además de que permiten mostrar los errores para los meses de julio de 2012 a julio de 2013 del modelo CFS respecto a ERA-Interim; para las tres regiones seleccionadas: norte, centro y sur; y las tres variables: precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.

Error absoluto medio de temperatura mínima (MAE)
zona centro

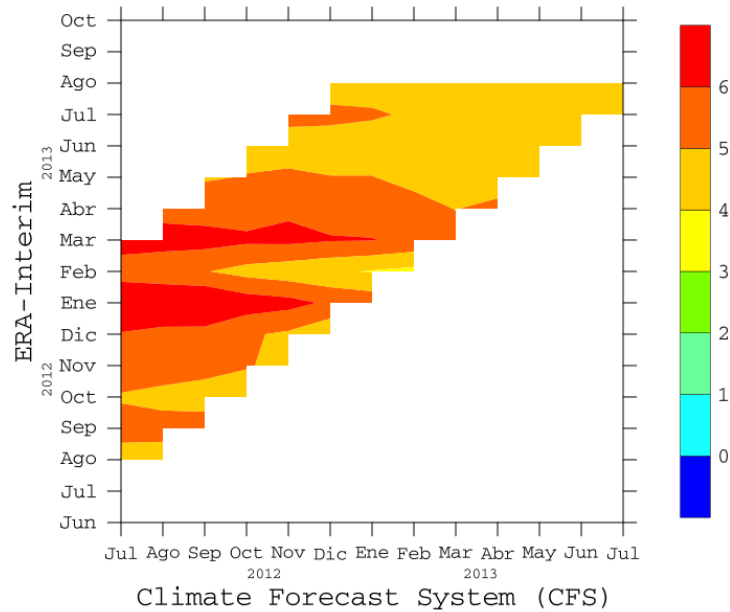


Figura 4. 30 Error absoluto medio de temperatura mínima, zona centro.

La figura 4.29, muestra que de julio a diciembre del modelo CFS, con respecto a ERA-Interim en los meses de septiembre, enero y marzo, los errores fueron disminuyendo poco más de un grado.

Error absoluto medio de temperatura mínima (MAE)
zona norte

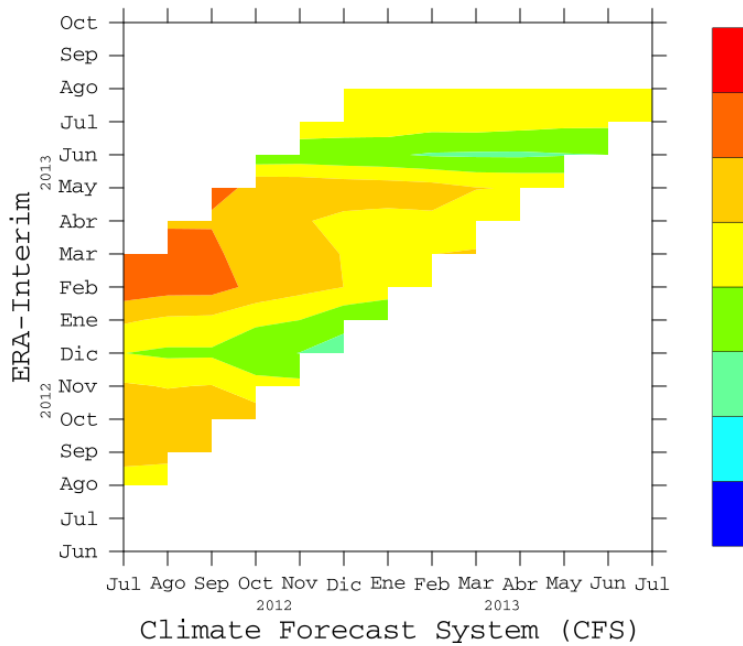


Figura 4. 31 Error absoluto medio de temperatura mínima, zona norte

Al igual que la zona centro, el error de julio a enero del modelo CFS con respecto a ERA-Interim fue disminuyendo más de un grado, mientras que de julio a diciembre del modelo CFS con respecto a ERA-Interim, en los meses de enero y febrero, los errores fueron de 4 y 5 grados respectivamente y fueron disminuyendo 1 grado aproximadamente.

**Error absoluto medio de temperatura mínima (MAE)
zona sur**

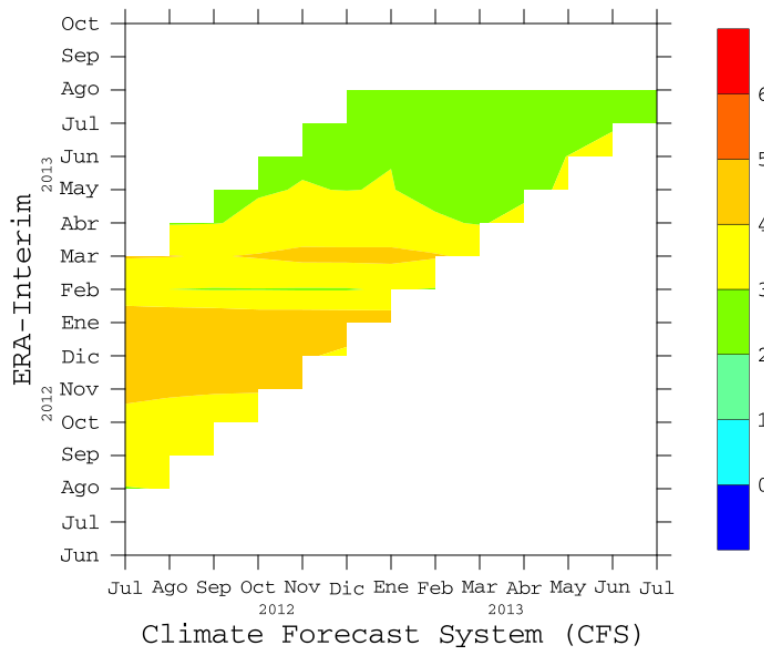


Figura 4. 32 Error absoluto medio de temperatura mínima, zona sur.

En la figura anterior se observa que el error más alto de temperatura mínima se encuentra en el rango de 5 a 3 grados y los meses con mayor error son de julio a diciembre del modelo CFS.

Error absoluto medio de temperatura máxima (MAE) zona centro

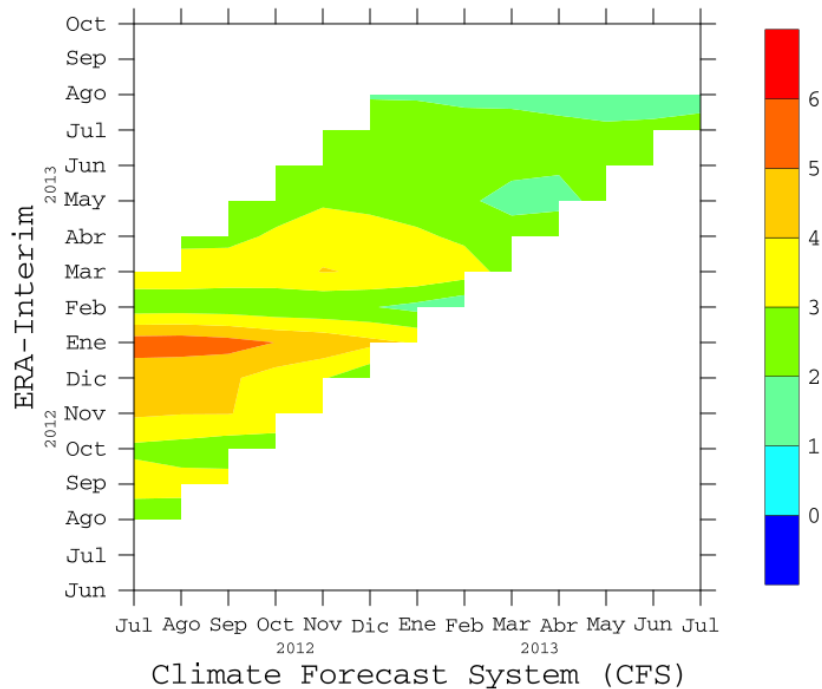


Figura 4. 33 Error absoluto medio de temperatura máxima, zona centro.

El error en la temperatura máxima para la zona centro, se muestra más de julio a septiembre del modelo CFS con grados, mientras que de septiembre a diciembre, muestra un descenso de dos grados.

Error absoluto medio de temperatura máxima (MAE) zona sur

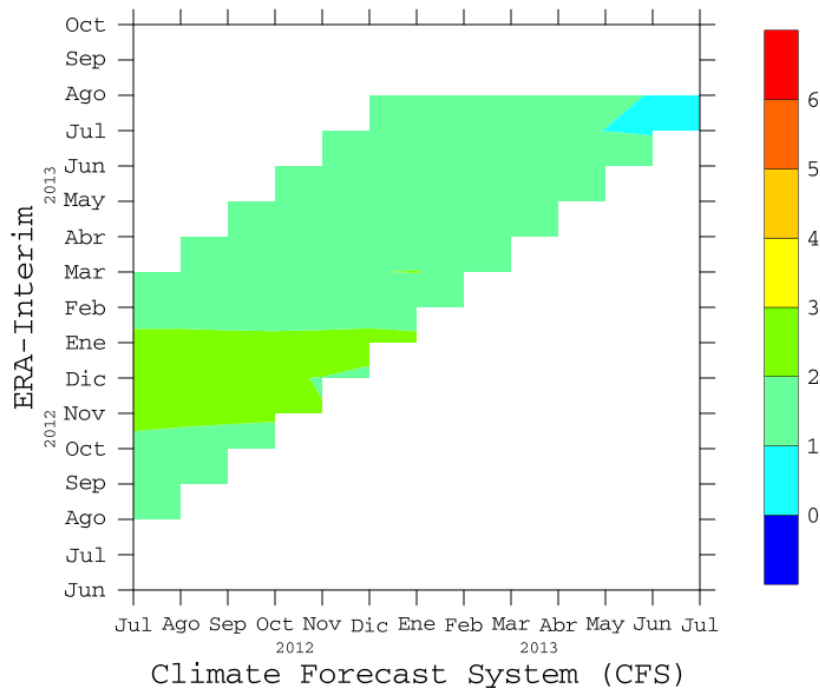


Figura 4. 34 Error absoluto medio de temperatura máxima, zona sur.

A diferencia de la zona centro, en la zona sur se registra el error de 3 grados de julio a diciembre del modelo CFS, respecto a ERA-Interim en los meses de noviembre a enero; mientras que para los meses posteriores el error se encuentra de 2 grados.

Error absoluto medio de temperatura máxima (MAE) zona norte

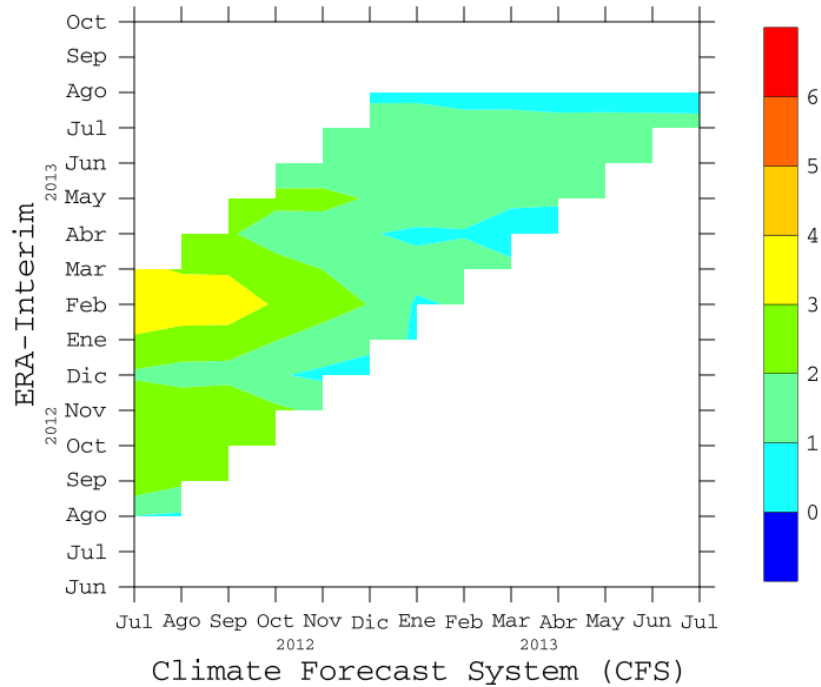


Figura 4. 35 Error absoluto medio de temperatura máxima, zona norte.

El error absoluto medio de temperatura máxima en la zona norte se encuentra en un rango de 0 a 6 grados centígrados, un grado más que en la zona sur, y se aprecia con más detalle, cómo disminuye de julio a diciembre del modelo CFS, con respecto a ERA-Interim en el mes de febrero.

Error absoluto medio de precipitación (MAE) zona norte

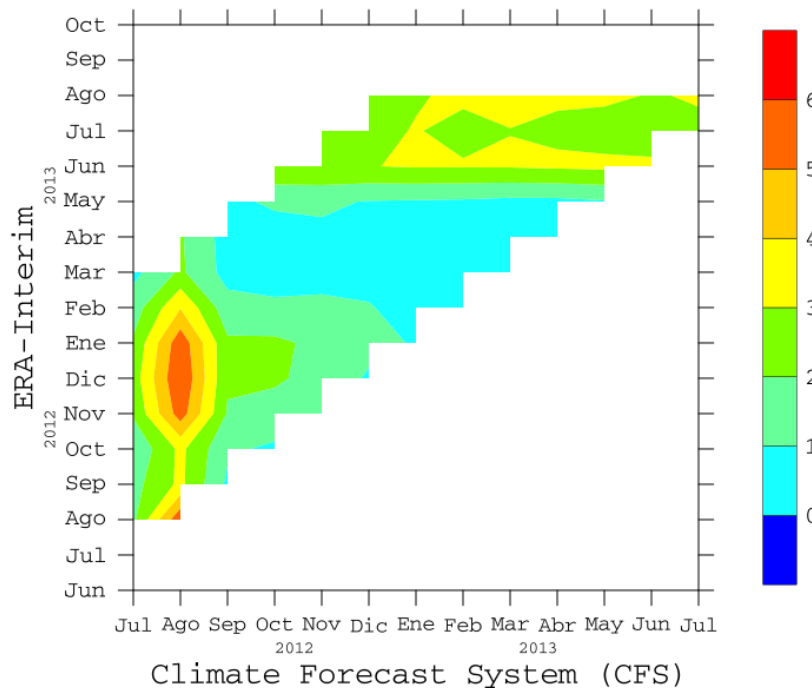


Figura 4. 36 Error absoluto medio de precipitación, zona norte.

El error absoluto medio de precipitación para la zona norte está en un rango de 0 a 6 mm/d, y se aprecia principalmente en agosto del modelo CFS, y va disminuyendo hasta llegar a 0 mm/d para el mes de abril, y sube de 2 a 3 mm/d en julio.

Error absoluto medio de precipitación (MAE) zona sur

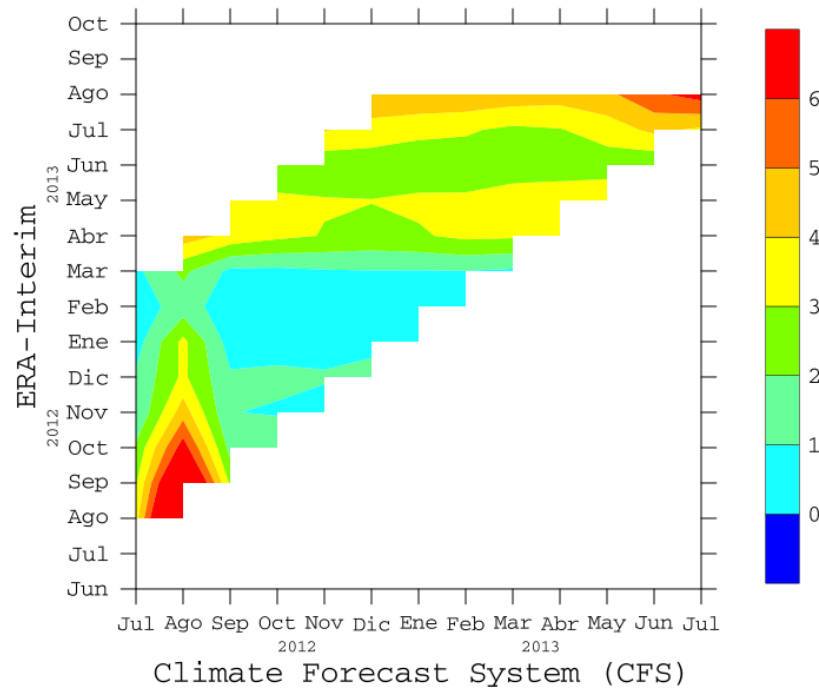


Figura 4. 37 Error absoluto medio de precipitación, zona sur.

A diferencia de la zona norte, el error en la zona sur se encuentra más elevado en 1 mm/d y se encuentra en los mismos meses que la zona norte (julio, agosto, septiembre), mientras que los meses posteriores los errores se mantienen de 0 a 6 mm/d

Error absoluto medio de precipitación (MAE) zona centro

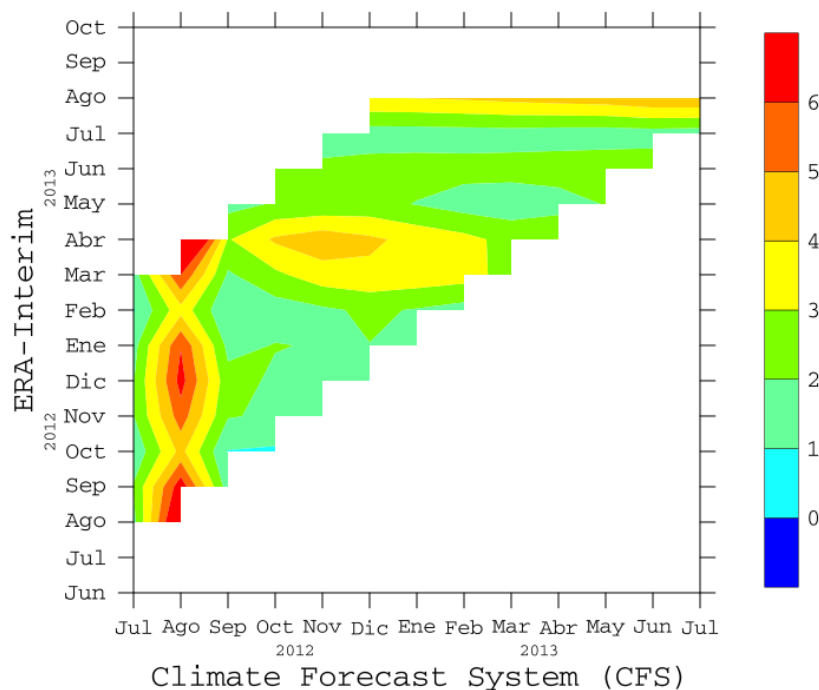


Figura 4. 38 Error absoluto medio de precipitación, zona centro.

En la zona centro, el error absoluto de precipitación, se aprecia más en los meses de julio y agosto del modelo CFS con respecto a ERA-Interim, mientras que los meses de septiembre a diciembre el error se mantiene de 3 a 5 grados mientras que de diciembre a febrero, el error disminuye en un 1 mm/d al mes.

4.7.3 Pronóstico estacional – Terciles.

En la siguiente secuencia de imágenes aparecen 6 gráficas, donde se muestran las categorías probables de los miembros (izquierda) y el pronóstico estacional (derecha); para nueve meses posteriores (diciembre, enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio y agosto).

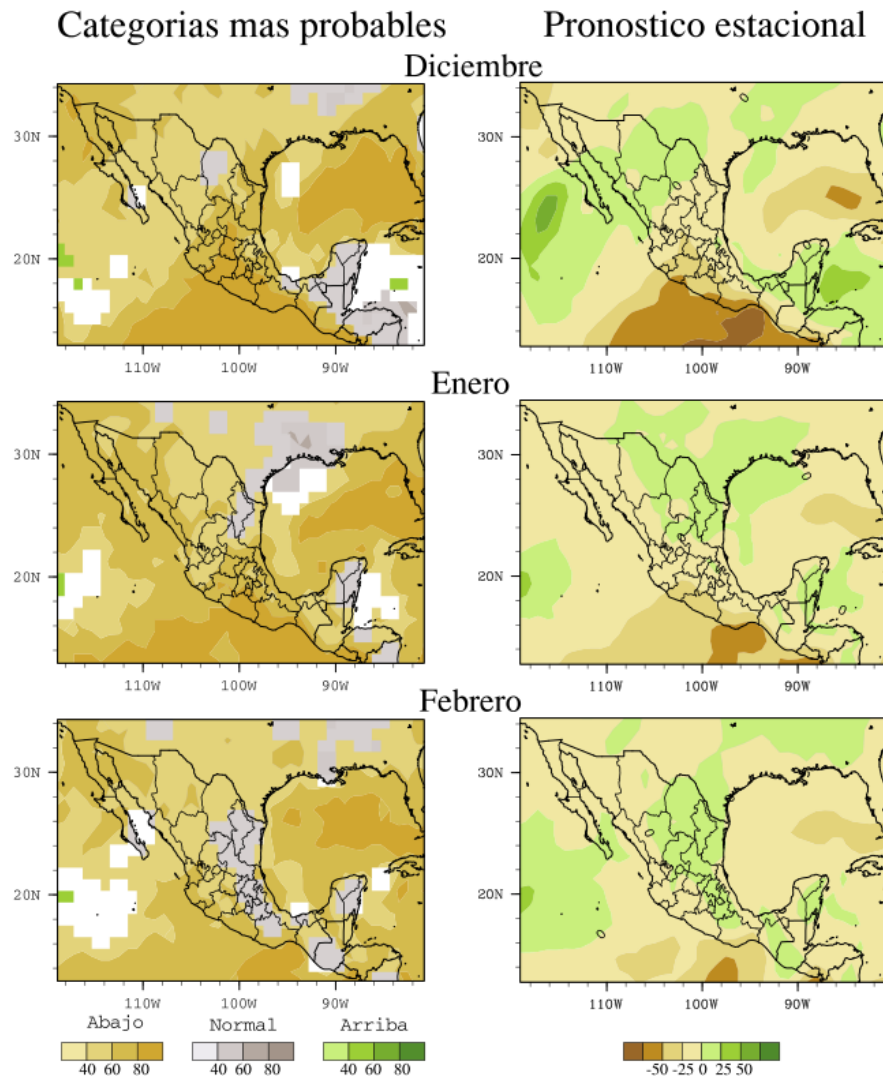


Figura 4. 39 Precipitación de diciembre de 2013 a febrero 2014

En la gráfica de categorías más probables de diciembre (izquierda), se puede observar que en la mayor parte de la república Mexicana los terciles se encuentran abajo de lo normal, mientras que en la península de Yucatán y el estado de Coahuila están dentro de lo normal (60 a 80); sin embargo, al comparar las categorías más probables con el pronóstico estacional, coinciden en la

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

península de Yucatán, los estados de Coahuila, Chihuahua, Baja California Sur, Sinaloa, sur de Sonora y Durango, que se encuentran dentro del rango normal (en este caso de 0 a 25 %) (Figura 3.38).

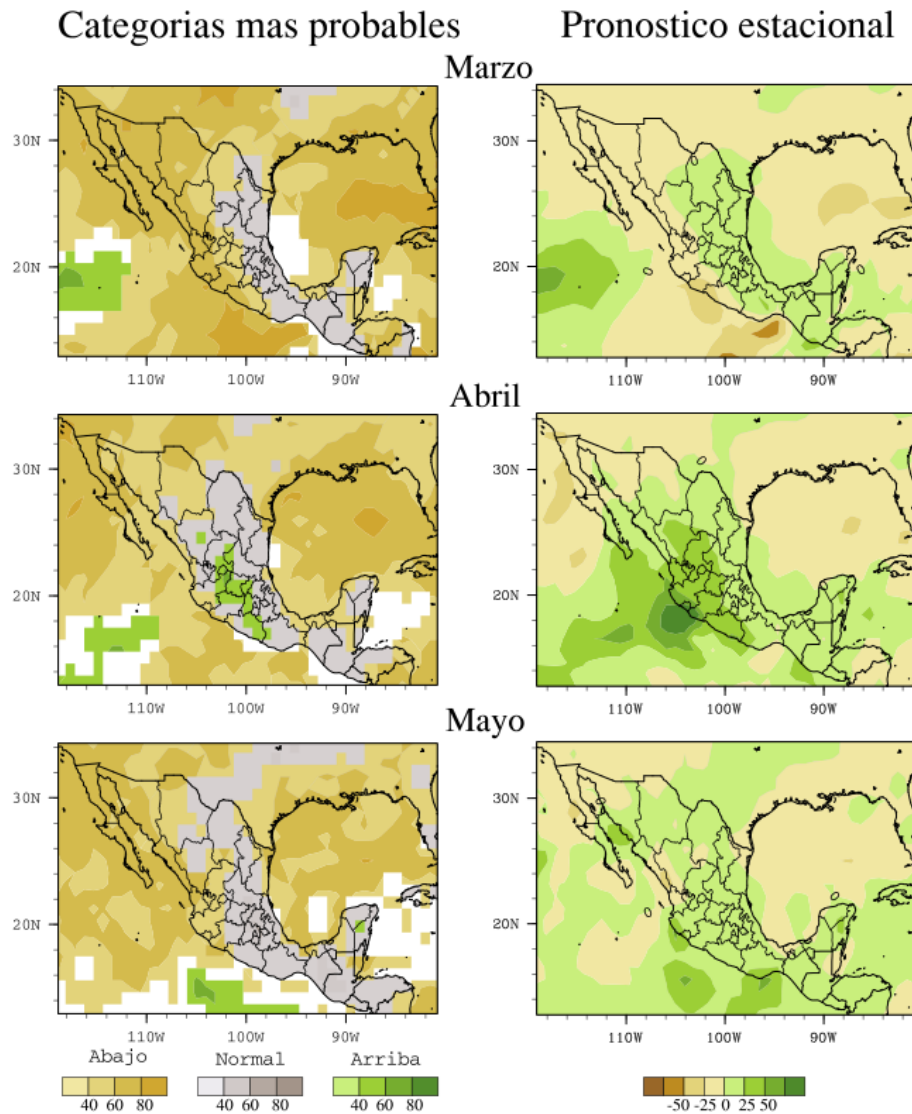


Figura 4. 40 Precipitación de marzo a mayo de 2014

La figura 4.39 muestra que las categorías más probables y el pronóstico estacional coinciden en el mes de marzo: varios estados de la república de la zona noreste se encuentran dentro de lo normal, mientras que el resto se encuentra debajo de lo normal; sin embargo en el mes de abril, la mayor parte de la república se encuentra dentro de lo normal, pero en la zona noroeste hay estados que se encuentran arriba de lo normal. En mayo se espera que varios estados estén

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

dentro de lo normal en ambos casos (categorías más probables y pronóstico estacional), con una pequeña parte de Quintana Roo y Yucatán arriba de lo normal.

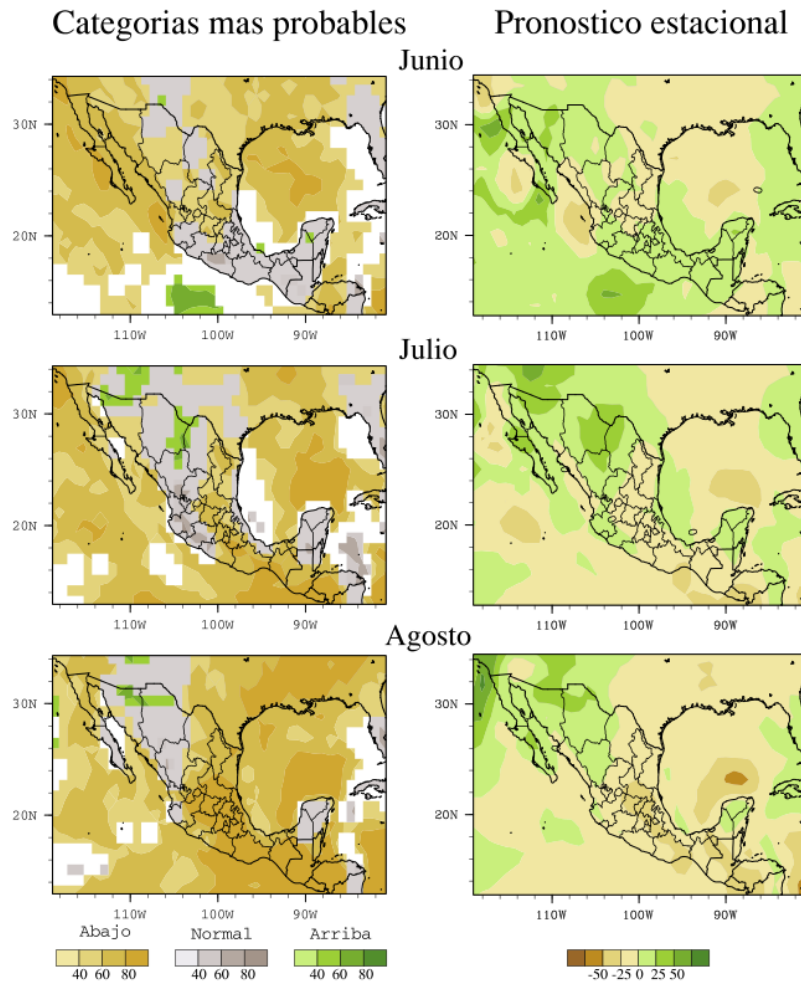


Figura 4. 41 Precipitación junio – agosto de 2014.

En Junio, la zona sur del país se encuentra dentro del rango normal de precipitación, mientras que la mayor parte de la zona norte abajo de lo normal, sin embargo en julio se invirtieron los rangos y la zona norte se encuentra dentro de lo normal y la zona sur debajo de lo normal, con un pequeño porcentaje arriba de lo normal para los estados de Chihuahua, Durango y Coahuila; En agosto la zona sur se mantiene debajo de lo normal y la zona norte dentro de lo normal, y una pequeña parte de Chihuahua y Sonora con una precipitación arriba de lo normal.

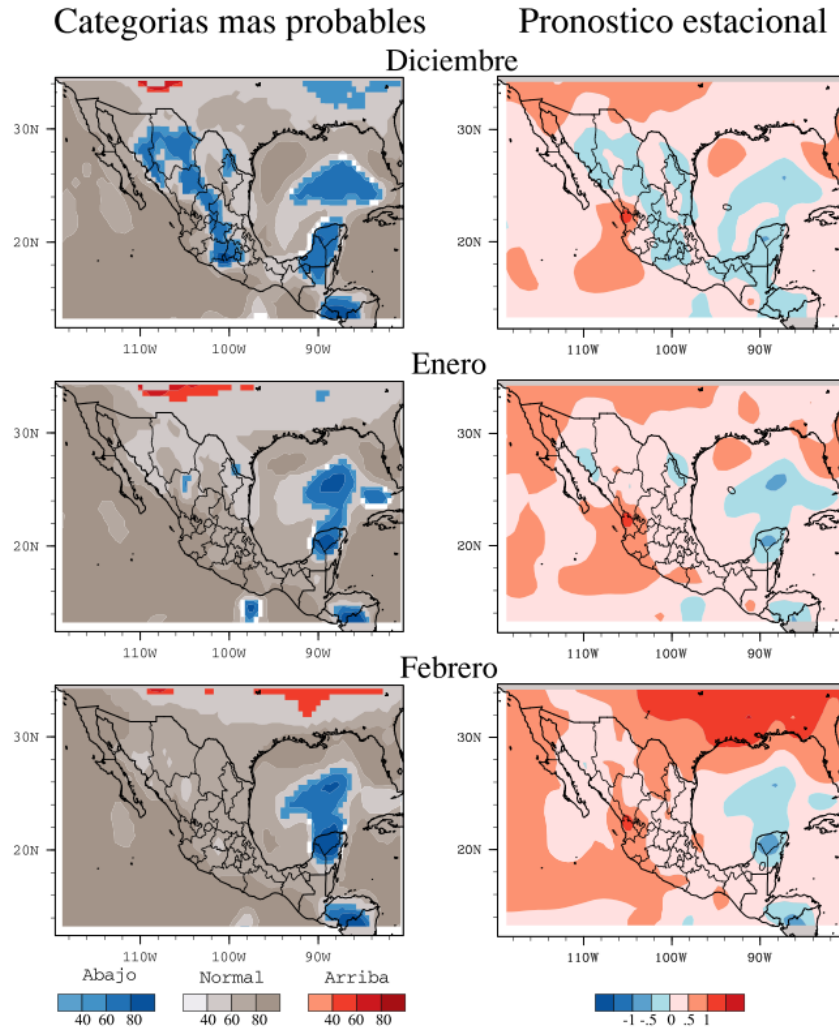


Figura 4. 42 Temperatura máxima de diciembre de 2013 a febrero de 2014.

En la figura anterior se observa que en los estados de sonora, chihuahua, Durango, Sinaloa, Zacatecas, Jalisco y la península de Yucatán, la temperatura se encuentra debajo de lo normal, y el resto del país en el rango dentro de lo normal; mientras que para los meses de enero y febrero sólo la península de Yucatán sigue con temperatura debajo de la normal.

La figura 4.42 muestra que el país se encuentra dentro del rango normal para los tres meses (marzo, abril y mayo), con la excepción de la península de Yucatán que sigue con temperaturas debajo de lo normal.

Categorías mas probables

Pronostico estacional

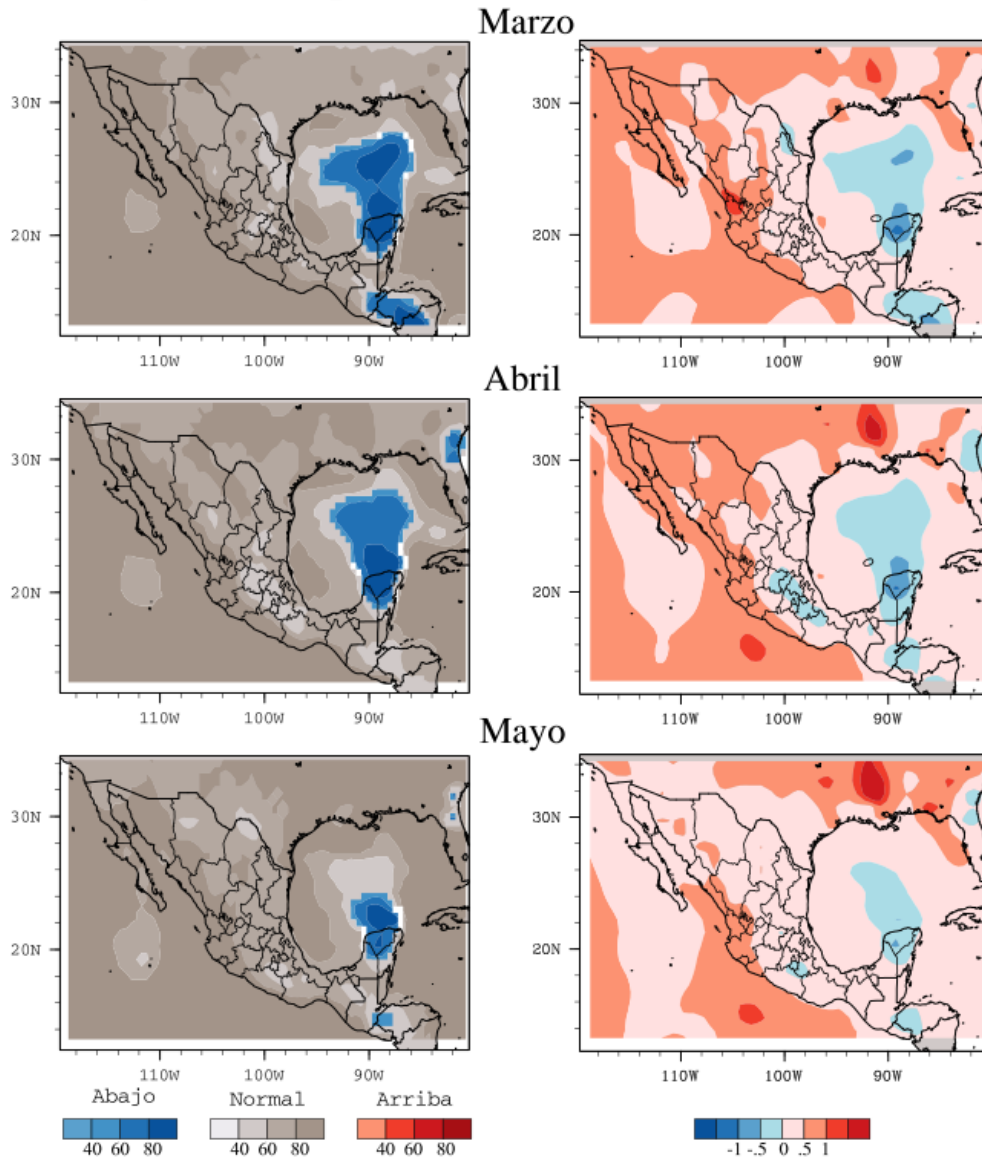


Figura 4. 43 Temperatura máxima de marzo a mayo de 2014

En junio, Durango, Guanajuato y Yucatán están con temperaturas debajo de lo normal en una pequeña parte, sin embargo los meses de julio y agosto el porcentaje de temperatura debajo de lo normal aumenta en los estados mencionados y el resto del país se sigue manteniendo dentro del rango normal,

Categorías más probables

Pronóstico estacional

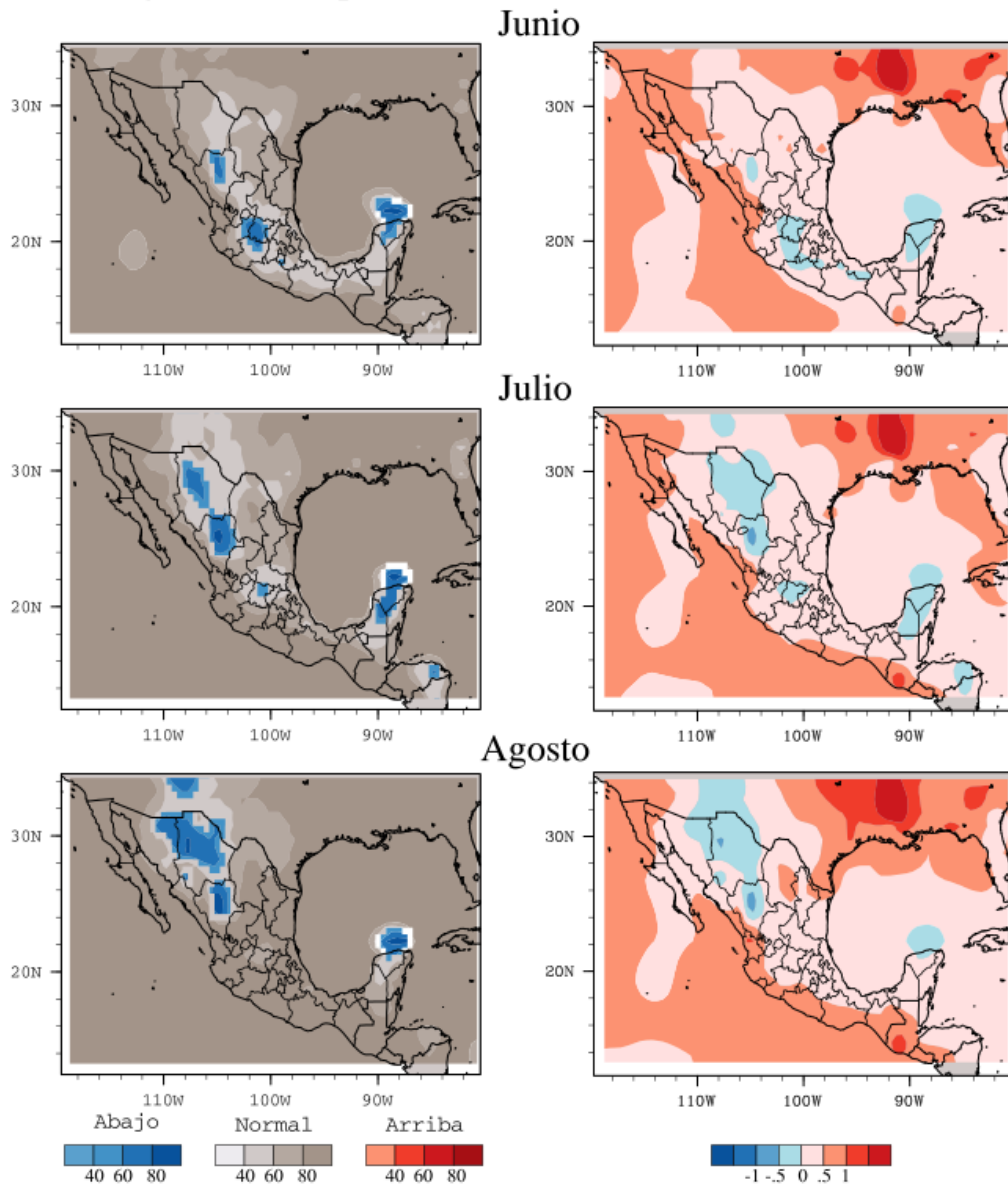


Figura 4. 44 Temperatura máxima de junio - agosto de 2014.

5. Tendencias climáticas

5.1 Introducción

Durante las últimas dos décadas la persistencia de las sequías, en el Norte de nuestro País, han resaltado, una vez más, el gran potencial de peligros y sus impactos que estos fenómenos climáticos han provocado históricamente y que pueden continuar provocando en el futuro.

Esta situación demanda diversas acciones, tales como proponer metodologías que permitan plantear escenarios de sequía de largo plazo (años); revisión bibliográfica de esfuerzos anteriores para formular escenarios de sequía tanto internacionales como nacionales, entre otras y ver la factibilidad de aplicar dichos esfuerzos a nivel nacional.

Aunque existe capacidad para monitorear y posiblemente anticipar el evento de sequía meteorológica para los próximos días y meses (pronóstico estacional, hasta 9 meses) hasta el momento no se cuenta con la capacidad de pronosticar este fenómeno para los próximos años.

Considerando todo lo anterior, una parte de este proyecto se propuso realizar un análisis de metodologías para poder plantear una propuesta de cómo realizar el pronóstico de la sequía para México, a escalas anual y multi-anual. Base fundamental de este estudio fue el análisis de las condiciones actuales y futuras de los procesos climáticos de escala hemisférica asociados con la presencia de sequías en México. En particular se considerará al procesos climático conocido como ENSO.

En este reporte se documentan las actividades realizadas en dos partes una que se documentan en el anexo A, y que cubre los siguientes aspectos básicos:

- a) Información de trabajos relacionados a la sequía en México y a nivel global.
- b) Revisión de la disponibilidad de base de datos:
 - a. De diferentes fuentes con información climática, que puedan servir para evaluar aspectos importantes de las sequías de México ocurridas durante los últimos 100 años.
 - b. Con información meteorológica para el monitoreo para el monitoreo de la sequía
- c) Revisión de las metodologías convencionales en el dominio del tiempo y de la frecuencia:
 - a. De diferentes fuentes con información climática, que puedan servir para evaluar aspectos importantes de las sequías de México ocurridas durante los últimos 100 años.
 - b. Con información meteorológica para el monitoreo para el monitoreo de la sequía

La otra parte, que se documenta a continuación, cubre los aspectos del análisis no lineal (multifractal) de la información climática con dos ejemplos de series de valores locales y otra de procesos climáticos de escala hemisférica.

Al final del reporte se dan las conclusiones generales de todos los aspectos matemáticos y estadísticos del pronóstico climático multi-anual.

5.2 Conceptos multifractales para el análisis de los procesos climáticos

Considerando que en el presente proyecto para estimar tendencias climáticas se utilizarán básicamente modelos multifractales, a continuación se plantean las bases metodológicas correspondientes.

En las aplicaciones los modelos de *cascada* se muestran ubicuos, en especial después de la cascada descrita por Kolmogorov para la transferencia de energía en la turbulencia; caso en que la dimensión puede asumir un continuo de valores de acuerdo con la escala.

Por otra parte y también en las aplicaciones, los conjuntos de datos presentan la imagen de estar esparcidos y ser irregulares, y no existe la posibilidad de introducir una densidad de probabilidad de pertenencia a esos conjuntos. El método alternativo es introducir una medida *multifractal*, lo que se hace generalmente, por medio de una función de estructura, la cual debe ser una función decreciente convexa, normalizada en cero por el valor 1, (Mercado et al., 2014).

La función de estructura, en términos de la variable de escala cuadrática, presenta las cualidades de una función de correlación, por lo que exhibe las características de una función generatriz de momentos, la cual a través de la transformada de Laplace inversa recupera una densidad de probabilidad.

O bien como forma alternativa, se define la función de estructura como combinación lineal de la variable de reiteración s y la función de Kummer desplazada en la unidad $g(s) = {}_1F_1(-s; m+1, m+n+2) - 1$; así que $g(s)$ satisface las tres condiciones $g(0) = 0 = g'(\infty)$, $g(\infty) = -1$; y los dos coeficientes de la combinación lineal deben determinarse para cada caso, (Liu et al., 2003).

En particular, en los gráficos hidrológicos sobre precipitaciones, lo que se observa como muy irregulares son las variaciones, por lo que no podría pensarse en

introducir una pendiente, la cual es el valor límite de las variaciones relativas a los incrementos de sus argumentos; pero sirve de ejemplo de una función continua nunca diferenciable. Sin embargo, podemos quedarnos solo con las variaciones que dependen de la posición y los incrementos; en tanto que los incrementos de los argumentos, o lags, sustituirlos por la desviación estándar, tomada como una medida de la variabilidad.

En especial, se introducen los llamados movimientos brownianos fraccionales (fBm) definidos a partir de sus variaciones o fluctuaciones, llamadas ruidos gaussianos fraccionales (fGn). Esas fluctuaciones son estacionarias, con dos estadísticos independientes del índice (intemporales): la media y el variograma, su distribución es gaussiana y además, son estadísticamente autoafines, lo cual se manifiesta como “efecto Hurst”. Sin embargo, no son independientes.

Así que la función de auto covarianza de las fluctuaciones depende solo de los incrementos o lags. Surge la zona de correlación positiva o persistente en donde una fluctuación positiva tiene la tendencia de ser seguida por otra fluctuación también positiva. Las colas de la función de correlación decaen lentamente por lo que representan correlaciones de largo alcance. Y entre mayor sea el exponente Hurst más lenta es la caída y más larga la cola, (Molz et al., 1997).

Se cuenta, por tanto, al menos con dos caminos: o bien una cascada que distribuye una medida de forma binomial y luego pasamos a su función generatriz; o el otro, con el binomio fBm/fGn, y luego estudiamos la correlación.

Como ya se señaló, en los procesos llamados *movimientos brownianos fraccionales* (fBm), los incrementos siguen una distribución gaussiana, pero no son independientes. Sin embargo, se cuenta con otra forma que permite mantener la independencia, la que produce los procesos conocidos como *movimientos Lévy estables* (sLm), y en tanto que si se repara en la dimensión de la gráfica del proceso, se les llaman movimientos Lévy fraccionales (fLm), (Mercado et al. 2002). Pero, entonces, los incrementos son además estacionarios. Y algo más, estos movimientos son autoafines.

Recíprocamente, si se quiere que los incrementos sean autoafines, independientes y estacionarios, se concluye que tienen que ser movimientos Lévy

estables, porque son los únicos, dentro de los autoafines, con esas dos propiedades: independencia y estacionalidad. Las distribuciones estables contienen en particular a la gaussiana, como único caso con varianza finita; y además poseen colas más gruesas y formas más leptocúrticas que la gaussiana, (Embrechts y Maejima, 2000).

En cambio, si pensamos en el comportamiento de los incrementos (fluctuaciones) de la variable aleatoria, tendríamos una secuencia de incrementos independientes e igualmente distribuidos. Si los concebimos desde un ámbito clásico, esto nos conduce a la distribución gaussiana, y nos ubica dentro del movimiento browniano clásico. Lo cual, por otra parte, se obtiene de una ecuación de difusión con difusividad constante normalizada al valor $\frac{1}{2}$.

En el caso de eventos extremos estamos interesados en el desborde de valores umbrales por parte de un proceso aleatorio. Los umbrales pueden fijarse por medio de los índices de avenidas o sequías, (Bras & Rodríguez-Iturbe, 1993). Imaginamos una avenida como un vertedor que derrama sobre cierta longitud, y asumimos que si hay avenida a los dos lados del umbral, habrá correlación centrada en el valor umbral de descarga, y el coeficiente de descarga lo describimos según (Mercado et al., 2014).

5.3 Resultados

A continuación se describen los principales resultados de las diferentes partes del proyecto.

5.3.1 Análisis multifractal de información climática procesada por el CRU

Contamos con los datos publicados de la Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia (Climatic Research Unit, CRU), (Longitud, Latitud)=(-99.25, 25.25). Se observan las desviaciones con respecto a la media y se acumulan. Se tienen 1308 datos desde 1900 al 2007, por mes. En el gráfico que se exhibe como figura (M5.1), se observa que sus variaciones tienen la característica de ser muy irregulares. (Longitud: -99.25, Latitud: 25.25)

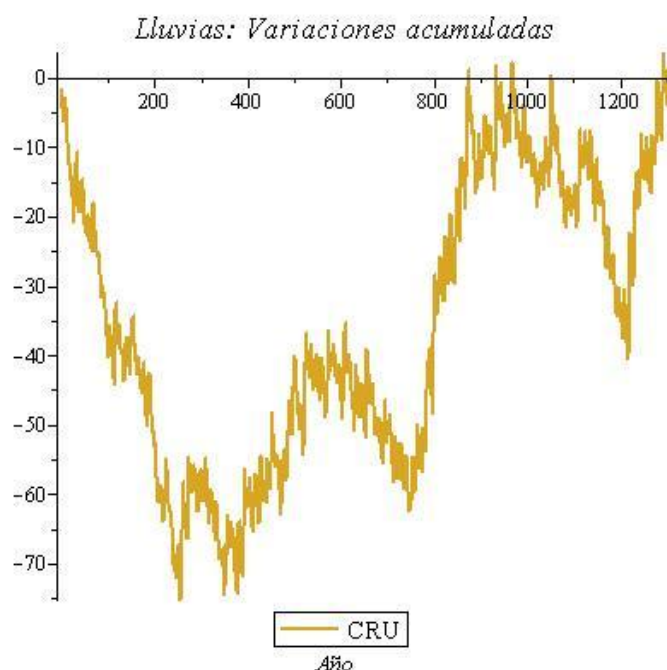


Figura 5. 1 Las variaciones acumuladas CRU.

El análisis estadístico produce los 4 primeros momentos centrales $[430.56, 471.51, 3.1292 \cdot 10^5]$, (el primero es cero) y los dos parámetros de forma: la

asimetría y la curtosis $[0.052777, 1.6893]$. El método de Pearson produce los parámetros clasificatorios $(D,\lambda)=[-5750.9, -0.00086185]$, y dado que son negativos, se concluye que la densidad de la distribución es de tipo I: (aunque el segundo es casi nulo también podría ser de tipo II, con eje de simetría central). Se encuentran los dos exponentes de forma y el de difusión, y se obtiene $[-0.19616, -0.24200, 0.097510]$. Lo cual nos muestra una densidad Beta antimodal, y casi simétrica. Se podría decir que dominan los extremos, o muy subcrítico, muy lento; o muy supercrítico, muy rápido.

Se obtiene la función generatriz y resulta la función Kummer $\text{KummerM}(0.80384, 1.56184, -s^2)$, y en forma gráfica se muestra en la figura (M5.2).

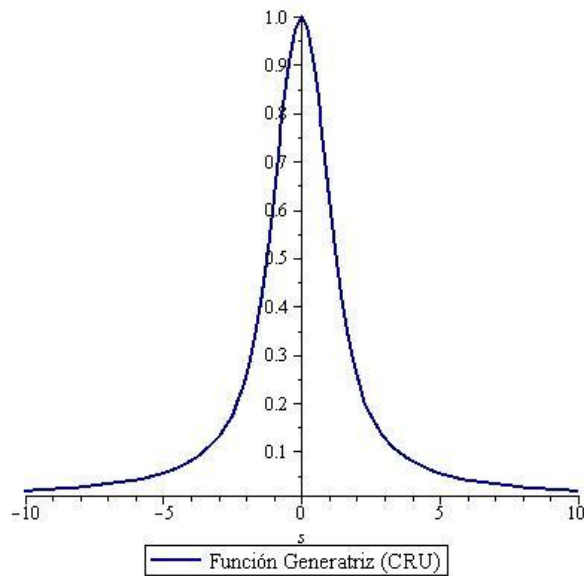


Figura 5.2 La función generatriz dada por la función de Kummer, con parámetros producidos por el método de Pearson.

Por tanto, surge una función característica dada por $\text{KummerM}(0.80384, 1.56184, -s)$; la cual se muestra en la figura (M5.3).

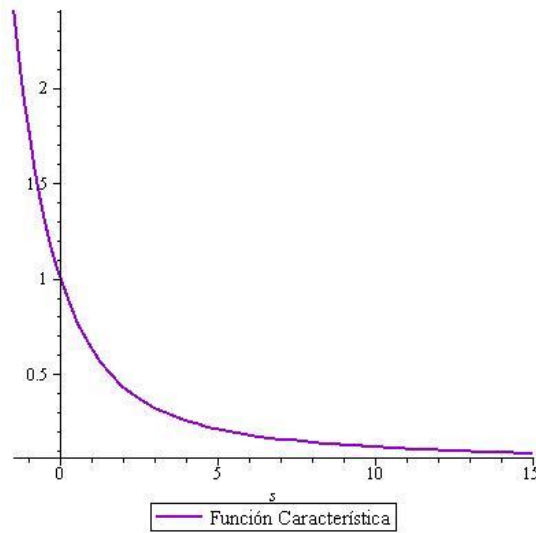


Figura 5. 3 Función característica dada a través de la función Kummer con parámetros determinados por el método de Pearson.

A continuación, se encuentran los exponentes de las singularidades que le dan el sustento y caracterizan una estructura multifractal; éstos se exhiben en la figura (M5.4)

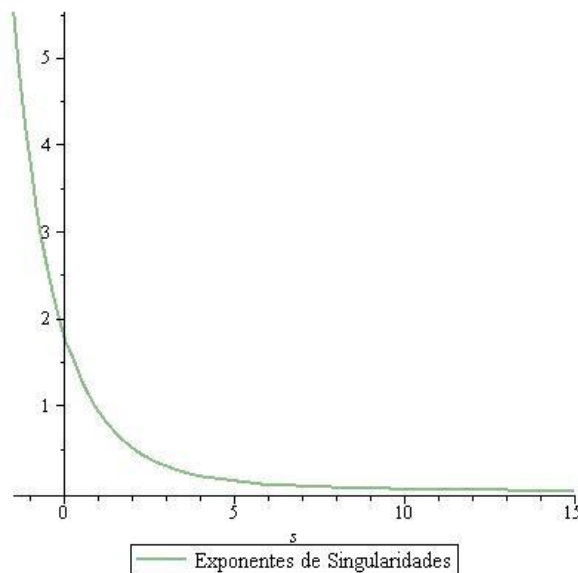


Figura 5. 45 Los exponentes de las singularidades o conjunto de dimensiones locales.

En seguida se halla el espectro de las singularidades, en donde el espectro se da implícitamente, poniendo en el eje horizontal las singularidades, y en eje vertical, el espectro. Se presenta en la figura (M5.5).

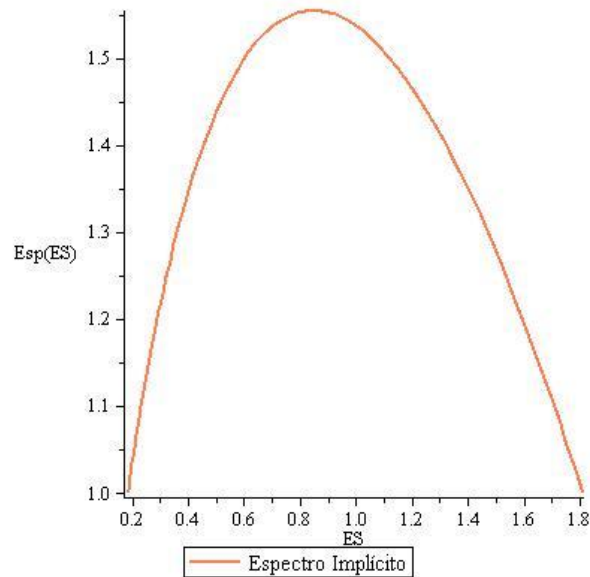


Figura 5. 4 El espectro multifractal, en la horizontal las singularidades, y en la vertical del espectro.

En forma complementaria, es posible diseñar un proceso de cascada que aproxime a la función generatriz por lo menos en el rango de valores de interés. Se trata de un multifractal binomial dependiente de 4 argumentos; de los cuales se fija 1, pero también hay una relación entre los dos primeros por lo que en definitiva resulta depender sólo de dos argumentos $(p, q, b, s) = (p, 1 - p, 3, s)$, siendo el primero llamado *probabilidad de éxito*. A continuación, aproximamos la función generatriz CRU por lo menos hasta $s=1.2$; se encuentra la dimensión de información 0.62740, lo que corresponde al tamaño del cubo en donde se concentra la medida; a continuación se halla la probabilidad de éxito que le sea compatible 0.15713, al interpretarla como tirante relativo produce 0.18642, lo que corresponde a un régimen subcrítico. Se construye la gráfica, misma que se aprecia en la figura (M5.6).

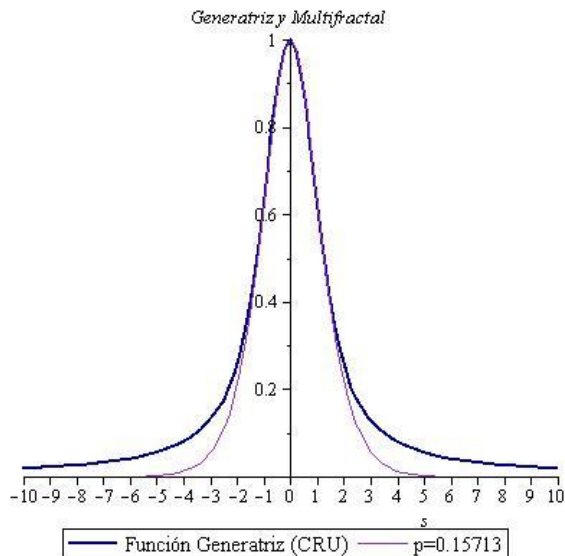


Figura 5. 5 Comparación entre la función generatriz y el espectro en función de la variable de escala para un multifractal binomial.

Transformada “wavelet”

Los procesos aleatorios con índice en el tiempo, en lugar de la posición, dan lugar a las gráficas conocidas como *series de tiempo*. Importa encontrar patrones, rangos periódicos, discontinuidades, irregularidades y otros rasgos similares que podríamos denominar genéricamente *singularidades*. Basados en el teorema de Proyección para espacios de energía o Hilbert, y de una manera similar a la descomposición de Reynolds pero reiterada, se trata de descomponer la señal en dos proyecciones: una más regular y otra más irregular, o bien en tendencia y fluctuación, y luego reiterar el proceso en forma de cascada sobre la componente más regular. Por lo que partiendo de una señal en un espacio original se van generando sus versiones escaladas sobre sub-espacios cada vez más regulares. Por otra parte, el espacio original cuenta con alguna base de funciones ortonormales cuyas versiones escaladas se constituyen en las respectivas bases ortonormales de los sub-espacios escalados, y esas funciones gozan de la propiedad de densidad en sus respectivos espacios y son conocidas como *wavelets* u ondículas. Se trata entonces de encontrar las singularidades a diferentes escalas que la señal contiene, por la aplicación reiterada de una transformada wavelet discreta, (Meyer, 1993), (Louis et al., 1997), (Chui, 1997).

Aplicamos la transformada wavelet discreta a través de las ondículas de Coifman 6, y encontramos que se observa una singularidad cercana al dato 650, que corresponde a febrero 1955, en la gráfica de las variaciones acumulada figura (5.1), se observa una tendencia en caída; en tanto en los datos se verifica un cero en el dato 648, diciembre del 54:

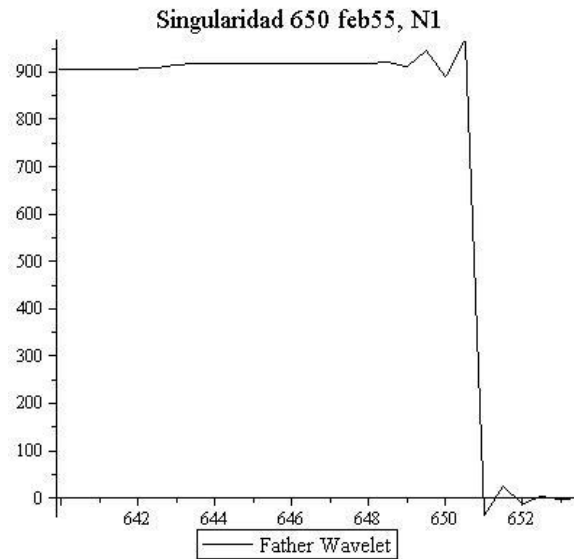


Figura 5. 6 El nivel 1 de la transformada discreta muestra una singularidad cercana a febrero de 1955.

Buscamos en el siguiente nivel del análisis multiresolución y encontramos otra caída pronunciada. Se constata en los datos que ésta está cerca de septiembre de 1927, y se muestra en la figura (5.8):

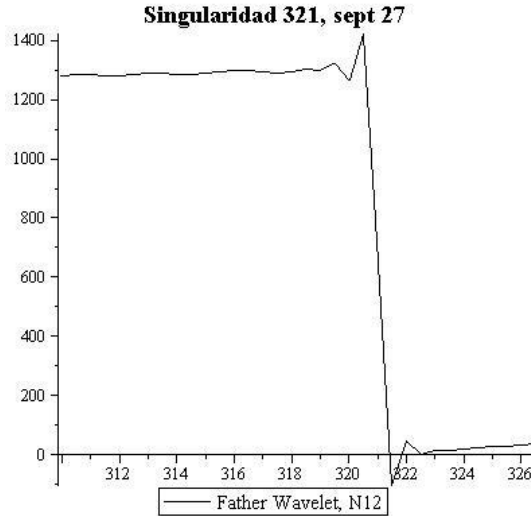


Figura 5. 7 Singularidad del dato 321

Continuamos profundizando el análisis multiresolución y encontramos en el nivel 3 una singularidad pulsante alrededor del dato 235, que corresponde a julio del 1920. Se ilustra en la figura (5.9).

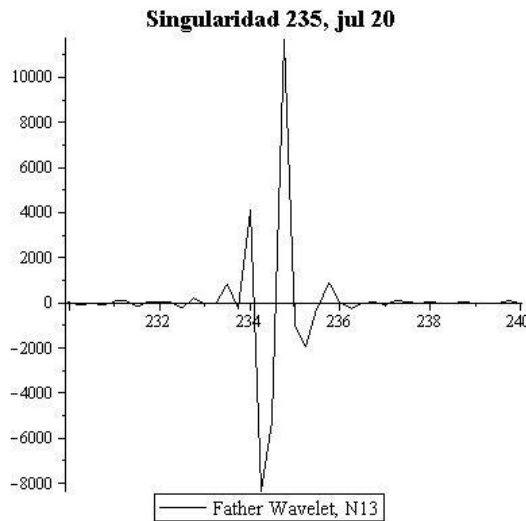


Figura 5. 8 Singularidad pulsante, nivel 3, julio 1920.

Se debe señalar que la primera singularidad se encuentra cerca del máximo de actividad solar registrado en los últimos siglos, este ocurrió en 1957 pero varios años antes comenzó el aumento de dicha actividad.

5.3.2 Análisis multifractal de los procesos climáticos de escala hemisférica ENSO

Se presenta la modelación multifractal del fenómeno presenta un comportamiento (Sánchez-Sesma, 2010). Primero se presentan los datos y los métodos utilizados. Luego se presentan los resultados y las conclusiones

Datos.

Los datos del índice Niño 3 (N3, en adelante) para el último milenio fueron tomados de Mann et al. (2005) y la base de datos IRI (2010), considerando el forzamiento volcánico y solar de forma conjunta, y el forzamiento volcánico de forma aislada. Aquí, el índice N3 es la anomalía en la temperatura de la superficie del mar (en °C) del Pacífico central tropical (5°N-5°S, 150°W-90°W). La Figura 5.1 muestra el promedio de los miembros del ensamble suavizado (EA) de los índices anuales de N3 simulado con forzamiento de las actividades solares y volcánicas (N3SV), también muestra N3 simulado únicamente con la actividad volcánica (N3V), y los valores de N3 observados (N3O). El N3SV y N3V son el promedio de los miembros (EA) de 100 realizaciones del modelo ZC con el forzamiento solar más el forzamiento volcánico, y el forzamiento volcánico únicamente, respectivamente, mientras que el N3o se evaluó anualmente con una media móvil de 13 meses (centrado en Junio), desde 1856 a 2010.

El registro de N3SV obtenido por M05 es considerado como una reconstrucción “proxy” paleoclimática que proporciona información clave sobre la variabilidad pasada de las bajas frecuencias del ENSO. Esto toma en cuenta las “proxy” reconstrucciones del forzamiento de la actividad solar y volcánica, sin embargo, como cualquier otra “proxy” reconstrucción, debe ser calibrada con observaciones, lo cual ya se ha hecho. Además, se comparó favorablemente con otros registros “proxy” reconstruidos a partir de corales (M05). Entonces, como en cualquier otro registro “proxy”, el EA de N3Sv, puede ser extrapolado hacia adelante y hacia atrás, para estimar el clima del ENSO hacia el futuro y el pasado, respectivamente.

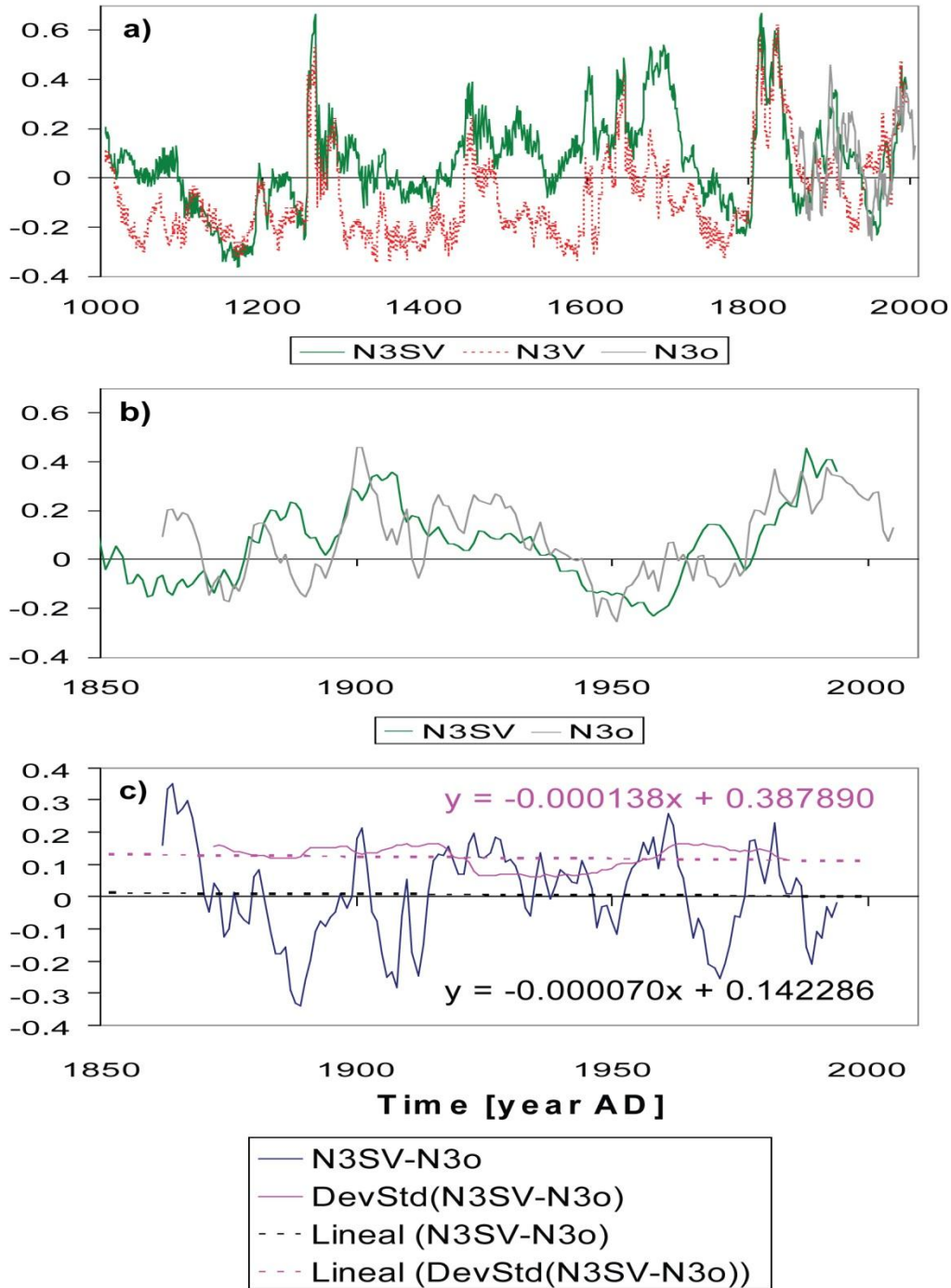


Figura 5. 9 Señales suavizadas de N3 en °C. (a) Información simulada (N3SV y N3SV), obtenida de M05 para los últimos 1,000 años, e información observada (N3O) durante los últimos 150 años, información obtenida de bases de datos de M05 y IRI(2010), respectivamente. Ambas señales se suavizaron con una media móvil de 21 años. (b) Información simulada de $N3_{SV}$ e información observada ($N3_o$) durante los últimos 150 años. (c) Diferencia entre los valores simulados y los valores observados ($N3_{SV}-N3_o$) y su tendencia lineal.

5.3.3 Método de curva de masas

Para amplificar oscilaciones regulares y largas de la señal de ENSO, N , se aplicó una transformación matemática conocida como el método de curva de masas (Smith y Scott, 2005):

$$\eta(t) = \int_{t_0}^t (N(t) - \mu) dt \quad (1)$$

donde, $N(t)$ es la señal de ENSO, $\eta(t)$ es la integral de tiempo del estandarizado N , t es tiempo, t_0 es el tiempo inicial (1000 años DC), y μ es la media a largo plazo de $N(t)$. Una estimación de la mejora de la eficacia de la frecuencia como resultado del método de curva de masas es proporcionada en la información complementaria (**SI**, en adelante), parte A.

Después de modelar y extrapolar $\eta(t)$, entonces es posible predecir sus valores.

De (1) se puede escribir:

$$N(t) = \frac{\partial \eta(t)}{\partial t} + \mu \quad (2)$$

5.3.4 Método de descomposición

Para tomar en cuenta las contribuciones de las diferentes escalas de tiempo, la variable transformada se puede descomponer en dos componentes de oscilaciones lineales y no-lineales (de baja y alta frecuencia, respectivamente), con la siguiente expresión:

$$\eta(t) = \eta_{SS}(t) + \eta_{FS}(t) + e(t) , \quad (3)$$

Donde $\eta_{FS}(t)$ es el componente de la Serie de Fourier (FS por sus siglas en inglés) debido a las fluctuaciones multi-centenales, $\eta_{SS}(t)$ es el componente no-lineal basado en la auto-similitud, y $e(t)$ es el error. El componente FS puede ser escrito en términos de:

$$\eta_{FS}(t) = \sum_{j=1}^{N_{FS}} \left[a_j \cdot \sin \left(j \frac{2\pi(t - t_{pj})}{P} \right) \right] + e_{FS}(t) , \quad (4)$$

En este caso, P es el periodo básico de FS, N_{FS} representa el número armónicos de FS, j es un término componente del índice, a y t_p son la amplitud y tiempo de fase, t es tiempo, y $e_{FS}(t)$ es el error en este componente.

El componente auto-similar es definido como:

$$\eta_{SS}(t) = \alpha \eta_{SS}(ta) + \beta(t - t_1)/100 + \delta + e_{SS}(t), \quad (5)$$

con

$$t > t_1; \quad ta = \frac{(t - t_1)}{\gamma} + t_0; \quad (6)$$

α es el factor de amplificación, γ es el factor de escala de tiempo, β es la pendiente, δ es la constante aditiva, t_0 y t_1 son los tiempos iniciales para el análisis y los periodos modelados, respectivamente, y $e_{SS}(t)$ es el error de este componente.

Suponiendo un valor de N_{FS} , las constantes a y t_p , y el periodo P , pueden ser evaluados en conjunto después de una regresión multi-lineal que busca un periodo básico de FS que minimice los valores RMS de $e(t)$. El segundo componente de la señal $\eta(t)$ se evalúa con base en la auto-similitud de este componente y una minimización de errores. Los parámetros t_0 , t_1 , α , γ , β y δ se calcularon a través de un proceso iterativo que minimiza los errores.

Sin embargo, un algoritmo de ajuste general se desarrolló en FORTRAN para buscar una solución óptima global. Este algoritmo, supone $N_{FS}=1$ y $t_0=1000$ y evalúa los 9 parámetros (P , t_p , a , b , t_1 , γ , α , δ y β) de nuestro modelo anterior en torno a un conjunto de parámetros previamente obtenidos a través de una minimización de errores RMS. Este algoritmo ha sido de utilidad no solo para volver a estimar nuestro pronóstico de los valores N_{3SV} , sino también para calcular: a) el intervalo de confianza de nuestros valores pronosticados, a través de un proceso repetitivo en retrospectiva basado en datos de diferentes periodos, y b) la evaluación de sensibilidad de los resultados de nuestro modelo para cada una de las constantes seleccionadas.

El registro calculado de η_{3s} para el último milenio (Figura 5.11a) muestra una oscilación con el pico máximo de acumulación encontrado durante los años 1050 y

1920, mientras que el pico mínimo de acumulación encontrado se encuentra alrededor de 1430. Una función FS con $NF=1$ fue ajustada al registro de $\eta 3_s$. Esta función (componente 1 o c1), que estadísticamente explica el 89.5% de la varianza de $\eta 3_s$ también se representa en la Figura 5.11a.

Posteriormente, el residuo de $\eta 3_s$ después del componente FS fue eliminado (Figura 5.11b) muestra oscilaciones de escala de siglos con periodos decrecientes. Las oscilaciones con periodo de alrededor de 180 años dominaron de 1100 a 1700, mientras que oscilaciones con un periodo de alrededor de 83-años dominaron desde 1700 hasta el presente. Este residuo muestra una oscilación de escala centenal auto-similar con una disminución en los periodos, en donde los primeros siete siglos, 11-17 (años 1000 – 1600), son análogos a los últimos tres siglos, 18-20 (años 1700 – 1999). Luego, mediante la aplicación del modelo no-lineal al residuo (véase Eq. 5 y 6, con $\alpha=1, \gamma=0.45, t_0=1000$, y $t_1=1700$), el componente 2 se presenta (c2), explicando más del 71% de la varianza del mismo residuo, durante los últimos tres siglos.

Los registros observados y modelados de $\eta 3_s$ para el último milenio se muestran en la Figura 5.11c. Donde, el modelo de $\eta 3_s$ es la suma de la FS lineal (c1) y los componentes no-lineales (c2) auto-similares (c1+c2), y explica el 91.5% de la varianza de $\eta 3_s$ para el último milenio. Esta suma fue evaluada para el periodo de 1700 a 2130 DC, sin embargo, para antes y después de este periodo, solo la función seno es considerada.

La diferenciación del modelo $\eta 3_s$ superpuesto a los registros originales simulados de $N3s$ y la suavización de datos de media móvil de 21 años se muestran en la Figura 5.12. Esta figura también muestra la reconstrucción de la señal $N3$ basada únicamente en el componente del modelo no-lineal c2 (sin el componente del modelo lineal de 865 años o c1), con resultados similares a aquellos obtenidos al usar el modelo completo.

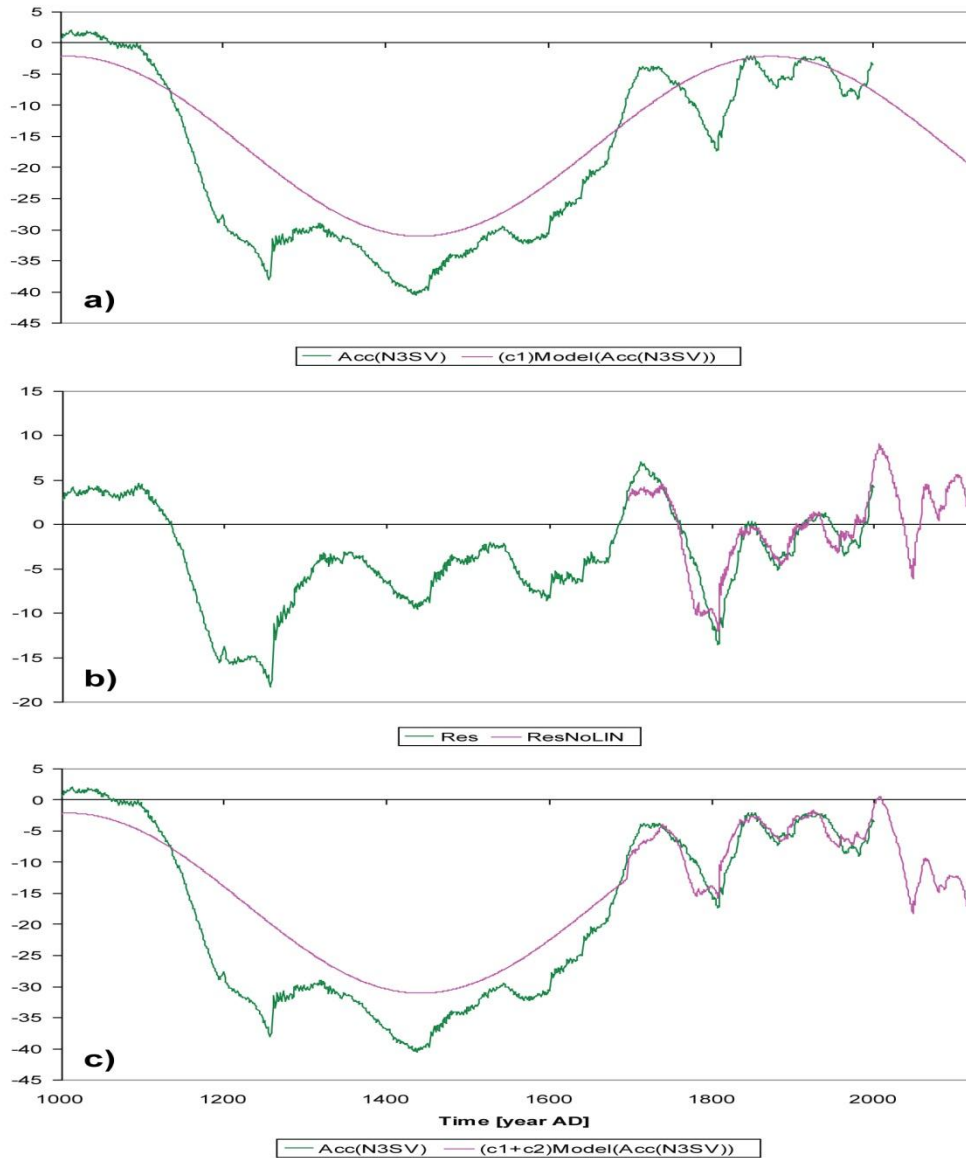


Figura 5. 10 (a) Información acumulada de N3s () y su modelo simple (c1, véase Eq. 3 y 4), obtenido de la base de datos M05 y un modelo FS con NF=1, un periodo de 908 años, respectivamente. (b) Información del residuo acumulado de N3s () después de eliminar el componente del milenio (c1, oscilación de 908 años). También se muestra un modelo simple no-lineal (c2, Eq. 3, 5 y 6), con $\alpha = 1$, $\gamma = 0.45$ (véase Eq. 2-4), $t_0 = 1000$, y $t_1 = 1700$. (c) Información acumulada de N3s ($\eta 3_s$) y su modelo simple completo [c1 +c2, véase (a) y (b)].

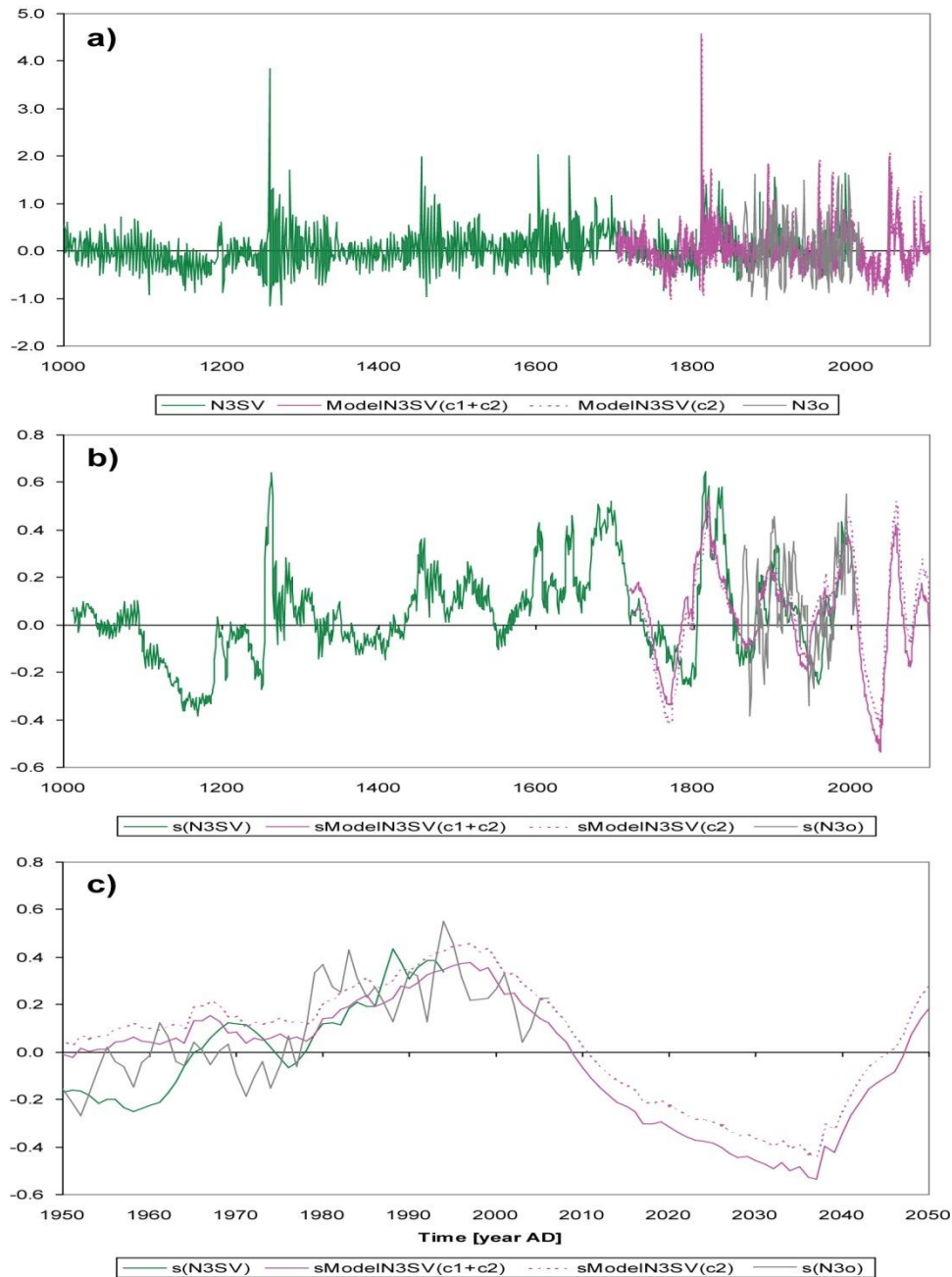


Figura 5. 11 Comparación de tres registros anuales promedio N3. Simulación de 1000-1999 DC, con el modelo CZ (nEnsemble), y obtenida a partir de la diferenciación de la señal acumulada obtenida del modelado de dos componentes, FS y SS ($c1+c2$ =modelo Lineal + modelo No-Lineal) (Figura 3c), 1700-2140 DC, y obtenida únicamente del componente SS (c2, No-lineal), 1700-2140 DC. (a) Valores, (b) valores suavizados (media móvil de 21 años); y (c) una ampliación de los valores suavizados durante 1900-2100 DC. También se muestra el promedio móvil de los valores observados suavizados (N3o) para los últimos 150 años.

Conclusiones

Se ha realizado la revisión de los diversos índices o indicadores de la sequía empleados por el SMN y elaborados por diversas instituciones de Estados Unidos, México y otras partes del mundo, así como la definición del monitor de sequía, cada método refleja la gravedad o intensidad de la sequía de acuerdo a su propia clasificación, pero estos índices no tienen la capacidad de sustituir la supervisión de la sequía de forma local por algún centro o investigador en la respectiva área.

Para monitorear la sequía en México se trabaja con algunos métodos que en su mayoría son realizados por instituciones de EU, así que ellos determinan en su mayoría los parámetros utilizados, lo que puede no llegar a ser conveniente su aplicación en nuestro país sin una validación previa.

Emplear metodologías de percepción remota con alta resolución para el monitoreo constante de la humedad del suelo, parece ser un mecanismo altamente eficiente, sin llegar al abuso de la aplicación ya que todavía existen múltiples factores que pueden producir llegar a conclusiones erróneas sin el debido cuidado.

El IRI se basa en las condiciones de su modelo de ensamble de precipitación para la generación de la perspectiva de sequía en mapas probabilísticos de acuerdo al indicador del SPI, para realizar a su perspectiva de uno, tres, o seis meses de perspectiva. Cabe resaltar la facilidad de reproducción del método en cuanto al indicador SPI empleado y su perspectiva probabilística, además se encuentra el código libre, el cual podría ser adaptado.

Es de notar que si bien la perspectiva de la sequía no toma en cuenta alguna consideración inicial de criterios previos sobre el estado de sequía en alguna región y solo se basa en las probabilidad de sequía determinada por el indicador de sequía SPI, otra de la situaciones que no fue presentado fue lo esperado por el modelo de ensamble de temperatura. Así que no podría considerarse como una perspectiva auxiliar para generar el producto final.

En este reporte fue presentada la metodología de la perspectiva de sequía mensual y estacional del CPC, que muestra un amplio desarrollo evolutivo, esta perspectiva depende de las condiciones iniciales provistas por el monitor de sequía, posteriormente de modelos de pronóstico estadísticos, dinámicos y del estado de indicadores como el ENSO, la oscilación Madden-Julian (MJO), la Oscilación del Ártico (OA), del Atlántico Norte (NAO), Oscilación Décadal del Pacífico (PDO), así como el uso de eventos de años pasados (años análogos) y para que finalmente el criterio del pronosticador realice una inspección de las condiciones y realice la perspectiva de sequía.

Se realizó una muestra de la metodología presentada desde su página web y otras herramientas auxiliares de otras instituciones los criterios finales de la generación de la perspectiva y la generación de la verificación de la perspectiva estacional que se plantea se evalúa solo al final de la temporada de previsión de acuerdo a las regiones señaladas.

La perspectiva determinística de sequía del CPC es muy completa desde las consideraciones iniciales para la generación de delimitar las áreas de persistencia, mejoramiento, disipación y generación de sequía, detalles que la hacen apropiada para todo público sin ahondar en detalles debido a las deficiencias que pudieran producir las perspectivas iniciales de temperatura, precipitación y humedad del suelo.

Para la aplicación o reproducción en el país depende fuertemente de la generación constante del monitor de sequía con sus indicadores, aplicados con parámetros de acuerdo a nuestras latitudes (Palmer, PDSI). Manteniendo una base de datos de estaciones que registren principalmente temperatura y precipitación con antigüedad y con un gran porcentaje de datos, que se actualice día con día y además se pueda seguir incorporando estaciones.

Otro factor para la determinación de la gravedad de la sequía es la determinación de umbrales en el país, para la delimitación de sequía meteorológica, agrícola e hidrológica.

Siguiendo el esquema de trabajo planteado por el CPC, para la generación de perspectivas de sequía, es fundamental establecer o generar productos oficiales en el país de temperatura y precipitación, para realizar inferencias para la generación de un producto de sequía, que pudiera ser determinista, probabilístico o con intervalos de error relacionados con rangos de severidad de sequía (D0 a D4).

Para la generación de la perspectiva de temperatura y precipitación, es posible utilizar modelos dinámicos en modo ensamble que se encuentran libremente como colaboración de diferentes países, como el GEFs, NAEFS, NMME, IMME, modelo Europeo. Modelos estadísticos como el uso de años análogos, análisis de correlación canónica, modelos de la humedad del suelo, para realizar una estimación del grado de severidad de la sequía, así como la disposición de almacenaje de agua en presas para la disposición de agua.

El mecanismo de generación de perspectiva de sequía empleado por el IRI, podría ser más factible de acuerdo a la falta de productos e infraestructura como la utilizada por el CPC. El uso de modelos de ensamble de precipitación y temperatura para la generación de perspectivas por medio de indicadores de

sequía como lo es el SPI, Palmer y Porcentaje de la precipitación, todos con la respectiva determinación de sus umbrales aplicados al país, podría aplicarse con las condiciones iniciales del monitor de sequía de Norteamérica para la generación de perspectivas de sequía.

Otra comportante relevante de este proyecto fue producir el pronóstico estacional a 9 meses con el modelo de circulación general CFS, en la cual se muestra el pronóstico probabilístico de precipitación y temperatura máxima, esta línea es de suma importancia continuar trabajando ya que es uno de los elementos de entrada para poder conseguir los escenarios de sequía que se quieren lograr.

Anexo A (Código fuente del punto 1)

Listado de las estaciones meteorológicas utilizadas en el cálculo de índices de Palmer y de Precipitación Estandarizado mostrados en el NADM.

MX	0001001	21.870	-102.300	AGUASCALIENTES.
MX	0002072	31.883	-116.600	ENSENADA
MX	0003005	22.880	-109.910	CABO SN.LUCAS
MX	0003030	23.583	-109.550	LA RIBERA
MX	0003035	26.000	-111.330	LORETO-Mulege
MX	0003049	23.817	-110.050	SAN ANTONIO
MX	0003056	23.050	-109.667	SN.J.del CABO
MX	0003061	27.280	-112.250	SANTA ROSALIA.
MX	0003066	23.433	-110.220	TODOS SANTOS
MX	0003074	24.150	-110.367	LA PAZ
MX	0003132	24.958	-111.700	CD. CONSTITUCION-Buenavista (R)
MX	0004003	19.850	-90.550	CAMPECHE
MX	0004004	18.180	-91.050	CANDELARIA
MX	0004008	19.350	-90.720	CHAMPOTON
MX	0004013	19.530	-90.530	HOPELCHEN-Bolenchen
MX	0005024	25.450	-102.167	PARRAS
MX	0005030	27.517	-100.617	P. VENUS CARRANZA
MX	0005033	27.930	-101.233	SABINAS
MX	0005040	25.570	-103.450	TORREON.
MX	0005047	26.883	-101.417	MONCLOVA
MX	0005048	25.450	-100.983	SALTILLO
MX	0006018	19.050	-104.333	MANZANILLO
MX	0006040	19.233	-103.733	COLIMA
MX	0007039	16.650	-93.150	EL BOQUERON
MX	0007102	16.750	-93.550	LAS FLORES
MX	0007164	14.933	-92.267	TAPACHULA
MX	0007166	14.950	-92.120	TALISMAN
MX	0007175	16.033	-93.267	VILLA FLORES
MX	0007202	16.750	-93.120	TUXTLA GUTIERREZ (DGE)
MX	0007205	16.250	-92.117	COMITAN
MX	0008007	27.050	-107.650	BATOPILAS DGE
MX	0008029	27.133	-104.930	CD JIMENEZ-Sierra Mojada (R)
MX	0008040	28.633	-106.067	CHIHUAHUA
MX	0008043	27.400	-108.533	CHINIPAS
MX	0008078	26.933	-105.667	HIDALGO DEL PARRAL
MX	0008107	30.400	-107.920	NVO. CASAS GRANDES-Casas Grandes
MX	0008142	28.950	-107.850	TEMOSACHIC.
MX	0009048	19.400	-99.200	TACUBAYA
MX	0010012	24.783	-103.667	CUENCAME
MX	0010017	24.033	-104.667	DURANGO
MX	0010021	25.580	-105.020	EL PALMITO (P.L.CARDENAS)
MX	0010049	25.250	-104.110	NAZAS
MX	0010090	24.500	-104.750	CANATLAN
MX	0010156	25.350	-105.717	TEPEHUANES
MX	0011009	20.533	-100.817	CELAYA

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

MX	0011024	21.020	-101.250	GUANAJUATO.
MX	0011028	20.683	-101.350	IRAPUATO
MX	0011082	21.217	-100.217	VILLA VICTORIA
MX	0012002	16.833	-99.933	ACAPULCO
MX	0012033	17.550	-99.500	CHILPANCINGO.
MX	0012099	17.570	-101.370	SAN JERONIMO-La Union
MX	0012119	17.783	-98.750	OLINALA
MX	0013022	20.130	-98.750	PACHUCA.
MX	0013074	20.483	-99.217	IXMIQUILPAN
MX	0013084	19.917	-99.317	PRESA REQUENA
MX	0014066	20.667	-103.383	GUADALAJARA
MX	0015126	19.300	-99.667	TOLUCA
MX	0016080	19.700	-101.180	MORELIA.
MX	0016144	20.000	-102.283	ZAMORA
MX	0016152	19.700	-100.567	CD. HIDALGO
MX	0017005	18.817	-98.967	CUAUTLA SMN
MX	0017028	18.683	-98.800	JONACATEPEC-Zacatepec
MX	0018001	22.500	-105.367	ACAPONETA
MX	0018039	21.517	-104.883	TEPIC
MX	0019010	26.100	-99.620	CERRALVO- Las Enramadas
MX	0019012	25.950	-100.167	CIENEGA DE FLORES
MX	0019022	25.783	-99.183	GENERAL BRAVO
MX	0019025	25.967	-100.017	HIGUERAS
MX	0019048	25.200	-99.830	MONTEMORELOS
MX	0019052	25.667	-100.300	MONTERREY
MX	0020039	16.583	-95.100	IXTEPEC
MX	0020042	17.867	-96.200	JACATEPEC
MX	0020078	17.067	-96.733	OAXACA
MX	0020092	15.667	-96.517	PUERTO ANGEL
MX	0020149	16.333	-95.233	TEHUANTEPEC
MX	0020152	18.250	-96.400	TEMASCAL
MX	0020298	17.800	-97.767	HUAHUAPAN DE LEON
MX	0021024	18.517	-98.570	CHIETLA
MX	0021065	19.033	-98.200	PUEBLA
MX	0021118	20.183	-98.050	HUACHINANGO
MX	0022063	20.583	-100.383	QUERETARO
MX	0023005	18.483	-88.300	CHETUMAL.
MX	0024070	22.150	-100.967	SAN LUIS POTOSI
MX	0025015	24.800	-107.400	CULIACAN
MX	0025019	26.717	-108.317	CHOIX
MX	0025023	26.433	-108.617	ELFUERTE
MX	0025044	26.900	-108.367	HUITES
MX	0025045	23.950	-106.620	IXPALINO
MX	0025062	23.200	-106.417	MAZATLAN
MX	0025081	24.480	-107.133	SANALONA
MX	0025110	25.367	-107.550	BADIRAGUATO
MX	0026020	27.500	-109.933	CD. OBREGON
MX	0026031	28.967	-109.630	NOVILLO II-El Aguila-La Estrella
MX	0026039	27.983	-110.767	EMPALME
MX	0026040	29.100	-110.967	HERMOSILLO OF

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

MX	0026059	30.367	-109.680	NACUZARI-Moctezuma (R)
MX	0026069	30.450	-109.383	PSA. LA ANGOSTURA
MX	0026091	27.217	-109.120	PRESA CORTINES-Quiriego
MX	0026092	30.867	-111.530	PRESA CUAUHTEMOC-Atil
MX	0027044	17.550	-92.950	TEAPA
MX	0027083	17.983	-92.933	VILLAHERMOSA
MX	0028001	24.067	-98.383	ABASOLO
MX	0028012	22.717	-98.970	P. SACA DE AGUA-Elena-Mante
MX	0028028	24.100	-99.130	EL BARRETAL
MX	0028070	24.000	-98.780	PADILLA
MX	0028086	24.850	-98.167	SAN FERNANDO
MX	0028092	23.770	-98.200	SOTO LA MARINA.
MX	0028110	22.217	-97.867	TAMPICO
MX	0028165	23.767	-99.133	CIUDAD VICTORIA.
MX	0029002	19.417	-98.150	APIZACO
MX	0029031	19.300	-98.230	TLAXCALA.
MX	0030066	19.150	-96.950	HUATUSCO
MX	0030075	19.550	-96.920	JALAPA.
MX	0030120	18.850	-97.100	ORIZABA-Coscomatepec
MX	0030192	19.200	-96.133	VERACRUZ
MX	0030229	20.950	-97.400	TUXPAN
MX	0031019	20.967	-89.600	MERIDA
MX	0031023	21.267	-89.617	PROGRESO
MX	0031042	20.700	-88.217	VALLADOLID
MX	0032031	22.783	-102.567	ZACATECAS
MX	0032115	23.633	-103.650	SOMBRETE-Chalchihuites
MX	0032121	23.700	-102.520	GUADALUPE-Nieves
MX	0024010	22.200	-101.000	CHARCAS
MX	0030027	18.100	-94.400	COATZACOALCOS
MX	0014032	22.130	-103.250	COLOTLAN
MX	0026034	26.940	-109.690	ETCHOJOA
MX	0028038	24.230	-99.550	HIDALGO
MX	0002033	32.420	-115.290	MEXICALI
MX	0026053	27.560	-109.960	P.A. OBREGOA
MX	0020082	16.500	-94.400	OSTUTA
MX	0024062	22.010	-100.050	RIO VERDE
MX	0002069	32.270	-116.400	VALLE DE LAS PALMAS
US	0022140	31.350	-110.250	Coronado N M Hdqtrs, AZ
US	0022664	31.467	-109.600	Douglas FCWOS, AZ
US	0026132	31.950	-112.800	Organ Pipe Cactus N M, AZ
US	0029652	32.617	-114.650	Yuma Citrus Station, AZ
US	0029660	32.667	-114.600	Yuma WSO AP
US	0029662	32.730	-114.620	Yuma WB City
US	0041288	32.683	-115.467	Calexico 2 NE, CA
US	0047740	32.733	-117.167	San Diego WSO AP, CA
US	0293775	31.933	-108.317	Hachita, NM
US	0411416	30.133	-104.683	Candelaria, TX
US	0411715	29.267	-103.300	Chisos Basin, TX
US	0412360	29.383	-100.933	Del Rio AP, TX
US	0412679	28.717	-100.483	Eagle Pass, TX

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

US 0412797 31.817 -106.383 El Paso AP, TX
US 0413943 26.200 -97.667 Harlingen, TX
US 0415060 27.567 -99.500 Laredo 2, TX (415057 for 1947-1964)

US 0418022 30.150 -102.400 Sanderson, TX

Anexo B (Código fuente del punto 4)

Anexo (Programa para cambiar el tipo de variable de short a double).

```
#!/bin/sh
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/01_enero_2013/  
for i in *2013.nc  
do  
  todo=`ls ${i}`  
  cfirst=${#todo}  
  name=${todo:0:$cfirst-3}  
  ncea $todo $name"_conv.nc"  
  echo "----- Enero -----"  
done
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/02_febrero_2013/  
for i in *2013.nc  
do  
  todo=`ls ${i}`  
  cfirst=${#todo}  
  name=${todo:0:$cfirst-3}  
  ncea $todo $name"_conv.nc"  
  echo "----- Febrero -----"  
done
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/03_marzo_2013/  
for i in *2013.nc  
do  
  todo=`ls ${i}`  
  cfirst=${#todo}  
  name=${todo:0:$cfirst-3}  
  ncea $todo $name"_conv.nc"  
  echo "----- Marzo -----"  
done
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/04_abril_2013/  
for i in *2013.nc  
do  
  todo=`ls ${i}`  
  cfirst=${#todo}
```

```

    name=${todo:0:$cfirst-3}
    ncea $todo $name"_conv.nc"
    echo "----- Abril -----"
done

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/05_mayo_2013/
for i in *2013.nc
do
    todo=`ls ${i}`
    cfirst=${#todo}
    name=${todo:0:$cfirst-3}
    ncea $todo $name"_conv.nc"
    echo "----- Mayo -----"
done

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/06_junio_2012/
for i in *2012.nc
do
    todo=`ls ${i}`
    cfirst=${#todo}
    name=${todo:0:$cfirst-3}
    ncea $todo $name"_conv.nc"
    echo "----- Junio 2012-----"
done

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/06_junio_2013/
for i in *2013.nc
do
    todo=`ls ${i}`
    cfirst=${#todo}
    name=${todo:0:$cfirst-3}
    ncea $todo $name"_conv.nc"
    echo "----- Junio 2013-----"
done

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/07_julio_2012/
for i in *2012.nc
do
    todo=`ls ${i}`
    cfirst=${#todo}
    name=${todo:0:$cfirst-3}
    ncea $todo $name"_conv.nc"
    echo "-----Julio -----"
done

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/08_agosto_2012/
for i in *2012.nc
do
todo=`ls ${i}`
cfirst=${#todo}
name=${todo:0:$cfirst-3}
ncea $todo $name"_conv.nc"
echo "----- Agosto -----"
done

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/09_septiembre_2012/
for i in *2012.nc
do
todo=`ls ${i}`
cfirst=${#todo}
name=${todo:0:$cfirst-3}
ncea $todo $name"_conv.nc"
echo "----- Septiembre -----"
done

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/10_octubre_2012/
for i in *2012.nc
do
todo=`ls ${i}`
cfirst=${#todo}
name=${todo:0:$cfirst-3}
ncea $todo $name"_conv.nc"
echo "----- Octubre -----"
done

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/11_noviembre_2012/
for i in *2012.nc
do
todo=`ls ${i}`
cfirst=${#todo}
name=${todo:0:$cfirst-3}
ncea $todo $name"_conv.nc"
echo "----- Noviembre -----"
done

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/12_diciembre_2012/
for i in *2012.nc
do

```

```

todo=`ls ${i}`
cfirst=${#todo}
name=${todo:0:$cfirst-3}
ncea $todo $name"_conv.nc"
echo "----- Diciembre -----"
done

```

Anexo (Programa para interpolar archivos).

```

#!/bin/sh
nc="nc"
match=".nc"
replace="_cut.nc"
fuente="/media/disco_imta/cfs_data/Conchos/mean_mensual/01_enero/ens_mensual_pcp
mmd_201301.nc"

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/01_enero_2013/
for i in *_conv.nc
do
    x=${i/$match/$replace}
    echo ${i}
    cdo -r remapbil,$fuente $i $x
done

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/02_febrero_2013/
for i in *_conv.nc
do
    x=${i/$match/$replace}
    echo ${i}
    cdo -r remapbil,$fuente $i $x
done

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/03_marzo_2013/
for i in *_conv.nc
do
    x=${i/$match/$replace}
    echo ${i}
    cdo -r remapbil,$fuente $i $x
done

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/04_abril_2013/

```

```

for i in *_conv.nc
do
  x=${i/$match/$replace}
  echo ${i}
  cdo -r remapbil,$fuente $i $x
done
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/05_mayo_2013/
for i in *_conv.nc
do
  x=${i/$match/$replace}
  echo ${i}
  cdo -r remapbil,$fuente $i $x
done

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/06_junio_2012/
for i in *_conv.nc
do
  x=${i/$match/$replace}
  echo ${i}
  cdo -r remapbil,$fuente $i $x
done

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/06_junio_2013/
for i in *_conv.nc
do
  x=${i/$match/$replace}
  echo ${i}
  cdo -r remapbil,$fuente $i $x
done

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/07_julio_2012/
for i in *_conv.nc
do
  x=${i/$match/$replace}
  echo ${i}
  cdo -r remapbil,$fuente $i $x
done

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/08_agosto_2012/
for i in *_conv.nc
do
  x=${i/$match/$replace}

```



```
    echo ${i}
    cdo -r remapbil,$fuente $i $x
done
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/09_septiembre_2012/
for i in *_conv.nc
do
    x=${i/$match/$replace}
    echo ${i}
    cdo -r remapbil,$fuente $i $x
```

done

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/10_octubre_2012/
for i in *_conv.nc
do
    x=${i/$match/$replace}
    echo ${i}
    cdo -r remapbil,$fuente $i $x
done
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/11_noviembre_2012/
for i in *_conv.nc
do
    x=${i/$match/$replace}
    echo ${i}
    cdo -r remapbil,$fuente $i $x
done
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/12_diciembre_2012/
for i in *_conv.nc
do
    x=${i/$match/$replace}
    echo ${i}
    cdo -r remapbil,$fuente $i $x
done
```

Anexo (Programa para cambiar unidades, mm/d y C para precipitación y temperatura respectivamente).

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/01_enero_2013
for i in *cut.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}
  cdo -r mulc,1000 $todo $name"_mm.nc"
  ncatted -O -h -a units,tp,m,c,"mm/dia" $name"_mm.nc"

  cdo -r splithour $name"_mm.nc" $name"_t_"
  cdo -r mergetime $name"_t_00.nc" $name"_t_12.nc" salida_2tiempos.nc
  cdo -r daysum salida_2tiempos.nc suma_diaria_enero.nc
done
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/02_febrero_2013
for i in *cut.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}
  cdo -r mulc,1000 $todo $name"_mm.nc"
  ncatted -O -h -a units,tp,m,c,"mm/dia" $name"_mm.nc"

  cdo -r splithour $name"_mm.nc" $name"_t_"
  cdo -r mergetime $name"_t_00.nc" $name"_t_12.nc" salida_2tiempos.nc
  cdo -r daysum salida_2tiempos.nc suma_diaria_febrero.nc
done
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/03_marzo_2013
for i in *cut.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}
  cdo -r mulc,1000 $todo $name"_mm.nc"
  ncatted -O -h -a units,tp,m,c,"mm/dia" $name"_mm.nc"

  cdo -r splithour $name"_mm.nc" $name"_t_"
  cdo -r mergetime $name"_t_00.nc" $name"_t_12.nc" salida_2tiempos.nc
  cdo -r daysum salida_2tiempos.nc suma_diaria_marzo.nc
```

```
done
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/04_abril_2013
for i in *cut.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}
  cdo -r mulc,1000 $todo $name"_mm.nc"
  ncatted -O -h -a units,tp,m,c,"mm/dia" $name"_mm.nc"

  cdo -r splithour $name"_mm.nc" $name"_t_"
  cdo -r mergetime $name"_t_00.nc" $name"_t_12.nc" salida_2tiempos.nc
  cdo -r daysum salida_2tiempos.nc suma_diaria_abril.nc
done
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/05_mayo_2013
for i in *cut.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}
  cdo -r mulc,1000 $todo $name"_mm.nc"
  ncatted -O -h -a units,tp,m,c,"mm/dia" $name"_mm.nc"

  cdo -r splithour $name"_mm.nc" $name"_t_"
  cdo -r mergetime $name"_t_00.nc" $name"_t_12.nc" salida_2tiempos.nc
  cdo -r daysum salida_2tiempos.nc suma_diaria_mayo.nc
done
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/06_junio_2012
for i in *cut.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}
  cdo -r mulc,1000 $todo $name"_mm.nc"
  ncatted -O -h -a units,tp,m,c,"mm/dia" $name"_mm.nc"

  cdo -r splithour $name"_mm.nc" $name"_t_"
  cdo -r mergetime $name"_t_00.nc" $name"_t_12.nc" salida_2tiempos.nc
  cdo -r daysum salida_2tiempos.nc suma_diaria_junio12.nc
done
```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/06_junio_2013
for i in *cut.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}
  cdo -r mulc,1000 $todo $name"_mm.nc"
  ncatted -O -h -a units,tp,m,c,"mm/dia" $name"_mm.nc"

  cdo -r splithour $name"_mm.nc" $name"_t_"
  cdo -r mergetime $name"_t_00.nc" $name"_t_12.nc" salida_2tiempos.nc
  cdo -r daysum salida_2tiempos.nc suma_diaria_junio13.nc
done

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/07_julio_2012
for i in *cut.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}
  cdo -r mulc,1000 $todo $name"_mm.nc"
  ncatted -O -h -a units,tp,m,c,"mm/dia" $name"_mm.nc"

  cdo -r splithour $name"_mm.nc" $name"_t_"
  cdo -r mergetime $name"_t_00.nc" $name"_t_12.nc" salida_2tiempos.nc
  cdo -r daysum salida_2tiempos.nc suma_diaria_julio.nc
done

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/08_agosto_2012
for i in *cut.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}
  cdo -r mulc,1000 $todo $name"_mm.nc"
  ncatted -O -h -a units,tp,m,c,"mm/dia" $name"_mm.nc"

  cdo -r splithour $name"_mm.nc" $name"_t_"
  cdo -r mergetime $name"_t_00.nc" $name"_t_12.nc" salida_2tiempos.nc
  cdo -r daysum salida_2tiempos.nc suma_diaria_agosto.nc

```

```

done

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/09_septiembre_2012
for i in *cut.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}
  cdo -r mulc,1000 $todo $name"_mm.nc"
  ncatted -O -h -a units,tp,m,c,"mm/dia" $name"_mm.nc"

  cdo -r splithour $name"_mm.nc" $name"_t_"
  cdo -r mergetime $name"_t_00.nc" $name"_t_12.nc" salida_2tiempos.nc
  cdo -r daysum salida_2tiempos.nc suma_diaria_septiembre.nc
done

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/10_octubre_2012
for i in *cut.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}
  cdo -r mulc,1000 $todo $name"_mm.nc"
  ncatted -O -h -a units,tp,m,c,"mm/dia" $name"_mm.nc"

  cdo -r splithour $name"_mm.nc" $name"_t_"
  cdo -r mergetime $name"_t_00.nc" $name"_t_12.nc" salida_2tiempos.nc
  cdo -r daysum salida_2tiempos.nc suma_diaria_octubre.nc
done

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/11_noviembre_2012
for i in *cut.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}
  cdo -r mulc,1000 $todo $name"_mm.nc"
  ncatted -O -h -a units,tp,m,c,"mm/dia" $name"_mm.nc"
  cdo -r splithour $name"_mm.nc" $name"_t_"
  cdo -r mergetime $name"_t_00.nc" $name"_t_12.nc" salida_2tiempos.nc
  cdo -r daysum salida_2tiempos.nc suma_diaria_noviembre.nc
done

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/12_diciembre_2012
for i in *cut.nc

```

```

do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}
  cdo -r mulc,1000 $todo $name"_mm.nc"
  ncatted -O -h -a units,tp,m,c,"mm/dia" $name"_mm.nc"

  cdo -r splithour $name"_mm.nc" $name"_t_"
  cdo -r mergetime $name"_t_00.nc" $name"_t_12.nc" salida_2tiempos.nc
  cdo -r daysum salida_2tiempos.nc suma_diaria_diciembre.nc
done

```

Anexo (Programa para calcular la media mensual).

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/01_enero_2013/
for i in salida_2tiempos.nc
do
  cdo -r monmean suma_diaria_enero.nc 01_enero_2013_media_mensual.nc
done

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/02_febrero_2013/
for i in salida_2tiempos.nc
do
  cdo -r monmean suma_diaria_febrero.nc 02_febrero_2013_media_mensual.nc
done

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/03_marzo_2013/
for i in salida_2tiempos.nc
do
  cdo -r monmean suma_diaria_marzo.nc 03_marzo_2013_media_mensual.nc
done

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/04_abril_2013/
for i in salida_2tiempos.nc
do
  cdo -r monmean suma_diaria_abril.nc 04_abril_2013_media_mensual.nc
done

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/05_mayo_2013/
for i in salida_2tiempos.nc
do
  cdo -r monmean suma_diaria_mayo.nc 05_mayo_2013_media_mensual.nc

```

done

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/06_junio_2012/  
for i in salida_2tiempos.nc  
do  
  cdo -r monmean suma_diaria_junio12.nc 06_junio_2012_media_mensual.nc  
done
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/06_junio_2013/  
for i in salida_2tiempos.nc  
do  
  cdo -r monmean suma_diaria_junio13.nc 06_junio_2013_media_mensual.nc  
done
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/07_julio_2012/  
for i in salida_2tiempos.nc  
do  
  cdo -r monmean suma_diaria_julio.nc 07_julio_2012_media_mensual.nc  
done
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/08_agosto_2012/  
for i in salida_2tiempos.nc  
do  
  cdo -r monmean suma_diaria_agosto.nc 08_agosto_2012_media_mensual.nc  
done
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/09_septiembre_2012/  
for i in salida_2tiempos.nc  
do  
  cdo -r monmean suma_diaria_septiembre.nc 09_septiembre_2012_media_mensual.nc  
done
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/10_octubre_2012/  
for i in salida_2tiempos.nc  
do  
  cdo -r monmean suma_diaria_octubre.nc 10_octubre_2012_media_mensual.nc  
done
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/11_noviembre_2012/  
for i in salida_2tiempos.nc  
do  
  cdo -r monmean suma_diaria_noviembre.nc 11_noviembre_2012_media_mensual.nc  
done
```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/12_diciembre_2012/
for i in salida_2tiempos.nc
do
  cdo -r monmean suma_diaria_diciembre.nc 12_diciembre_2012_media_mensual.nc
done

```

Anexo (Programa para recortar regiones: Norte, sur y centro).

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/01_enero_2013/
for i in *media_mensual.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}

  cdo -r sellonlatbox,-109,-104,23,30 $todo $name"_Norte.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Norte.nc" $name"_Norte_media.nc"

  cdo -r sellonlatbox,-102,-97,22,18 $todo $name"_Centro.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Centro.nc" $name"_Centro_media.nc"

  cdo -r sellonlatbox,-96,-90,19,14 $todo $name"_Sur.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Sur.nc" $name"_media.nc"

done
mv *Norte* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Norte
mv *Sur* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Sur
mv *Centro* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Centro
echo"-----"

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/02_febrero_2013/
for i in *media_mensual.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}

  cdo -r sellonlatbox,-109,-104,23,30 $todo $name"_Norte.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Norte.nc" $name"_Norte_media.nc"

  cdo -r sellonlatbox,-102,-97,22,18 $todo $name"_Centro.nc"

```



```

cdo -r fldmean $name"_Centro.nc" $name"_Centro_media.nc"

cdo -r sellonlatbox,-96,-90,19,14 $todo $name"_Sur.nc"
cdo -r fldmean $name"_Sur.nc" $name"_Sur_media.nc"

done
mv *Norte* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Norte
mv *Sur* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Sur
mv *Centro* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Centro
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/03_marzo_2013/
for i in *media_mensual.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}
  cdo -r sellonlatbox,-109,-104,23,30 $todo $name"_Norte.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Norte.nc" $name"_Norte_media.nc"

  cdo -r sellonlatbox,-102,-97,22,18 $todo $name"_Centro.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Centro.nc" $name"_Centro_media.nc"

  cdo -r sellonlatbox,-96,-90,19,14 $todo $name"_Sur.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Sur.nc" $name"_Sur_media.nc"

done
mv *Norte* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Norte
mv *Sur* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Sur
mv *Centro* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Centro

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/04_abril_2013/
for i in *media_mensual.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}

  cdo -r sellonlatbox,-109,-104,23,30 $todo $name"_Norte.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Norte.nc" $name"_Norte_media.nc"

  cdo -r sellonlatbox,-102,-97,22,18 $todo $name"_Centro.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Centro.nc" $name"_Centro_media.nc"

  cdo -r sellonlatbox,-96,-90,19,14 $todo $name"_Sur.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Sur.nc" $name"_Sur_media.nc"

```

```
done
mv *Norte* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Norte
mv *Sur* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Sur
mv *Centro* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Centro
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/05_mayo_2013/
```

```
for i in *media_mensual.nc
```

```
do
```

```
  todo=`ls ${i}`
```

```
  cfirst=${#todo}
```

```
  name=${todo:0:$cfirst-3}
```

```
  cdo -r sellonlatbox,-109,-104,23,30 $todo $name"_Norte.nc"
```

```
  cdo -r fldmean $name"_Norte.nc" $name"_Norte_media.nc"
```

```
  cdo -r sellonlatbox,-102,-97,22,18 $todo $name"_Centro.nc"
```

```
  cdo -r fldmean $name"_Centro.nc" $name"_Centro_media.nc"
```

```
  cdo -r sellonlatbox,-96,-90,19,14 $todo $name"_Sur.nc"
```

```
  cdo -r fldmean $name"_Sur.nc" $name"_Sur_media.nc"
```

```
done
```

```
mv *Norte* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Norte
```

```
mv *Sur* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Sur
```

```
mv *Centro* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Centro
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/06_junio_2012/
```

```
for i in *media_mensual.nc
```

```
do
```

```
  todo=`ls ${i}`
```

```
  cfirst=${#todo}
```

```
  name=${todo:0:$cfirst-3}
```

```
  cdo -r sellonlatbox,-109,-104,23,30 $todo $name"_Norte.nc"
```

```
  cdo -r fldmean $name"_Norte.nc" $name"_Norte_media.nc"
```

```
  cdo -r sellonlatbox,-102,-97,22,18 $todo $name"_Centro.nc"
```

```
  cdo -r fldmean $name"_Centro.nc" $name"_Centro_media.nc"
```

```
  cdo -r sellonlatbox,-96,-90,19,14 $todo $name"_Sur.nc"
```

```
  cdo -r fldmean $name"_Sur.nc" $name"_Sur_media.nc"
```

```
done
```

```
mv *Norte* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Norte
mv *Sur* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Sur
mv *Centro* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Centro
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/06_junio_2013/
for i in *media_mensual.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}

  cdo -r sellonlatbox,-109,-104,23,30 $todo $name"_Norte.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Norte.nc" $name"_Norte_media.nc"

  cdo -r sellonlatbox,-102,-97,22,18 $todo $name"_Centro.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Centro.nc" $name"_Centro_media.nc"

  cdo -r sellonlatbox,-96,-90,19,14 $todo $name"_Sur.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Sur.nc" $name"_Sur_media.nc"

done
mv *Norte* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Norte
mv *Sur* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Sur
mv *Centro* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Centro
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/07_julio_2012/
for i in *media_mensual.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}

  cdo -r sellonlatbox,-109,-104,23,30 $todo $name"_Norte.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Norte.nc" $name"_Norte_media.nc"

  cdo -r sellonlatbox,-102,-97,22,18 $todo $name"_Centro.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Centro.nc" $name"_Centro_media.nc"

  cdo -r sellonlatbox,-96,-90,19,14 $todo $name"_Sur.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Sur.nc" $name"_Sur_media.nc"

done
mv *Norte* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Norte
mv *Sur* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Sur
```

```
mv *Centro* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Centro
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/07_julio_2013/
```

```
for i in *media_mensual.nc
```

```
do
```

```
  todo=`ls ${i}`
```

```
  cfirst=${#todo}
```

```
  name=${todo:0:$cfirst-3}
```

```
  cdo -r sellonlatbox,-109,-104,23,30 $todo $name"_Norte.nc"
```

```
  cdo -r fldmean $name"_Norte.nc" $name"_Norte_media.nc"
```

```
  cdo -r sellonlatbox,-102,-97,22,18 $todo $name"_Centro.nc"
```

```
  cdo -r fldmean $name"_Centro.nc" $name"_Centro_media.nc"
```

```
  cdo -r sellonlatbox,-96,-90,19,14 $todo $name"_Sur.nc"
```

```
  cdo -r fldmean $name"_Sur.nc" $name"_Sur_media.nc"
```

```
done
```

```
mv *Norte* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Norte
```

```
mv *Sur* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Sur
```

```
mv *Centro* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Centro
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/08_agosto_2012/
```

```
for i in *media_mensual.nc
```

```
do
```

```
  todo=`ls ${i}`
```

```
  cfirst=${#todo}
```

```
  name=${todo:0:$cfirst-3}
```

```
  cdo -r sellonlatbox,-109,-104,23,30 $todo $name"_Norte.nc"
```

```
  cdo -r fldmean $name"_Norte.nc" $name"_Norte_media.nc"
```

```
  cdo -r sellonlatbox,-102,-97,22,18 $todo $name"_Centro.nc"
```

```
  cdo -r fldmean $name"_Centro.nc" $name"_Centro_media.nc"
```

```
  cdo -r sellonlatbox,-96,-90,19,14 $todo $name"_Sur.nc"
```

```
  cdo -r fldmean $name"_Sur.nc" $name"_Sur_media.nc"
```

```
done
```

```
mv *Norte* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Norte
```

```
mv *Sur* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Sur
```

```
mv *Centro* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Centro
```

```
cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/09_septiembre_2012/
```

```

for i in *media_mensual.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}

  cdo -r sellonlatbox,-109,-104,23,30 $todo $name"_Norte.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Norte.nc" $name"_Norte_media.nc"

  cdo -r sellonlatbox,-102,-97,22,18 $todo $name"_Centro.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Centro.nc" $name"_Centro_media.nc"

  cdo -r sellonlatbox,-96,-90,19,14 $todo $name"_Sur.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Sur.nc" $name"_Sur_media.nc"

done
mv *Norte* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Norte
mv *Sur* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Sur
mv *Centro* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Centro

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/10_octubre_2012/
for i in *media_mensual.nc
do
  todo=`ls ${i}`
  cfirst=${#todo}
  name=${todo:0:$cfirst-3}

  cdo -r sellonlatbox,-109,-104,23,30 $todo $name"_Norte.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Norte.nc" $name"_Norte_media.nc"

  cdo -r sellonlatbox,-102,-97,22,18 $todo $name"_Centro.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Centro.nc" $name"_Centro_media.nc"

  cdo -r sellonlatbox,-96,-90,19,14 $todo $name"_Sur.nc"
  cdo -r fldmean $name"_Sur.nc" $name"_Sur_media.nc"

done
mv *Norte* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Norte
mv *Sur* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Sur
mv *Centro* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Centro

```

```

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/11_noviembre_2012/
for i in *media_mensual.nc
do

```

```

todo=`ls ${i}`
cfirst=${#todo}
name=${todo:0:$cfirst-3}

cdo -r sellonlatbox,-109,-104,23,30 $todo $name"_Norte.nc"
cdo -r fldmean $name"_Norte.nc" $name"_Norte_media.nc"

cdo -r sellonlatbox,-102,-97,22,18 $todo $name"_Centro.nc"
cdo -r fldmean $name"_Centro.nc" $name"_Centro_media.nc"

cdo -r sellonlatbox,-96,-90,19,14 $todo $name"_Sur.nc"
cdo -r fldmean $name"_Sur.nc" $name"_Sur_media.nc"

done
mv *Norte* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Norte
mv *Sur* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Sur
mv *Centro* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Centro

cd /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/12_diciembre_2012/
for i in *media_mensual.nc
do
todo=`ls ${i}`
cfirst=${#todo}
name=${todo:0:$cfirst-3}

cdo -r sellonlatbox,-109,-104,23,30 $todo $name"_Norte.nc"
cdo -r fldmean $name"_Norte.nc" $name"_Norte_media.nc"

cdo -r sellonlatbox,-102,-97,22,18 $todo $name"_Centro.nc"
cdo -r fldmean $name"_Centro.nc" $name"_Centro_media.nc"

cdo -r sellonlatbox,-96,-90,19,14 $todo $name"_Sur.nc"
cdo -r fldmean $name"_Sur.nc" $name"_Sur_media.nc"

done
mv *Norte* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Norte
mv *Sur* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Sur
mv *Centro* /home/rosario/ERA-Interim/precipitacion/regiones/Centro

```

Anexo (Programa para generar ciclos anuales).

```
#!/usr/bin/Rscript
library(ncdf)
library(plotrix)

#-----
#----- ERA Interim -----
ene13=open.ncdf("/home/rosario/ERA-
Interim/precipitacion/regiones/Centro/01_enero_2013_media_mensual_Centro_media.nc")
feb13=open.ncdf("/home/rosario/ERA-
Interim/precipitacion/regiones/Centro/02_febrero_2013_media_mensual_Centro_media.nc
")
mar13=open.ncdf("/home/rosario/ERA-
Interim/precipitacion/regiones/Centro/03_marzo_2013_media_mensual_Centro_media.nc"
)
abr13=open.ncdf("/home/rosario/ERA-
Interim/precipitacion/regiones/Centro/04_abril_2013_media_mensual_Centro_media.nc")
may13=open.ncdf("/home/rosario/ERA-
Interim/precipitacion/regiones/Centro/05_mayo_2013_media_mensual_Centro_media.nc")
jun13=open.ncdf("/home/rosario/ERA-
Interim/precipitacion/regiones/Centro/06_junio_2013_media_mensual_Centro_media.nc")

jun12=open.ncdf("/home/rosario/ERA-
Interim/precipitacion/regiones/Centro/06_junio_2012_media_mensual_Centro_media.nc")
jul12=open.ncdf("/home/rosario/ERA-
Interim/precipitacion/regiones/Centro/07_julio_2012_media_mensual_Centro_media.nc")
agos12=open.ncdf("/home/rosario/ERA-
Interim/precipitacion/regiones/Centro/08_agosto_2012_media_mensual_Centro_media.nc
")
sep12=open.ncdf("/home/rosario/ERA-
Interim/precipitacion/regiones/Centro/09_septiembre_2012_media_mensual_Centro_medi
a.nc")
oct12=open.ncdf("/home/rosario/ERA-
Interim/precipitacion/regiones/Centro/10_octubre_2012_media_mensual_Centro_media.n
c")
nov12=open.ncdf("/home/rosario/ERA-
Interim/precipitacion/regiones/Centro/11_noviembre_2012_media_mensual_Centro_medi
a.nc")
dic12=open.ncdf("/home/rosario/ERA-
Interim/precipitacion/regiones/Centro/12_diciembre_2012_media_mensual_Centro_media.
nc")
```

```

ene=get.var.ncdf(ene13,"tp")
feb=get.var.ncdf(feb13,"tp")
mar=get.var.ncdf(mar13,"tp")
abr=get.var.ncdf(abr13,"tp")
may=get.var.ncdf(may13,"tp")
jun=get.var.ncdf(jun13,"tp")
#jul=get.var.ncdf(jul13,"tp")
jun122=get.var.ncdf(jun12,"tp")
jul122=get.var.ncdf(jul12,"tp")
ago=get.var.ncdf(agos12,"tp")
sep=get.var.ncdf(sep12,"tp")
oct=get.var.ncdf(oct12,"tp")
nov=get.var.ncdf(nov12,"tp")
dic=get.var.ncdf(dic12,"tp")

```

```

#-----
#----- CFS -----

```

```

c01=open.ncdf("/home/rosario/cfs/regiones/Centro/pcp/01_enero_ens_mensual_pcpmmd_201212_cut_Centro_media.nc") #enero
c02=open.ncdf("/home/rosario/cfs/regiones/Centro/pcp/02_febrero_ens_mensual_pcpmmd_201301_cut_Centro_media.nc") #febrero
c03=open.ncdf("/home/rosario/cfs/regiones/Centro/pcp/03_marzo_ens_mensual_pcpmmd_201302_cut_Centro_media.nc") #marzo
c04=open.ncdf("/home/rosario/cfs/regiones/Centro/pcp/04_abril_ens_mensual_pcpmmd_201303_cut_Centro_media.nc") #abril
c05=open.ncdf("/home/rosario/cfs/regiones/Centro/pcp/05_mayo_ens_mensual_pcpmmd_201304_cut_Centro_media.nc") #mayo
c11=open.ncdf("/home/rosario/cfs/regiones/Centro/pcp/06_junio_ens_mensual_pcpmmd_201305_cut_Centro_media.nc") #junio 2013
c12=open.ncdf("/home/rosario/cfs/regiones/Centro/pcp/07_julio_ens_mensual_pcpmmd_201306_cut_Centro_media.nc") #julio 2013
c06=open.ncdf("/home/rosario/cfs/regiones/Centro/pcp/08_agosto_ens_mensual_pcpmmd_201207_cut_Centro_media.nc") #agosto
c07=open.ncdf("/home/rosario/cfs/regiones/Centro/pcp/09_septiembre_ens_mensual_pcpmmd_201208_cut_Centro_media.nc") #septiembre
c08=open.ncdf("/home/rosario/cfs/regiones/Centro/pcp/10_octubre_ens_mensual_pcpmmd_201209_cut_Centro_media.nc") #octubre
c09=open.ncdf("/home/rosario/cfs/regiones/Centro/pcp/11_noviembre_ens_mensual_pcpmmd_201210_cut_Centro_media.nc") #noviembre
c10=open.ncdf("/home/rosario/cfs/regiones/Centro/pcp/12_diciembre_ens_mensual_pcpmmd_201211_cut_Centro_media.nc") #diciembre

vc01=get.var.ncdf(c01,"PRATE_surface") #enero
vc02=get.var.ncdf(c02,"PRATE_surface") #febrero

```



```

vc03=get.var.ncdf(c03,"PRATE_surface") #marzo
vc04=get.var.ncdf(c04,"PRATE_surface") #abril
vc05=get.var.ncdf(c05,"PRATE_surface") #mayo
vc11=get.var.ncdf(c11,"PRATE_surface") #junio 2013
vc12=get.var.ncdf(c12,"PRATE_surface") #Julio 2013

vc06=get.var.ncdf(c06,"PRATE_surface") #agosto
vc07=get.var.ncdf(c07,"PRATE_surface") #septiembre
vc08=get.var.ncdf(c08,"PRATE_surface") #octubre
vc09=get.var.ncdf(c09,"PRATE_surface") #noviembre
vc10=get.var.ncdf(c10,"PRATE_surface") #diciembre

mes<-
c(jun122[1],jul122[1],ago[1],sep[1],oct[1],nov[1],dic[1],ene[1],feb[1],mar[1],abr[1],may[1],jun
[1])

plot_colors<-
c("Black","gray30","blue","cadetblue4","purple","green","magenta","red","cyan","dodgerblue
2","darkgreen","coral4")
png(file="pre_centro.png",width=700,height=500);
months<-
c("Jun2012","Jul","Ago","Sep","Oct","Nov","Dic","Ene","Feb","Mar","Abr","May","Jun2013")

nov<-c(vc09[1],vc09[2],vc09[3],vc09[4],vc09[5],vc09[6],vc09[7],vc09[8])
dic<-c(vc10[1],vc10[2],vc10[3],vc10[4],vc10[5],vc10[6],vc10[7])
ene<-c(vc01[1],vc01[2],vc01[3],vc01[4],vc01[5],vc01[6])
feb<-c(vc02[1],vc02[2],vc02[3],vc02[4],vc02[5])
mar<-c(vc03[1],vc03[2],vc03[3],vc03[4])
abr<-c(vc04[1],vc04[2],vc04[3])
may<-c(vc05[1],vc05[2])

plot(c(1,13),c(0.2,15),type="n",xaxt="n",xlab=" ",ylab=c("mm/d"))

lines(seq(1,13),c(mes),type="l",col=plot_colors[1],lwd=2)#ERA-Interim -Negro
#===== CFS =====
lines(seq(3,11),c(vc06),type="o",col=plot_colors[3],lwd=1.5,lty=2,pch=1)
lines(seq(4,12),c(vc07),type="o",col=plot_colors[4],lwd=1.5,lty=3,pch=2)
lines(seq(5,13),c(vc08),type="o",col=plot_colors[5],lwd=1.5,lty=4,pch=3)
lines(seq(6,13),c(nov),type="o",col=plot_colors[6],lwd=1.5,lty=2,pch=4)
lines(seq(7,13),c(dic),type="o",col=plot_colors[7],lwd=1.5,lty=3,pch=5)
lines(seq(8,13),c(ene),type="o",col=plot_colors[8],lwd=1.5,lty=4,pch=1)
lines(seq(9,13),c(feb),type="o",col=plot_colors[9],lwd=1.5,lty=2,pch=2)
lines(seq(10,13),c(mar),type="o",col=plot_colors[10],lwd=1.5,lty=3,pch=3)

```

```

lines(seq(11,13),c(abr),type="o",col=plot_colors[11],lwd=1.5,lty=4,pch=4)
lines(seq(12,13),c(may),type="o",col=plot_colors[12],lwd=1.5,lty=2,pch=5)
axis(side=1,at=seq(1,13,by=1),lab=months,cex.axis=0.9)

#plot_colors<-
c("Black","gray30","blue","red","orange","green","magenta","chocolate","cyan","dodgerblue
2","hotpink","coral4")
legend("topright",legend=c("ERA-Interim","Ago-Abr","Sep-May","Oct-Jun","Nov-Jun","Dic-
Jun","Ene-Jun","Feb-Jun","Mar-Jun","Abr-Jun","May-Jun"),
lty=c(1,3,4,2,3,4,2,3,4,2),lwd=2,
col=c(1,"blue","cadetblue4","purple","green","magenta","red","cyan","dodgerblue2","darkgr
een","coral4"),
pch=c(NA,1,2,3,4,5,1,2,3,4,5),bty="n",ncol=4,cex=1,inset=0.01)
title(main=c("Precipitacion","", "Region Centro "), font.main=2,cex.main=1.6)

dev.off()

```

Anexo (Programa para calcular y graficar el error medio absoluto (MAE))

```

.;*****
; Grafica de los retrospectivos promedio espacial
.;*****
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_code.ncl"
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_csm.ncl"
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/contributed.ncl"

mp0=addfile("/home/rosario/cfs/regiones/Norte/pcp/08_agosto_pcp_Norte.nc","r")
mp1=addfile("/home/rosario/cfs/regiones/Norte/pcp/09_septiembre_pcp_Norte.nc","r")
mp2=addfile("/home/rosario/cfs/regiones/Norte/pcp/10_octubre_pcp_Norte.nc","r")
mp3=addfile("/home/rosario/cfs/regiones/Norte/pcp/11_noviembre_pcp_Norte.nc","r")
mp4=addfile("/home/rosario/cfs/regiones/Norte/pcp/12_diciembre_pcp_Norte.nc","r")
mp5=addfile("/home/rosario/cfs/regiones/Norte/pcp/01_enero_pcp_Norte.nc","r")
mp6=addfile("/home/rosario/cfs/regiones/Norte/pcp/02_febrero_pcp_02-
09_Norte.nc","r")
mp7=addfile("/home/rosario/cfs/regiones/Norte/pcp/03_marzo_pcp_03-
09_Norte.nc","r")
mp8=addfile("/home/rosario/cfs/regiones/Norte/pcp/04_abril_pcp_04-09_Norte.nc","r")
mp9=addfile("/home/rosario/cfs/regiones/Norte/pcp/05_mayo_pcp_05-
09_Norte.nc","r")

```

```
mp10=addfile("/home/rosario/cfs/regiones/Norte/pcp/06_junio_pcp_06-09_Norte.nc", "r")
mp11=addfile("/home/rosario/cfs/regiones/Norte/pcp/07_julio_pcp_2013_07-09_Norte.nc", "r")
mp12=addfile("/home/rosario/cfs/regiones/Norte/pcp/08_agosto_pcp_08-09_Norte.nc", "r")
```

```
vm0=mp0->PRATE_surface
vm1=mp1->PRATE_surface
vm2=mp2->PRATE_surface
vm3=mp3->PRATE_surface
vm4=mp4->PRATE_surface
vm5=mp5->PRATE_surface
vm6=mp6->PRATE_surface
vm7=mp7->PRATE_surface
vm8=mp8->PRATE_surface
vm9=mp9->PRATE_surface
vm10=mp10->PRATE_surface
vm11=mp11->PRATE_surface
vm12=mp12->PRATE_surface
```

```
f0=addfile("/home/rosario/error/era/precipitacion/Norte/meses08-04_Norte.nc", "r")
f1=addfile("/home/rosario/error/era/precipitacion/Norte/meses09-05_Norte.nc", "r")
f2=addfile("/home/rosario/error/era/precipitacion/Norte/meses10-06_Norte.nc", "r")
f3=addfile("/home/rosario/error/era/precipitacion/Norte/meses11-07_Norte.nc", "r")
f4=addfile("/home/rosario/error/era/precipitacion/Norte/meses12-08_Norte.nc", "r")
f5=addfile("/home/rosario/error/era/precipitacion/Norte/meses01-09_Norte.nc", "r")
f6=addfile("/home/rosario/error/era/precipitacion/Norte/meses02-09_Norte.nc", "r")
f7=addfile("/home/rosario/error/era/precipitacion/Norte/meses03-09_Norte.nc", "r")
f8=addfile("/home/rosario/error/era/precipitacion/Norte/meses04-09_Norte.nc", "r")
f9=addfile("/home/rosario/error/era/precipitacion/Norte/meses05-09_Norte.nc", "r")
f10=addfile("/home/rosario/error/era/precipitacion/Norte/meses06-09_Norte.nc", "r")
f11=addfile("/home/rosario/error/era/precipitacion/Norte/meses07-09_Norte.nc", "r")
f12=addfile("/home/rosario/error/era/precipitacion/Norte/meses08-09_Norte.nc", "r")
```

```
p00 = f0->tp
p01 = f1->tp
p02 = f2->tp
p03 = f3->tp
p04 = f4->tp
p05 = f5->tp
p06 = f6->tp
p07 = f7->tp
p08 = f8->tp
```

p09 = f9->tp
p10 = f10->tp
p11 = f11->tp
p12 = f12->tp

p00@_FillValue=vm0@_FillValue
p01@_FillValue=vm0@_FillValue
p02@_FillValue=vm0@_FillValue
p03@_FillValue=vm0@_FillValue
p04@_FillValue=vm0@_FillValue
p05@_FillValue=vm0@_FillValue
p06@_FillValue=vm0@_FillValue
p07@_FillValue=vm0@_FillValue
p08@_FillValue=vm0@_FillValue
p09@_FillValue=vm0@_FillValue
p10@_FillValue=vm0@_FillValue
p11@_FillValue=vm0@_FillValue
p12@_FillValue=vm0@_FillValue

rest0 = doubletofloat(p00)
rest1 = doubletofloat(p01)
rest2 = doubletofloat(p02)
rest3 = doubletofloat(p03)
rest4 = doubletofloat(p04)
rest5 = doubletofloat(p05)
rest6 = doubletofloat(p06)
rest7 = doubletofloat(p07)
rest8 = doubletofloat(p08)
rest9 = doubletofloat(p09)
rest10 = doubletofloat(p10)
rest11 = doubletofloat(p11)
rest12 = doubletofloat(p12)

p00_1 = dim_avg_n(dim_avg_n(abs(vm0-rest0),1),1)
p01_1 = dim_avg_n(dim_avg_n(abs(vm1-rest1),1),1)
p02_1 = dim_avg_n(dim_avg_n(abs(vm2-rest2),1),1)
p03_1 = dim_avg_n(dim_avg_n(abs(vm3-rest3),1),1)
p04_1 = dim_avg_n(dim_avg_n(abs(vm4-rest4),1),1)
p05_1 = dim_avg_n(dim_avg_n(abs(vm5-rest5),1),1)
p06_1 = dim_avg_n(dim_avg_n(abs(vm6-rest6),1),1)
p07_1 = dim_avg_n(dim_avg_n(abs(vm7-rest7),1),1)
p08_1 = dim_avg_n(dim_avg_n(abs(vm8-rest8),1),1)
p09_1 = dim_avg_n(dim_avg_n(abs(vm9-rest9),1),1)
p10_1 = dim_avg_n(dim_avg_n(abs(vm10-rest10),1),1)

```
p11_1 = dim_avg_n(dim_avg_n(abs(vm11-rest11),1),1)
p12_1 = dim_avg_n(dim_avg_n(abs(vm12-rest12),1),1)
```

```
pcp_con = new(/17,13/,float)
pcp_con(1:9,0)= p00_1
pcp_con(2:10,1)= p01_1
pcp_con(3:11,2)= p02_1
pcp_con(4:12,3)= p03_1
pcp_con(5:13,4)= p04_1
pcp_con(6:14,5)= p05_1
pcp_con(7:14,6)= p06_1
pcp_con(8:14,7)= p07_1
pcp_con(8:14,7)= p07_1
pcp_con(9:14,8)= p08_1
pcp_con(10:14,9)= p09_1
pcp_con(11:14,10)= p10_1
pcp_con(12:14,11)= p11_1
pcp_con(13:14,12)= p12_1
```

```
wks = gsn_open_wks("png","nort.errores.pcp")
gsn_define_colormap(wks,"gui_default")
```

```
=====
;          atributos de la grafica
=====
```

```
res = True
res@gsnFrame      = False          ; don't advance frame yet
res@gsnDraw       = False
```

```
res@tmXBLabelFont = "Courier"
res@tmYLLLabelFont = "Courier"
res@tmXBLabelFontHeightF = 0.013
res@tmYLLLabelFontHeightF = 0.014
```

```
res@tiYAxisFont = "Courier" ; "helvetica"
res@tiYAxisString = "2012          2013"
res@tiYAxisFontHeightF = 0.010 ; 0.0185
```

```
res@tiXAxisFont = "Courier" ; "helvetica"
res@tiXAxisFontHeightF = 0.010
res@tiXAxisString = "2012          2013"
```

```
res@tiMainFont      =25 ; "Courier-bold" ; "Helvetica-Bold"
res@tiMainFontHeightF = 0.028
res@tiMainString    = "zona norte" ; main title
```

```

res@tmXBMode      = "Explicit"
res@tmXBValues    = (/0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12/)
res@tmXBLabels    =
(/"Jul","Ago","Sep","Oct","Nov","Dic","Ene","Feb","Mar","Abr","May","Jun","Jul"/) ;

res@tmYLMODE = "Explicit"
res@tmYLValues = (/0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16/)
res@tmYLLabels =
(/"Jun","Jul","Ago","Sep","Oct","Nov","Dic","Ene","Feb","Mar","Abr","May","Jun","Jul","A
go","Sep","Oct"/)

res@cnLevelSelectionMode = "ExplicitLevels" ; set explicit contour levels
res@cnLevels              = (/ 0,1,2,3,4,5,6/)
res@cnFillOn              = True                ; turn on color fill
res@lbOrientation         = "vertical"          ; vertical label bar
res@lbLabelFont           = "Courier"
res@lbLabelFontHeightF   = 0.014
res@cnLinesOn             = False
res@gsnSpreadColors       = True

plot = gsn_csm_contour(wks,pcp_con,res)

txres      = True                ; Text resources desired
txres@txFont = 25
txres@txFontHeightF = 0.028
gsn_text_ndc(wks,"Error medio absoluto de precipitacion (MAE)",0.5,0.91,txres)

res_text      = True
res_text@txFontHeightF = 0.019
res_text@txFont = "Courier"

gsn_text_ndc(wks,"Climate Forecast System (CFS)",0.5,0.11,res_text)

res_text@txAngleF = 90
gsn_text_ndc(wks,"ERA-Interim",0.082,0.5,res_text)

draw(plot)
frame(wks)

```

Anexo (Programa para calcular y graficar terciles)

```
;=====;
; Programa para calcular los terciles
;=====;
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_code.ncl"
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_csm.ncl"
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/contributed.ncl"
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/wrf/WRFUserARW.ncl"
load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/wrf/WRF_contributed.ncl"

begin
mp1=addfile("/media/disco_imta/cfs_data/Conchos/mean_mensual/2013_11_noviembre/p
orcentajes/arch_nc/porc_ens_mensual_pcpmmd_201311.nc","r")
vm1=mp1->PRATE_surface
lats=mp1->latitude
longs=mp1->longitude

mp0 =
addfile("/media/disco_imta/cfs_data/Conchos/retrospectivos/11_nov/pcp_ens_11_fclm.198
2.2010.nc","r")
all_files = systemfunc("ls
/media/disco_imta/cfs_data/Conchos/mean_mensual/2013_11_noviembre/members/pcp/a
nom*.nc")
mp2 = addfiles(all_files,"r")
;=====
;Abriendo variables
;=====
clm = mp0->PRATE_126_SFC_ave1m
lat = mp0->lat_126
lon = mp0->lon_126
clm!0 = "time"
clm!1 = "lat"
clm!2 = "lon"

ListSetType(mp2,"join")
anom = mp2[:]->PRATE_surface ;La delta (anomalía) de cada modelo
anom!0 = "miembros"
anom!1 = "time"
anom!2 = "lat"
anom!3 = "lon"
```

```

tim = mp2[:]->time
dims = dimsizes(anom)

porc =new((/dims(0),dims(1),dims(2),dims(3)/),float)

do i=0,dims(0)-1
  porc(i,::,:) = (anom(i,:::))*100/clm
end do

above=new((/dims(1),dims(2),dims(3)/),float)
norm =new((/dims(1),dims(2),dims(3)/),float)
below=new((/dims(1),dims(2),dims(3)/),float)

do l=0,dims(1)-1
  do i=0,dims(2)-1
    do j=0,dims(3)-1
      above(l,i,j)=num(porc(:,l,i,j).gt.25)
      norm(l,i,j) =num(porc(:,l,i,j).lt.25 .and. porc(:,l,i,j).gt.(-.25))
      below(l,i,j)=num(porc(:,l,i,j).lt.(-.25))
    end do
  end do
end do

above2 = ((above*100)/30)
above3 = where(above2.gt.40,above2,above2@_FillValue)
above3!0 = "time"
above3!1 = "lat"
above3!2 = "lon"
above3&lat = lat
above3&lon = lon

norm2 = ((norm*100)/30)
norm3 = where(norm2.gt.40,norm2,norm2@_FillValue)
norm3!0 = "time"
norm3!1 = "lat"
norm3!2 = "lon"
norm3&lat = lat
norm3&lon = lon
below2 = ((below*100)/30)
below3 = where(below2.gt.40,below2,below2@_FillValue)
below3!0 = "time"
below3!1 = "lat"
below3!2 = "lon"
below3&lat = lat

```



```

below3&lon = lon
;=====
; Atributos de la grafica
;=====
wks = gsn_open_wks("png","porcentajes_0_1_2")
gsn_define_colormap(wks,"OceanLakeLandSnow")

res          = True
res@gsnDraw  = False
res@gsnFrame = False
res@gsnAddCyclic = False
res@cnLinesOn = False

res@tiMainString = " "
res@vpWidthF      = 0.8
res@cnFillOn      = True
res@lbLabelBarOn  = False
res@tmXBLLabelFont = "Courier"
res@tmYLLLabelFont = "Courier"
res@gsnSpreadColors = False

res@tmXTOn       = False
res@tmYROn       = False

res@cnLevelSelectionMode = "ExplicitLevels"
res@cnLevels             = (/40,60,80/)
;-----
npanels      = 3
nplots_per_panel = 3
plots = new(/npanels,nplots_per_panel/),graphic)

k = 0 ; time j
do i = 0,npanels-1,1

res@cnInfoLabelOn = False
res@cnFillColors  = (/254,249,244,241/)
plots(i,2) = gsn_csm_contour(wks,norm3(k,,:,:),res)
;-----
res@gsnSpreadColors = False
res@cnFillColors = (/66,34,24,15/) ; (/20,21,26,25/)
res@vpHeightF = 0.2
res@vpWidthF = 0.01
res@pmLabelBarWidthF = 0.0055
res@lbLabelBarOn = False

```

```

plots(i,1) = gsn_csm_contour(wks,above3(k,::),res)
;-----
mres                = True
mres@gsnMaximize    = True
mres@gsnDraw        = False
mres@gsnFrame       = False
mres@gsnAddCyclic   = False
mres@cnLinesOn      = False
mres@cnLineLabelsOn = False

mres@gsnSpreadColors = False
mres@tmXTOOn        = False
mres@tmYROn         = False

mres@tmXBLabelFont  = "Courier"
mres@tmYLLabelFont  = "Courier"
mres@tmXBLabelFontHeightF = 0.013
mres@tmYLLabelFontHeightF = 0.013

mres@cnFillOn       = True
mres@cnLevelSelectionMode = "ExplicitLevels"
mres@cnLevels        = (/40,60,80/)
mres@mpShapeMode     = "FreeAspect"
mres@vpWidthF        = 0.55

mres@mpLimitMode     = "LatLon"
mres@mpMinLatF       = min(lat)+.2
mres@mpMaxLatF       = max(lat)-.2
mres@mpMinLonF       = min(lon)+.2
mres@mpMaxLonF       = max(lon)-.2
mres@mpCenterLonF    = (mres@mpMaxLonF + mres@mpMinLonF)/2.

mres@mpOutlineOn = True
mres@mpOutlineBoundarySets = "National"
mres@mpOutlineSpecifiers = ("/Mexico")+ " : States"
mres@mpDataSetName      = "Earth..4"
mres@mpGeophysicalLineThicknessF = 2.
mres@mpNationalLineThicknessF = 2.
mres@mpGeophysicalLineColor = "black"
mres@mpNationalLineColor = "black"
mres@mpUSStateLineColor = "black"
mres@mpUSStateLineThicknessF = 1.5

```

```

mres@mpDataBaseVersion = "Ncarg4_1"
mres@mpPerimOn         = True   ; draw box around map
mres@mpGridAndLimbOn   = False

mres@cnFillColors = (/114,130,146,162/)
mres@lbLabelBarOn = False
plots(i,0) = gsn_csm_contour_map_ce(wks,below3(k,,:),mres)
;=====
=====
do j=1,2
  overlay(plots(i,0),plots(i,j))
end do
k=k+1
end do

;=====
=====
sres = True
sres@gsnMaximize = True
sres@gsnDraw = False
sres@gsnFrame = False
sres@gsnAddCyclic = False
sres@mpShapeMode = "FreeAspect"
sres@vpWidthF = 0.55
sres@tiMainString = "Perimeter Background"
sres@tmXTOOn = False
sres@tmYROn = False

sres@gsnLeftString = ""
sres@gsnCenterString = ""
sres@gsnRightString = ""
sres@tiMainString = " "
sres@cnFillOn = True
sres@cnMinLevelValF = 40
sres@cnMaxLevelValF = 100
sres@cnLevelSelectionMode = "ExplicitLevels"
sres@cnLevels = (/ -75,-50,-25,0,25,50,75/)
sres@cnFillColors = (/194,178,130,114,66,34,24,14/)
sres@cnFillOn = True

sres@cnLinesOn = False
sres@lbLabelBarOn = False
sres@gsnSpreadColors = False

```

```

sres@mpMinLatF      = min(lats)
sres@mpMaxLatF      = max(lats)
sres@mpMinLonF      = min(longs)
sres@mpMaxLonF      = max(longs)

sres@mpOutlineOn = True
sres@mpOutlineBoundarySets = "National"
sres@mpOutlineSpecifiers = ("/Mexico/")+ : States"
sres@mpDataSetName = "Earth..4"
sres@mpGeophysicalLineThicknessF = 2.
sres@mpNationalLineThicknessF = 2.
sres@mpGeophysicalLineColor = "black"
sres@mpNationalLineColor = "black"
sres@mpUSStateLineColor = "black"
sres@mpUSStateLineThicknessF = 1.5

sres@mpDataBaseVersion = "Ncarg4_1"
sres@mpPerimOn = True ; draw box around map
sres@mpGridAndLimbOn = False

```

```

porcentaje=plots
m=0
do i = 0,npans-1,1
  porcentaje(i,0) = gsn_csm_contour_map_ce(wks,vm1(m,::),sres)
  m= m+1
end do

```

```

pnlres = True
pnlres@txFontHeightF = 0.023
pnlres@txFont = 25
gsn_text_ndc(wks,"Pronostico estacional",.745,0.968,pnlres)

```

```

text = True
text@txFontHeightF = 0.02
text@txFont = 25

```

```

labs=("/Diciembre","Enero","Febrero","Marzo","Abril","Mayo","Junio","Julio","Agosto","Septi
embre"/)

```

```

gsn_text_ndc(wks,labs(0),.533,0.93,text)
gsn_text_ndc(wks,labs(1),.53,0.639,text)
gsn_text_ndc(wks,labs(2),.53,0.348,text)

```

```

textp = True

```

```

textp@txFontHeightF = 0.01
textp@txFont        = 25
gsn_text_ndc(wks,"40 60 80 ",.205,0.01,textp)
gsn_text_ndc(wks,"40 60 80",.324,0.01,textp)
gsn_text_ndc(wks,"40 60 80",.443,0.01,textp)
gsn_text_ndc(wks,"-50 -25",.713,0.01,textp)
gsn_text_ndc(wks,"0 25 50",.764,0.01,textp) ;

res_L                = True
res_L@gsnFrame       = False
res_L@gsnPanelRight  = 0.6
res_L@txString       = "Categorias mas probables"
res_L@txFont         = 25
res_L@txFontHeightF = 0.023
res_L@txPosXF        = 0.33 ; 0.275
res_L@gsnPanelLabelBar = True

posx=0.152
posy=0.07
res_L@cnFillOn = True
res_L@mpFillOn = False
res_L@cnLinesOn = False
res_L@cnLevelSelectionMode = "ExplicitLevels"
res_L@cnMinLevelValF = 40
res_L@cnMaxLevelValF = 100
res_L@cnLevelSpacingF = 20
res_L@pmLabelBarDisplayMode = "Always"
res_L@cnMonoFillPattern = True
res_L@cnMonoFillColor = False
res_L@cnLineLabelsOn = False
res_L@cnInfoLabelOn = True
res_L@tmXBLabelFont="Courier"
res_L@tmYLLabelFont="Courier"
res_L@tmXBLabelFontHeightF=.01
res_L@tmYLLabelFontHeightF=.01
res_L@lbTitleFontHeightF=.1
res_L@pmLabelBarHeightF= .07
res_L@pmLabelBarWidthF= .1
res_L@lbLabelStride= 2
res_L@lbAutoManage= "False"
res_L@lbLabelFontHeightF= 0.01
res_L@lbLabelFont = "Courier"
res_L@gsnSpreadColors = False
res_L@lbTopMarginF = 0.25

```

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

res_L@lbTitleFont = "Courier"
res_L@lbTitleFontHeightF = 0.01
res_L@lbTitleOn = True
res_L@lbTitleString = " Abajo"

res_L@lbPerimOn = False
res_L@vpWidthF = 0.1
res_L@vpHeightF = 0.07
res_L@vpXF = posx
res_L@vpYF = posy
res_L@lbMonoFillPattern = True
res_L@lbOrientation = "Horizontal"
res_L@lbLabelStrings = ("/", " ", " ", " ", " ")
posx = posx+0.12

res_L1 = True
res_L1@lbFillColors = (/254,249,244,241/)
res_L1@lbOrientation = "Horizontal"
res_L1@lbPerimOn = False
res_L1@vpWidthF = 0.1
res_L1@vpHeightF = 0.07
res_L1@vpXF = posx
res_L1@vpYF = posy

res_L1@cnFillOn = True
res_L1@mpFillOn = False
res_L1@cnLinesOn = False
res_L1@cnLevelSelectionMode = "ExplicitLevels"
res_L1@cnMinLevelValF = 40
res_L1@cnMaxLevelValF = 100
res_L1@cnLevelSpacingF = 20
res_L1@pmLabelBarDisplayMode = "Always"
res_L1@cnMonoFillPattern = True
res_L1@cnMonoFillColor = False
res_L1@cnLineLabelsOn = False
res_L1@cnInfoLabelOn = True
res_L1@tmXBLLabelFont="Courier"
res_L1@tmYLLLabelFont="Courier"
res_L1@tmXBLLabelFontHeightF=.01
res_L1@tmYLLLabelFontHeightF=.01
res_L1@pmLabelBarHeightF= .07
res_L1@pmLabelBarWidthF= .1
res_L1@lbLabelStride= 2
res_L1@lbAutoManage= "False"

```

res_L1@lbLabelFontHeightF= 0.01
res_L1@lbLabelFont ="Courier"
res_L1@lbTopMarginF = 0.25

res_L1@lbTitleOn = True
res_L1@lbTitleFont = "Courier"
res_L1@lbTitleFontHeightF=.1
res_L1@lbTitleString = "Normal"
res_L1@lbLabelStrings = ("/" " " " " " " " ")

res_L1@lbLabelAutoStride = True
res_L1@lbMonoFillPattern = True
gsn_labelbar_ndc(wks,4," ",posx,posy,res_L1)
posx = posx+0.12

res_L2 = True
res_L2@lbOrientation    = "Horizontal"
res_L2@lbPerimOn       = False
res_L2@vpWidthF        = 0.1
res_L2@vpHeightF       = 0.07
res_L2@vpXF            = posx
res_L2@vpYF            = posy

res_L2@cnFillOn = True
res_L2@mpFillOn = False
res_L2@cnLinesOn = False
res_L2@cnLevelSelectionMode = "ExplicitLevels"
res_L2@cnMinLevelValF = 40
res_L2@cnMaxLevelValF = 100

res_L2@cnMonoFillPattern = True
res_L2@cnMonoFillColor = False
res_L2@cnLineLabelsOn = False
res_L2@cnInfoLabelOn = True
res_L2@tmXBLLabelFont="Courier"
res_L2@tmYLLLabelFont="Courier"
res_L2@tmXBLLabelFontHeightF=.01
res_L2@tmYLLLabelFontHeightF=.01
res_L2@lbTitleFontHeightF=.1
res_L2@pmLabelBarHeightF= .07
res_L2@pmLabelBarWidthF= .1
res_L2@lbLabelStride= 2
res_L2@lbAutoManage= "False"

```

```

res_L2@lbTopMarginF = 0.25
res_L2@lbTitleFont = "Courier"
res_L2@lbTitleFontHeightF = 0.01
res_L2@lbTitleOn = True
res_L2@lbTitleString = "Arriba"

res_L2@lbLabelStrings = ("/" " " " " " " " "/)
res_L2@lbLabelStride = 1
res_L2@lbLabelPosition = "Right"
res_L2@lbLabelFontHeightF= 0.01
res_L2@lbLabelFont ="Courier"
res_L2@lbLabelAutoStride = True
res_L2@lbMonoFillPattern = True
res_L2@lbFillColors    = (/66,34,24,15/)
gsn_labelbar_ndc(wks,4," ",posx,posy,res_L2)

res_R          = True
res_R@gsnFrame    = False
res_R@gsnPanelLeft    = 0.45
res_R@gsnPanelLabelBar = True
res_R@txString     = " "
res_R@txFont       = 25
res_R@txFontHeightF =0.023
res_R@txPosXF      = 0.74
res_R@lbLabelAutoStride = True

res_R@lbTopMarginF = 0.25
res_R@lbTitleFont = "Courier"
res_R@lbTitleFontHeightF = 0.01
res_R@lbTitleOn = True
res_R@lbTitleString = " "
res_R@pmLabelBarWidthF = 0.2
res_R@lbLabelFontHeightF =0.012
res_R@pmLabelBarParallelPosF = 0.015
res_R@lbAutoManage= "False"
res_R@lbTitleFontHeightF=.1
res_R@pmLabelBarHeightF= .07
res_R@pmLabelBarWidthF= .15
res_R@lbLabelStride= 2
res_R@vpXF          = 0.652
res_R@vpYF          = posy
res_R@lbLabelStrings = ("/" " " " " " " " " " "/)

gsn_panel(wks,plots(:,0),(/3,1/),res_L)

```



```
gsn_panel(wks,porcentaje(:,0),(/3,1/),res_R)
frame(wks)
end
```

Anexo C (Codigo fuente del punto 5)

Desarrollo y adaptación de técnicas numéricas en los dominios de la frecuencia, el tiempo y el espacio, de la información hidroclimática de México y los EUA, y de los índices de variabilidad climática

Información

La Unidad de Investigación Climática (*Climatic Research Unit*, CRU) de la Universidad de East Anglia, se ha ganado el reconocimiento general como una de las instituciones líderes en investigación del cambio climático, tanto natural como antropogénico. Esta unidad ha desarrollado *software* estadístico y de modelación, pero también conseguido un acervo importante de información climatológica con un control de calidad aceptable. En su sitio *web*, se pueden descargar un número significativo de conjuntos de datos, muchos de ellos de acceso libre, pero algunos bajo la modalidad de registro y con una cuota.

Entre conjuntos de datos se encuentran las series de tiempo de temperatura y presión, en mallas de alcance global de $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ y de $2.5^{\circ}\times 3.75^{\circ}$, y conjuntos de datos de alta resolución, que vienen en mallas de $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$. El formato de los archivos es variado, dependiendo del grupo de trabajo que lo desarrolló, aunque se aprecia una tendencia hacia el manejo con el formato NetCDF, bajo la convención CF (*Climate Forecast*). Las series de tiempo tienen una gran utilidad de permitir la comparación de las variaciones del clima con las variaciones de otros fenómenos.

Las series de tiempo de tienen información mensual de las variaciones del clima desde el siglo pasado (en algunos casos desde mediados del antepasado), y se va actualizando. Las mallas se obtienen interpolando las mediciones de más de 4000 estaciones distribuidas en todo el mundo. Los principales conjuntos de datos con series de tiempo son:

Tabla 1 Series de tiempo de la CRU.

Conjunto	Variables	Resolución	Cobertura	Periodo
CRUTEM4	t_a	$5^{\circ}\times 5^{\circ}$	Global	1850-2013
g55wld0098	p	$5^{\circ}\times 5^{\circ}$	Global	1900-1998
gu23wld0098	p	$2.5^{\circ}\times 3.75^{\circ}$	Global	1900-1998
CRU TS 1.0	p, t, d, w, v, c, f	$0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$	Global	1901-1995

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

CRU TS 1.1	p, t	0.5°×0.5°	Global	1996-1998
CRU TS 1.2	p, t, d, v, c	10'×10'	Europa	1901-2000
CRU TS 2.0	p, t, d, v, c	0.5°×0.5°	Global	1901-2000
CRU TS 2.10	p, t, t ₊ ,t ₋ , d, w, v, c, f	0.5°×0.5°	Global	1901-2002
CRU TS 3.00	p, t, t ₊ ,t ₋ , d, w, v, c, f	0.5°×0.5°	Global	1901-2005
CRU TS 3.10 CRU TS 3.10.01	p, t, t ₊ ,t ₋ , d, v, c	0.5°×0.5°	Global	1901-2009

Notas: p=precipitación, t=temperatura, d=rango de temperatura diurna, w=días húmedos, v=presión de vapor, c=cobertura nubosa, f=días con heladas.

El conjunto de datos de mayor interés para nuestro estudio es CRU TS 3.10. En nuestro caso, se utilizó información de temperatura y precipitación.

Con el objeto de familiarizarse con el manejo de estos archivos, se realizaron ejercicios desde MatLab, utilizando un archivo con información durante el huracán Ernesto (2012). Posteriormente, con el objeto de alimentar a diferentes programas, se han desarrollado dos programas, xcrutxt y CruSeries.

xcrutxt

Programa implementado en “C” para extraer información de un archivo de texto, con valores separados por tabulador, cuyo formato es, después de un encabezado, una serie de registros, con los valores de latitud y longitud, seguidos por los valores mensuales de la variable seleccionada, iniciando en enero de 1901.

Longitud	Latitud	Ene-1901	Feb-1901	Mar-1901	...
-111.75	24.25	0.3871	0.14286	0.096774	...
-111.75	24.75	0.3871	0.10714	0.064516	...
...					

Su uso es:

```
xcrutxt -pXXXXXXXXYY archivo
```

en donde XXXXX es la longitud Oeste y YYYY la latitud en centésimas de grado. Es importante notar que en el primer caso se requieren 5 dígitos y en el segundo 4. La salida es también un archivo con formato de texto separado por tabulador, con unas líneas de encabezado, y posteriormente los valores, un mes por línea:

Longitud	Latitud
-99.25	25.25
mes	valor
Ene-1901	0.16774
Feb-1901	0.48571
Mar-1901	0.35806
...	

CruSeries

Se implementó un programa en Java, para extraer información directamente de archivos de series de tiempo de la CRU en formato NetCDF. Los requisitos del archivo NetCDF es que se cuente con las dimensiones “time”, “latitude” y “longitude”, y que las mallas de las variables tengan ese orden de jerarquía. Su uso es:

```
java -jar CruSeries.jar op -vNombreDeVariable archivo
```

en donde **NombreDeVariable** es el nombre de la variable deseada y **op** son las opciones, que pueden ser:

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

`-plong,lat`

Se extrae la información de un solo punto, correspondiente al nudo más cercano a las coordenadas indicadas. Nótese que no existe espacio y la coma separa las cantidades.

`-rlong0,lat0,long1,lat1`

Se extrae la información promedio dentro de un rectángulo con las coordenadas indicadas. Nótese que no existe espacio y la coma separa las cantidades. Durante el cálculo del promedio se excluyen los valores que indican “faltante”.

La salida es también un archivo con formato de texto separado por tabulador, con unas líneas de encabezado, y posteriormente los valores, un mes por línea:

longitud	latitud
-102.5	22.5
-97.5	27.5
mes	temperature_anomaly
ene-1850	-1.0E30
feb-1850	-1.0E30
mar-1850	-1.0E30
...	

En este ejemplo se notará que existen dos líneas de coordenadas, lo que indica que se trata de un rectángulo.

Señales

Se mencionó que se utiliza información de temperatura y precipitación. Especialmente en el caso de la precipitación, no es tan sencillo encontrar fácilmente patrones, por lo que se puede trabajar también con la acumulación. Esta consiste en obtener el promedio de toda la serie, e ir integrando o acumulando mes a mes la anomalía de precipitación. En este caso, la línea inicia y termina en cero.

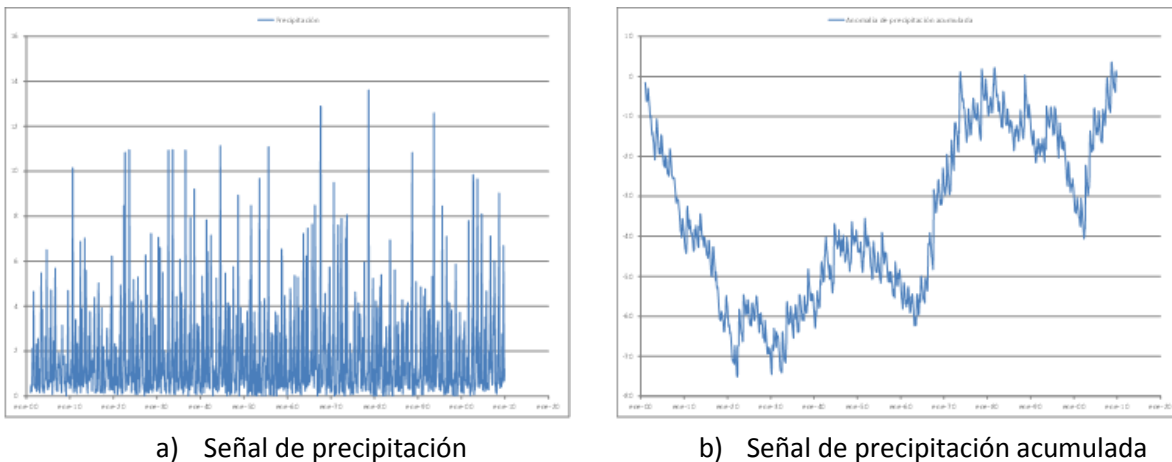


Figura 1 Series de tiempo de precipitación de la CRU para el nudo en las coordenadas (-99.25°, 25.25°).

También hicieron pruebas con otras variantes. Una de ellas es la anomalía estacional, cuya referencia es el promedio del mes correspondiente en toda la serie:

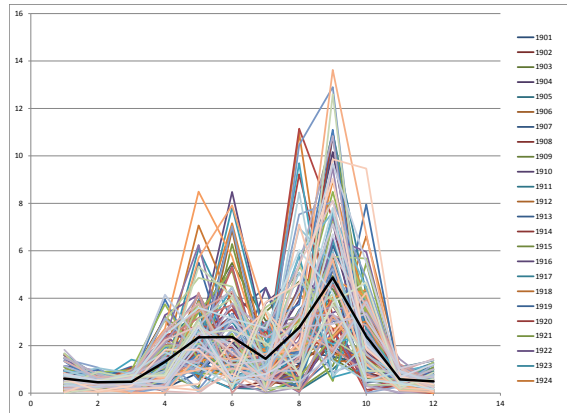
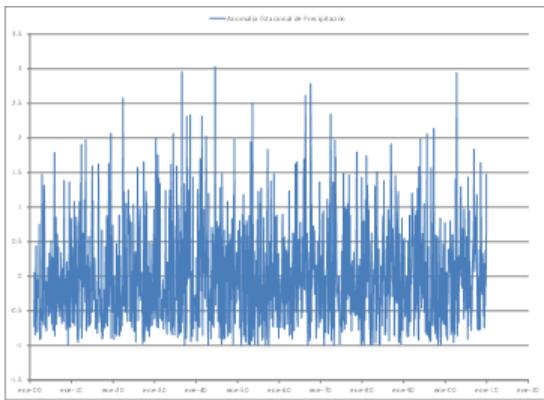


Figura 2 Precipitación mensual en el nudo (-99.25°, 25.25°). Cada línea corresponde a un año, y la línea negra gruesa corresponde al promedio estacional.



a) Señal de anomalía estacional



b) Señal de anomalía estacional acumulada

Figura 3 Series de tiempo de la anomalía estacional, y su acumulado, para el nudo en las coordenadas (-99.25°, 25.25°).

Estado del arte

El estado del arte se desarrolló en 3 temas que se discuten a continuación.

Variaciones de periodos largos en la amplitud y frecuencia de El Niño reconstruido a partir de anillos de árboles

Para la reconstrucción a partir de anillos de árboles, se utilizan los indicadores proxy, o subrogados, que son indicadores naturales dependientes del clima. Estos indicadores naturales que actúan de archivo de evidencias de las condiciones climáticas del pasado, nos brindan un registro que aunque es aproximado, relativamente permanente.

La variable proxy que probablemente no tiene en sí misma un gran importancia, pero pueden tener una estrecha relación con otra variable que sí la tenga. Así las temperaturas proxy encontradas a partir de los anchos de los anillos de árboles y de las inter-capas de muestras de hielo se usan en climatología para recrear registros de paleo-temperaturas. Otros ejemplos proxy son:

- Las variaciones isotópicas en muestras de hielo pueden usarse para inferir cambios de temperaturas y de volúmenes de capas de hielo.
- Las variaciones en el isótopo "Be 10" pueden ser usadas para inferir pasadas irradiaciones solares.
- Los anchos de los anillos de árboles pueden usarse para inferir cambios en precipitaciones y temperaturas.

En todos los casos es necesario calibrar cuidadosamente la variable proxy y confrontarla con la variable de interés. Por ejemplo, el crecimiento arbóreo, es sensible a precipitaciones y a temperaturas tanto como a otros factores, y a veces es más sensible durante ciertas estaciones del año. Las variables proxy de muestras de hielo se usan habitualmente de manera directa.

En estadística, la variable proxy debe poseer una fuerte correlación, pero no necesariamente lineal o positiva, con el valor inferido. No tiene ningún valor si los datos no se ajustan a alguna relación (los datos se representan en una nube de certidumbre).

En el estudio de los climas del pasado, conocidos como la paleo-climatología, los proxies climáticos que conservan las características físicas del pasado se conjuntan con las mediciones directas (como proxies estadísticos), para reconstruir las condiciones climáticas que prevalecieron durante gran parte de la historia de la Tierra. Esto es muy importante pues los registros modernos fiables del clima se iniciaron en la década de 1880, y solo los proxies proporcionan un medio para que se determinen patrones climáticos previos. Entre los ejemplos de proxies se pueden mencionar los núcleos de hielo, anillos de árboles, polen subfósil, perforaciones, corales y sedimentos de lagos y océanos.

La característica más importante del material de los proxies, es que estos materiales conservan la información de la influencia de las condiciones climáticas de la época en la que se fijaron o crecieron. Los rastros químicos producidos por los cambios climáticos, como las cantidades de determinados isótopos, se pueden recuperar a partir de proxies. Para producir resultados más precisos, es necesaria una verificación-cruzada sistemática entre indicadores proxy, para la exactitud en las lecturas y mantenimiento de registros.

Se creó una reconstrucción de 400 años de ENSO, usando coníferas sensibles a la humedad, en el sudoeste de Estados Unidos y al noroeste de México. La reconstrucción se ha comparado con datos históricos y registros de instrumentos modernos para su verificación. Esto demuestra que El Niño ha estado en existencia por lo menos durante 400 años y que tiene fluctuaciones constantes en amplitud y frecuencia en escalas de tiempo de 80-100 años.

Los resultados de Ropelewski y Halper (1986), muestran que las precipitaciones de verano en la meseta de Colorado y grandes regiones de las cuencas cercanas, son altas durante los años ENSO y que las precipitaciones de invierno en el norte de México son altas en el año siguiente a los picos de ENSO. Por lo tanto, es razonable esperar que los eventos ENSO se correlacionaron positivamente con anchos de anillos de árboles de coníferas sensibles a la humedad en el suroeste de Estados Unidos y al noroeste de México en el año del evento ENSO o en el año siguiente.

Los primeros intentos de reconstruir los eventos ENSO de anillos de los árboles son los estudios realizados por Michaelsen y Dayli, (1983), en adelante MD83 y Lough y Fritts (1985). Los resultados que se presentan en este artículo, muestran una modificación de MD83 de varias maneras:

1. Dos índices de ENSO, con datos de presiones a nivel del mar y datos de precipitación tropical.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

2. Regresión selectiva, método para la reconstrucción que muestra una sobreestimación. Adicionalmente se le aplica un análisis de componentes principales.
3. Comparación y verificación con el trabajo de Quinn et al. (1987).
4. Aplicación de análisis espectral evolutivo para el estudio de los cambios temporales en la amplitud y la frecuencia del ENSO.

El índice de la oscilación del sur (IOS) es un valor que se obtiene de la diferencia de los valores superficiales de presión atmosférica entre la isla de Tahití y Darwin (Australia). La isla de Tahití se utiliza como punto representativo del comportamiento de la presión atmosférica en la parte oriental-central del Océano Pacífico Tropical; por su parte, Darwin se utiliza como el punto representativo de la presión atmosférica de la parte occidental del mismo océano. En otras palabras, el IOS es una medida relativa de cómo cambia la presión atmosférica entre dos grandes regiones, occidental y central-oriental, del Océano Pacífico Tropical.

Se ha desarrollado una regresión múltiple para calibrar cronologías de anillos de árboles y los registros de instrumentos relacionados con el ENSO. Todas las cronologías se componen con muestras de abeto Douglas, excepto San Pedro Mártir, BC, que consiste en muestras de pino Jeffrey. La calibración se llevó a cabo mediante la comparación de la primera componente principal de los registros de anillos de árboles con el índice ENSO mediante análisis de regresión múltiple.

Se ha construido un índice de ENSO sobre la base de medición de presión del nivel del mar y la precipitación tropical de la isla a calibrar con el segmento reciente de los registros de anillos de árboles. Primero, el promedio de la presión anual o la precipitación total para cada estación se normalizó restando la media y dividiendo la desviación estándar. Se calcularon los índices separados para la presión y la precipitación. Promediando todas las estaciones de precipitación produce el índice de precipitaciones. Por último, los índices de presión y la precipitación fueron promediados juntos para formar un único índice de ENSO.

Reconstrucción del índice de sequías severas en América del Norte

Se reconstruyó el índice de sequías de Palmer (PDSI por sus siglas en inglés) para el Noreste de Nevada desde 1601-1982 usando el promedio del índice cronológico de los anillos de árboles provenientes de dos sitios. La ecuación de regresión sobre el índice promedio explica el 74% de la varianza en PDSI de 1932 a 1981. La reconstrucción del registro de las sequías muestra que hay 100 años secos en los 382 años desde 1601. 64 % de estos años ocurren como sequías de

1 o 2 años. La reconstrucción del índice indica que condiciones de sequía severas a extremas ocurren en el 37% de los años secos.

Para la identificación de la frecuencia, duración e intensidad de la sequía por siglo se utilizó el método de regresión lineal múltiple.

Los estudios durante los últimos 10 años han demostrado que los anillos cronológicos de los árboles pueden ser usados como fuentes de información para aumentar la cantidad de datos hidrológicos y reconstruir datos de precipitación, y más recientemente, información histórica de sequías a escala regional.

El análisis de correlación se lleva a cabo entre los datos cronológicos como variable independiente y precipitación anual (Agosto-Septiembre) de 1600-1982 como variable dependiente. Se utiliza un procedimiento similar para reconstruir el PDSI.

Al aplicar la regresión para obtener del PDSI sobre el índice de anillos del árbol se utilizó una ecuación de predictor retrasado. Los posibles predictores para obtener el PDSI en el año t son los índices cronológicos $t-1$, t , $t+1$, de los cuales el que tiene una mayor correlación positiva es el índice de $t-1$. Sin embargo la reconstrucción de los datos de 1932-1982 no predice 6 de los 19 años secos en dicho periodo, dentro de éstos se encuentran dos eventos de sequía severa.

Variabilidad decadal de la precipitación sobre el oeste de América del Norte

Analizando el trabajo realizado por Cayan, Dettinger, Díaz y Graham (1998), se puede observar que los datos disponibles para el estudio son manipulados de manera adecuada implementando varios métodos en cada una de las fases de tratamiento de los datos. El trabajo tiene importancia debido a que el entendimiento de las fluctuaciones decadales de precipitación es crucial porque en esta escala se puede identificar cómo afectan la biota, controlan los suministros de agua y pueden modular eventos de alta frecuencia como las inundaciones y las sequías.

En este estudio los eventos de baja frecuencia son importantes en el cambio global. Debe de considerarse que la parte oeste de Norteamérica por su proximidad con el Océano Pacífico, es dominada por precipitaciones de invierno de tormentas del Pacífico Norte. En este artículo se considera la latitud media de

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

Norteamérica desde la Costa del Pacífico hasta el lado este de las Montañas Rocallosas, zona que también es de interés en nuestro caso.

Actualmente se tienen claros algunos eventos originados por fluctuaciones u oscilaciones en esta escala de tiempo. Lo que no es claro es si existe una estructura u organización de los episodios húmedos y secos de largo plazo sobre el oeste de Norteamérica con respecto al dominio del tiempo, y algo que complica aún más el asunto es que desconoce si los elementos de cambio climático influyen en esta posible estructura y cómo lo hacen.

Este artículo se enfoca en dos aspectos: ¿Cuál es la estructura espacial de las fluctuaciones de precipitación decadal sobre el oeste de los EUA, desde las Montañas Rocallosas hasta la Costa del Pacífico? y ¿Cómo están relacionadas las anomalías regionales de precipitación decadal con la circulación atmosférica y las temperaturas de superficie del mar?

Datos

Los datos primarios son tomados sobre una malla de 5° lat x 5° long y son series de tiempo con datos mensuales de anomalías de precipitación. Estos datos consisten en promedios zonales de anomalías mensuales de estaciones cooperativas individuales y de primer orden. Este estudio se enfoca en puntos de malla que tienen datos históricos adecuados, es decir, de al menos 45 años. Las anomalías mensuales para todas las estaciones contempladas en cuadrículas de malla de 5° fueron ponderadas por el Método de Distancia Inversa Ponderada para producir las precipitaciones anómalas, centradas en cada punto de la malla.

Los análisis realizados en este artículo son restringidos al periodo de tiempo después de 1880 porque datos anteriores son relativamente escasos, y los datos de precipitación terminan en 1994. Además para el presente estudio, el dominio espacial de los datos de precipitación es el oeste de Norteamérica de los 100°W hacia el oeste hasta la Costa del Pacífico, y de los 30° a los 60°N, como se muestra en la siguiente figura, aunque después se consideran anomalías de

precipitación sobre todas las áreas de tierra globales disponibles para propósitos comparativos.

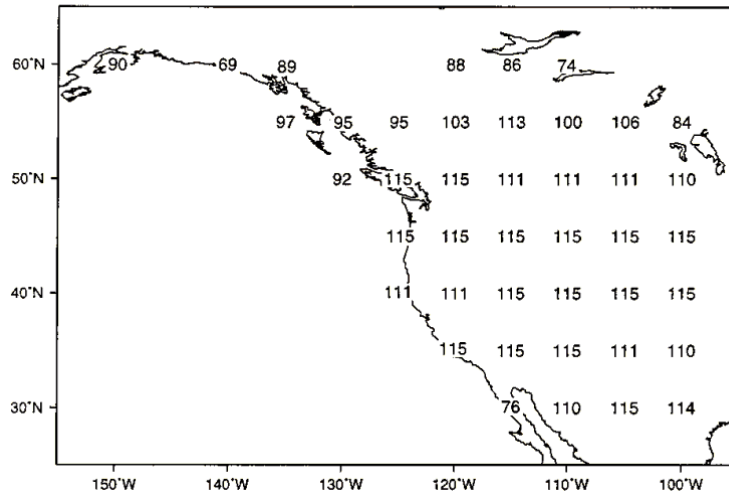


Figura 4 Malla con información de precipitación en el oeste de Norteamérica en el periodo 1880-1994. Los números en los nodos de la malla representan el número de años con datos disponibles en cada punto.

Por otro lado se cuenta con medidas de caudales que son mediciones de clima usuales ya que representan escurrimiento sobre una región en general. Dichas medidas son tomadas de mediciones estadounidenses y canadienses. Además, sobre ciertas regiones se hacen mediciones de las capas de nieve debido a que representan la acumulación de agua en forma de nieve durante todo el invierno, por ello las mediciones son tomadas en el cenit de dicha acumulación.

Las anomalías de presión a nivel del mar se utilizan para diagnosticar los patrones de circulación atmosférica asociados con las fluctuaciones de precipitación de bajas frecuencias.

Los datos de temperatura de superficie del mar empleados son promedios mensuales. Los datos faltantes fueron llenados usando varias funciones empíricas ortogonales (EOF) construidas de las bases de datos más recientes y del mejor

periodo muestreado de temperaturas de superficie del mar basados en sensores remotos.

Los métodos empleados para los datos van desde interpolaciones hasta métodos de análisis sobre la estructura espacial y temporal de los mismos. Los métodos empleados en este artículo y que pueden ser de utilidad nuestro caso son:

- Método de la distancia inversa ponderada, que permite obtener las mediciones en un punto específico del espacio haciendo un tipo de interpolación ponderada.
- Análisis de componentes principales (PCA por sus siglas en inglés), que es una técnica utilizada para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos. Intuitivamente la técnica sirve para hallar las causas de la variabilidad de un conjunto de datos y ordenarlas por importancia.
- Análisis de componentes principales rotados, es la misma técnica mencionada arriba pero los datos son sometidos a algún operador matricial que hace que los componentes principales aparezcan rotados, y de esta forma intentar recuperar más información de la variabilidad.
- Filtros de distintos tipos según se hable del dominio de la frecuencia o del tiempo, son funciones que hacen que se eliminen ciertos tipos de frecuencias de las series de tiempo.
- Análisis de Funciones Empíricas Ortogonales (EOF por sus siglas en inglés) en relación con el tratamiento estadístico de modelos espacio-temporales geofísicos. Este método coincide con la descomposición en autovalores y autovectores de la matriz de covarianza.

Herramientas numéricas

Índices de extremos climáticos con RClimDex

ClimDex es un paquete computacional fácil de usar, basado en Microsoft Excel, para el cálculo de Índices de extremos climáticos para monitorear y detectar cambio climático. Fue desarrollado por Byron Gleason del National Climate Data Centre (NCDC) de la NOAA, y ha sido usado en talleres CCI/CLIVAR sobre índices climáticos desde el 2001. El objetivo original fue el de colocar ClimDex en un ambiente que no dependa de un sistema operativo determinado. En el 2003 se descubrió que el método utilizado por ClimDex y otros programas para calcular índices de temperatura basados en percentiles resultaba en inhomogeneidad en las series de índices. La solución dentro de Excel es muy complicada, por lo que se optó por la utilización de R ya que R es un *software* robusto y poderoso para gráficos y análisis estadístico y es de uso libre. Puede ser ejecutado tanto en ambientes Windows como Unix.

RClimDex está diseñado para proporcionar una interfaz amigable para calcular índices de extremos climáticos. Calcula todos los 27 índices básicos recomendados por el Equipo de Expertos de CCI/CLIVAR para “Climate Change Detection Monitoring and Índices” (ETCCDMI) así como también otros índices de temperatura y precipitación con límites definidos por el usuario. Los 27 índices básicos incluyen casi todos los índices calculados por ClimDex (Versión 1.3). Esta versión de RClimDex ha sido desarrollada bajo R 1.84. Debe poder ser ejecutada con R 1.84 o una versión posterior.

Identificar cambios en la presencia de eventos extremos de la precipitación, es una tarea que depende de la técnica de análisis empleada (Zhang et al., 2004; Trömel y Schönwiese, 2007). Entre muchos métodos estadísticos usados para el diagnóstico de eventos extremos tanto de precipitación como de temperaturas, se encuentra el basado en los “índices extremos”, a través del análisis de tendencias y niveles de significancia, propuesto por Frich et al. (2002), metodología que ya ha sido utilizada por el IPCC (Kamiguchi et al., 2006).

Uno de los principales objetivos de construir índices de extremos climáticos es para usarlos en estudios de monitoreo y detección de cambios climáticos. Esto requiere que los índices sean homogeneizados. La homogenización de datos ha sido planificada pero no implementada en esta versión. Actualmente RClimDex incluye solamente un procedimiento simple de control de calidad de datos que fue proporcionado por ClimDex. Como en ClimDex, se requiere que los datos tengan un control de calidad antes de que los índices sean calculados. Este paquete hace 1) Control de Calidad de datos climáticos diarios y 2) Cálculo de los 27 índices básicos. Algunos de los índices que calcula el RClimDex se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Algunos índices extremos que se pueden obtener con RClimDex.

Índice	Nombre	Descripción	Unidades
FD0	Días de heladas	Número de días en un año cuando TN(mínimo diario)<0°C	Días
CSDI	Indicador de la duración de periodos fríos	Contaje anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TN<10th percentil	Días
DTR	Rango diario de temperatura	Diferencia media mensual entre TX y TN	°C
TXx	Max Tmax	Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria	°C
TNn	Min Tmin	Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria	°C
TN10p	Noches frías	Porcentaje de días cuando TN<10th percentil	Días
TX10p	Días fríos	Porcentaje de días cuando TX<10th percentil	Días
TN90p	Noches calientes	Porcentaje de días cuando TN>90th percentil	Días
TX90p	Días calientes	Porcentaje de días cuando TX>90th	Días

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

		percentil	
PRCPTOT	Precipitación total anual en los días húmedos	Precipitación anual total en los días húmedos ($RR \geq 1\text{mm}$)	mm
SDII	Índice simple de intensidad diaria	Precipitación anual total dividida para el número de días húmedos (definidos por $PRCP \geq 1.0\text{mm}$) en un año	mm/día
R10	Número de días con precipitación intensa	Número de días en un año en que $PRCP \geq 10\text{mm}$	Días
R20	Número de días con precipitación muy intensa	Número de días en un año en que $PRCP \geq 20\text{mm}$	Días
Rnn	Número de días sobre nn mm	Número de días en un año en que $PRCP \geq nn\text{ mm}$, nn es un parámetro definido por el usuario	Días
CDD	Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con $RR < 1\text{mm}$	Días
CWD	Días húmedos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con $RR \geq 1\text{mm}$	Días
R95p	Días muy húmedos	Precipitación anual total en que $RR > 95$ percentil	mm
R99p	Días extremadamente secos	Precipitación anual total en que $RR > 99$ percentil	mm

Un ejemplo de estos son los implementados para bases de datos pertenecientes al estado de Tlaxcala. En particular, la siguiente figura muestra algunos índices para la estación de Apizaco, cuya información proviene de la base de datos nacional CLICOM.

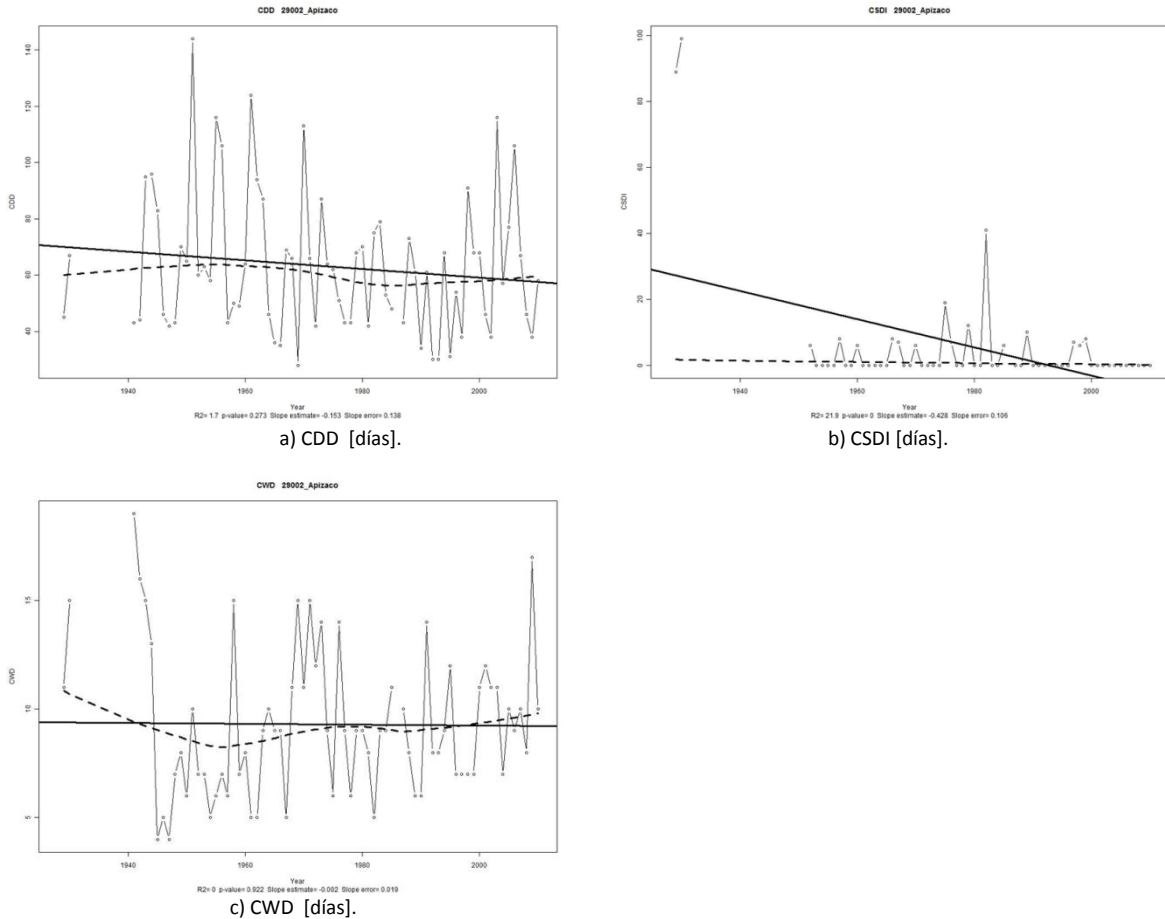


Figura 5 Índices RCLimDex para Apizaco.

El método de regresión lineal múltiple

En la regresión lineal múltiple se utiliza más de una variable explicativa; esto ofrece la ventaja de utilizar más información en la construcción del modelo y, consecuentemente, realizar estimaciones más precisas.

Al tener más de una variable independiente surgirán algunas diferencias con el modelo de regresión lineal simple. Una cuestión de gran interés será responder a la siguiente pregunta: de un vasto conjunto de variables explicativas: X_1, X_2, \dots, X_k , cuáles son las que más influyen en la variable dependiente Y .

En definitiva, y al igual que en regresión lineal simple, se considera que los valores de la variable dependiente Y han sido generados por una combinación lineal de los valores de una o más variables explicativas y un término aleatorio.

Los coeficientes se eligen de forma que la suma de cuadrados entre los valores observados y los pronosticados sea mínima, es decir, minimizar la varianza residual. En la práctica deberemos de elegir cuidadosamente qué variables se consideran como explicativas. Algunos criterios que deben de cumplir serán los siguientes:

- Tener sentido numérico.
- No deberá de haber variables repetidas o redundantes
- Las variables introducidas en el modelo deberán de tener una cierta justificación teórica.
- La relación entre variables explicativas en el modelo y casos debe de ser como mínimo de 1 a 10.
- La relación de las variables explicativas con la variable dependiente debe de ser lineal, es decir, proporcional.

La metodología es la siguiente:

- Construir un modelo que represente la dependencia lineal de una variable respuesta cuantitativa Y simultáneamente respecto de varias variables explicativas cuantitativas X_1, X_2, \dots, X_k .
- Determinar la función de regresión lineal óptima.
- Partiendo de un conjunto de regresores X_1, X_2, \dots, X_k , estudiar cuáles son significativos para explicar la respuesta.
- Estimar el valor esperado de la respuesta y predecir un valor futuro de ésta para unos valores prefijados de las variables explicativas. Determinar la precisión de la estimación y la predicción.
- Analizando los residuos, estudiar si se verifican las hipótesis básicas del modelo. Proponer alternativas si no es así.

En la regresión lineal múltiple de Y sobre X_1, X_2, \dots, X_k se supone que la función de regresión tiene la expresión:

$$E(Y | X_1=x_1, X_2=x_2, \dots, X_k=x_k) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k.$$

Cada coeficiente β_i ($i \geq 1$) mide el efecto marginal que, sobre la variable respuesta Y , tiene un aumento de una unidad de la variable explicativa X_i cuando el resto de las variables X_j , con $j \neq i$, permanece constante.

El coeficiente de correlación múltiple, R , es una medida de la bondad del ajuste.

$$R^2 = \frac{VE}{VT}$$

Propiedades:

- i. $0 \leq R^2 \leq 1$. Cuando $R^2 = 1$ existe una relación lineal exacta entre la respuesta y las variables predictivas. Cuando $R^2 = 0$, sucede que $\beta_0 = \beta_1 = \dots = \beta_k = 0$ y no existe relación lineal aparente entre Y y las X_i .
- ii. El coeficiente de regresión múltiple es el coeficiente de regresión simple entre la respuesta Y y el valor previsto \hat{Y} .
- iii. Se verifica que:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \frac{n - k - 1}{k}$$

No conviene utilizar el coeficiente de determinación para comparar distintos modelos de regresión entre sí: siempre que introduzcamos un nuevo regresor en el modelo, R^2 aumentará, aunque el efecto del regresor sobre la respuesta no sea significativo.

Por ello se define el coeficiente de determinación ajustado o corregido por grados de libertad:

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{S_R^2}{S_Y^2}$$

Un programa que permite hacer de manera sencilla una interpolación lineal múltiple es **MATLAB** mediante la función **regress**. La siguiente figura muestra un

ejemplo de la regresión del consumo de combustible, dependiendo del peso y potencia del vehículo.

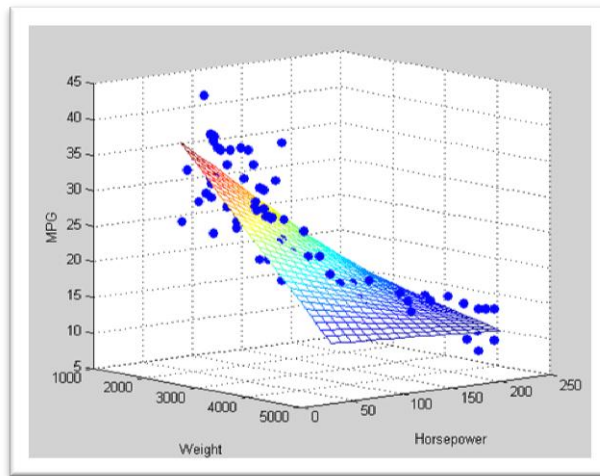


Figura 6 Ejemplo de regresión lineal múltiple en MATLAB.

También se implementó en Python. La subrutina **ols** estima un modelo de regresión lineal múltiple y provee una variedad de ajustes estadísticos con sus respectivas pruebas. Durante las pruebas se utilizaron datos sintéticos. Además provee una salida del software estadístico R para la validación de resultados.

Una salida típica se muestra a continuación.

```

=====
Dependent Variable: y
Method: Least Squares
Date: Wed, Nov 2013
Time: 21:32:11
# obs: 100
# variables: 5
=====
variable coefficient std. Error t-statistic prob.
=====
const 0.027619 0.102494 0.269474 0.788150
x1 -0.164711 0.126572 -1.301322 0.196295
x2 -0.029741 0.095559 -0.311235 0.756304
x3 -0.078676 0.104554 -0.752486 0.453619
x4 0.092286 0.121184 0.761535 0.448224
=====
Models stats Residual stats
=====
R-squared 0.032096 Durbin-Watson stat 2.211123
Adjusted R-squared -0.008657 Omnibus stat 2.434551
F-statistic 0.787569 Prob(Omnibus stat) 0.296036
Prob (F-statistic) 0.536060 JB stat 1.829644
Log likelihood -141.386863 Prob(JB) 0.400588
AIC criterion 2.927737 Skew
0.289802
BIC criterion 3.057996 Kurtosis
3.321208
=====

```

Figura 7 Ejemplo de resultados de la subrutina ols en Phytton.

Análisis armónico

El análisis espectral es parte de análisis de series de tiempo (ST), como las mediciones registradas por una estación meteorológica de cualquier variable atmosférica durante un cierto intervalo de tiempo.

El principal objetivo del análisis de series de tiempo es el desarrollo de medios cuantitativos que permitan caracterizar las series temporales, por ejemplo, decir cuantitativamente cómo una serie difiere de otra, o cómo dos series están relacionadas. Hay dos amplias clases de caracterizaciones, a saber, las técnicas del dominio de tiempo y las técnicas en el dominio de la frecuencia. El análisis espectral es una técnica empleada en el dominio de la frecuencia.

De acuerdo a Chatfield (1995): el análisis espectral (**AE**) es el nombre dado a métodos de estimación de la función de densidad espectral o espectro, de una serie de tiempo dado. Dicho análisis, como lo conocemos hoy en día, se centra principalmente en la estimación del espectro en todo el rango de frecuencias.

Por otra parte, el **AE** es esencialmente una modificación del análisis de Fourier (**AF**), hecha con el fin de hacer que sea adecuado para funciones del tiempo estocásticas, más que para funciones deterministas. El análisis de Fourier (por ejemplo, Priestley, 1981) se ocupa básicamente de la aproximación de una función por una suma de términos seno y coseno, llamada representación en series de Fourier.

Serie de Fourier (SF)

Cualquier función $x(t)$ **continua** y **periódica** que satisface ciertas condiciones, puede aproximarse por medio de una suma infinita de términos sinusoidales, multiplicados por coeficientes (factores de peso) que determinan la contribución relativa de cada componente a la señal original, es decir, la función puede aproximarse por medio de una **SF**.

Suponiendo que se tiene una función $x(t)$ definida en un intervalo $(-T, T]$, y que satisface las condiciones de Dirichlet: estas condiciones garantizan que $x(t)$ es razonablemente "bien comportada", es decir, que en todo el rango $(-T, T]$, $x(t)$ es absolutamente integrable, tiene un número finito de discontinuidades, y tiene un número finito de máximos y mínimos. Entonces, $x(t)$ puede aproximarse por **SF**:

$$X(n) = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x(t) e^{-\frac{i2\pi nt}{T}} dt \quad \text{en donde:} \quad x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(n) e^{\frac{i2\pi nt}{T}}$$

El periodo fundamental se denota por T . Si se desarrolla la exponencial compleja y se agrupan términos, se llega a las formas trigonométricas (1ª y 2ª) de la **SF**:

$$\Rightarrow x(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C(n) \cos\left[\frac{2\pi nt}{T} + \phi(n)\right]$$

$$\text{Donde: } C_0 = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x(t) dt$$

$$C(n) = 2|X(n)|$$

$$\phi(n) = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}\{X(n)\}}{\text{Re}\{X(n)\}} \right]$$

$$\Rightarrow x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[A(n) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + B(n) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right]$$

$$\text{Donde: } A_0 = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x(t) dt$$

$$A(n) = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt$$

$$B(n) = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt$$

Se puede demostrar que esta **SF** converge a $x(t)$ conforme $k \rightarrow \infty$, excepto en los puntos de discontinuidad, donde converge a la mitad de la suma de los tamaños

de paso por la izquierda y por la derecha, matemáticamente esto significa que éste es el promedio de los límites inferior y superior, $\frac{1}{2}[x(t-0) + x(t+0)]$.

Los coeficientes A_0 , $A(n)$ y $B(n)$ se denominan coeficientes de Fourier, y el cálculo de éstos se denomina análisis de Fourier o análisis armónico.

Este procedimiento, es aplicable para todo tipo de funciones $x(t)$ que cumplan las condiciones de Dirichlet mencionadas, sean reales o complejas. Para **ST** de variables físicas, tales como por ejemplo registros geofísicos, $x(t)$ es real, y por lo tanto, todos los coeficientes también son reales.

Por ejemplo, considerando la siguiente función: $f(t) = -t^2 + 1; t \in [-1,1]$

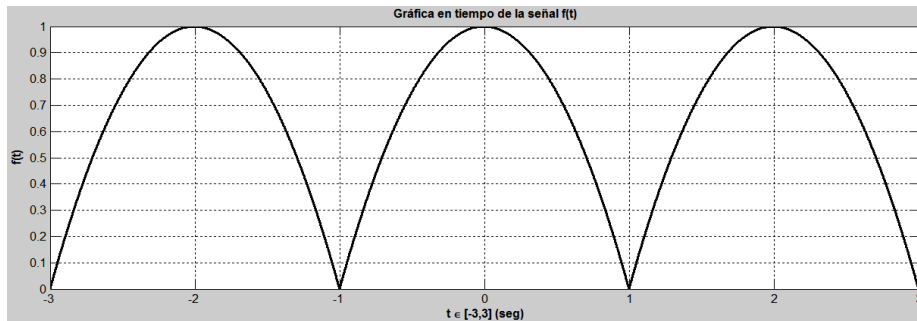


Figura 8 Ejemplo de función armónica.

Los coeficientes de Fourier son:

$$A_0 = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 (-t^2 + 1) dt = \frac{2}{3}$$

$$A(n) = \frac{2}{2} \int_{-1}^1 (-t^2 + 1) \cos\left(\frac{2\pi n t}{2}\right) dt = -\frac{4}{(\pi n)^2} (-1)^n$$

$$B(n) = \frac{2}{2} \int_{-1}^1 (-t^2 + 1) \sin\left(\frac{2\pi n t}{2}\right) dt = 0$$

La correspondiente **SF** es:

$$f(t) = \frac{2}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[-\frac{4}{(\pi n)^2} (-1)^n \cos(\pi n t) \right]$$

Espectros de frecuencias (señales en el dominio de la frecuencia)

A partir de los coeficientes de Fourier es posible obtener la representación en frecuencias de una señal analizada, consistente en un espectro de amplitudes y un espectro de fases.

En el caso de señales continuas y periódicas, el espectro de amplitudes será discreto y no periódico, extendiéndose infinitamente hacia ambos lados en el eje de la frecuencia.

$$\begin{aligned} |X(n)| &= \sqrt{[\operatorname{Re}\{X(n)\}]^2 + [\operatorname{Im}\{X(n)\}]^2} \\ &= \frac{1}{2} C(n) \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{[A(n)]^2 + [B(n)]^2} \end{aligned} \quad \begin{aligned} \phi(n) &= \tan^{-1} \left[\frac{\operatorname{Im}\{X(n)\}}{\operatorname{Re}\{X(n)\}} \right] \\ &= \tan^{-1} \left[-\frac{B(n)}{A(n)} \right] \end{aligned}$$

Puede decirse que el espectro de amplitudes es una representación gráfica de los factores de peso que intervienen en la **SF** o bien, de las amplitudes de cada componente armónica, a la señal bajo análisis.

Ejemplo, se tiene la señal discontinua y periódica: $x(t) = \begin{cases} 0 & ; t \in [0,1) \\ 1 & ; t \in (1,2) \\ 0 & ; t \in (2,3] \end{cases}$

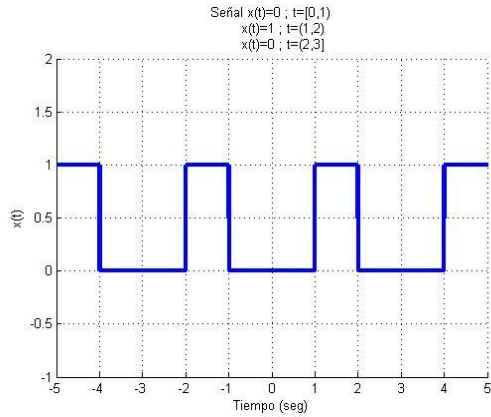


Figura 9 Señal cíclica tipo pulso rectangular.

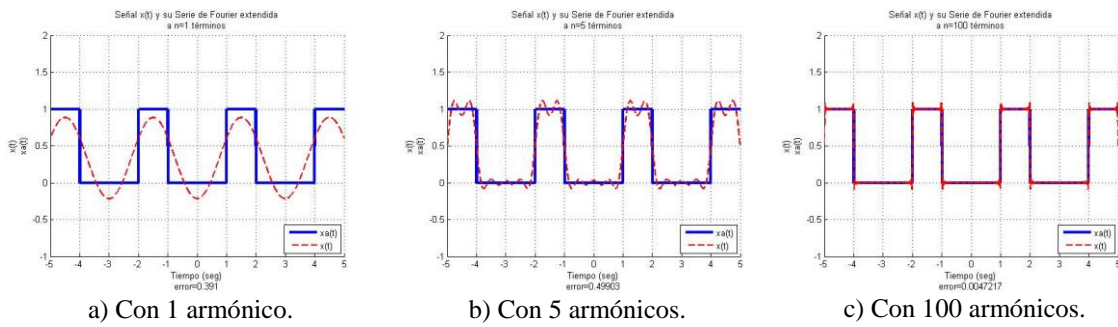


Figura 10 Aproximación de la señal tipo pulso rectangular, con distinto número de armónicos.

La aproximación de dicha función mediante series de Fourier, reconstruyendo la SF con 1, 5 y 100 armónicos se muestra en la figura 10, mientras que los espectros de amplitudes y de fases (respectivamente) se muestran en la figura 11. Este ejercicio se desarrolló en Phyton.

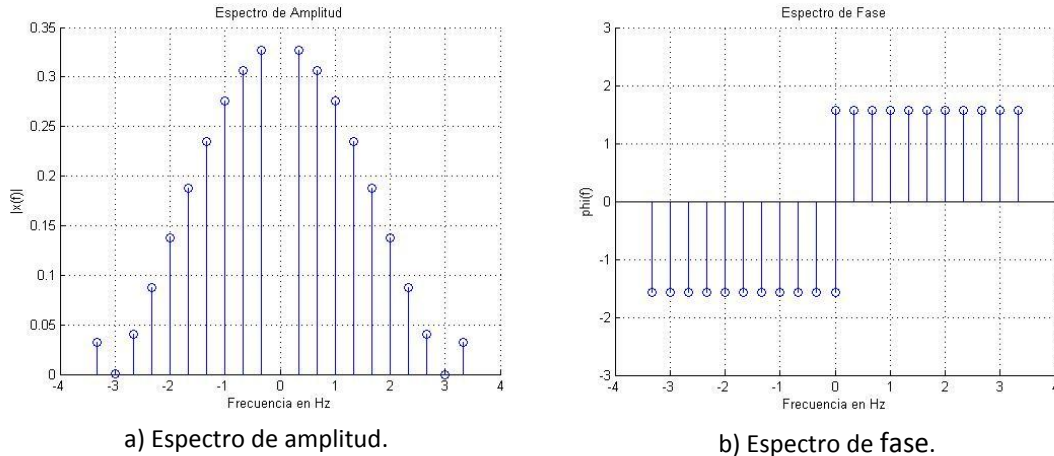


Figura 11 Espectros de la señal tipo pulso rectangular.

Ahora bien, el **AE** puede aplicarse a funciones o señales de varios tipos:

- Continuas y periódicas.
- Discontinuas y periódicas.
- Continuas y no periódicas.
- Discretas y periódicas.
- Discretas y no periódicas.
- Transitorias y de duración finita.

Por lo que para cada tipo de señal de las antes mencionadas, existe una aproximación mediante ya sea la **SF** continua o discreta, o bien mediante la transformada de Fourier (**TF**), también de tipo continua o discreta. Así por ejemplo, con el fin de aplicar el análisis de Fourier a las series de tiempo discreto, debería considerarse la representación en series de Fourier de $x(t)$, cuando ésta se define sólo en los enteros $1, 2, \dots, N$.

3.4 Wavelets (ondículas)

En la TF, la función a analizar $g_{\omega,t}$ para toda ω (frecuencia) y t (tiempo) consiste del mismo paquete $g(t)$ con sinusoides de frecuencia ω . Debido a la composición fija $g(t)$, el tamaño de la resolución de las celdas en el espacio de fase está dada

por $[\sigma_g \times \sigma_{\hat{g}}]$ y es la misma para toda ω y t . Ya que las características a frecuencias mayores (o longitud de onda corta) tienen un soporte más pequeño, sería deseable tener una función de análisis, es decir $\varphi(t)$, de la cuál su desviación estándar σ_φ sea pequeña cuando $\varphi(t)$ caracteriza componentes de alta frecuencia y viceversa. Esto se desarrolló al descomponer la función $f(t)$ usando una familia de dos parámetros de funciones llamadas wavelets. Uno de los dos parámetros es el parámetro de traslación como en el caso de la WFT, pero el otro parámetro es el parámetro de dilatación λ en vez del parámetro de frecuencia ω .

La transformada wavelet de la función $f(t)$ con energía finita está definida como la transformada integral de una familia de funciones $\varphi_{\lambda,t}(u) \equiv \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \varphi\left(\frac{u-t}{\lambda}\right)$ y está dada por:

$$\begin{aligned} Wf(\lambda, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(u) \varphi_{\lambda,t}(u) du \quad \lambda > 0 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(u) \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \varphi\left(\frac{u-t}{\lambda}\right) du \end{aligned}$$

Aquí λ es el parámetro de escala, t el parámetro de localización y la función $\varphi_{\lambda,t}(u)$ son llamadas wavelets u ondículas.

La siguiente figura ilustra la descripción del rango de análisis para las transformadas de Fourier y Wavelet.

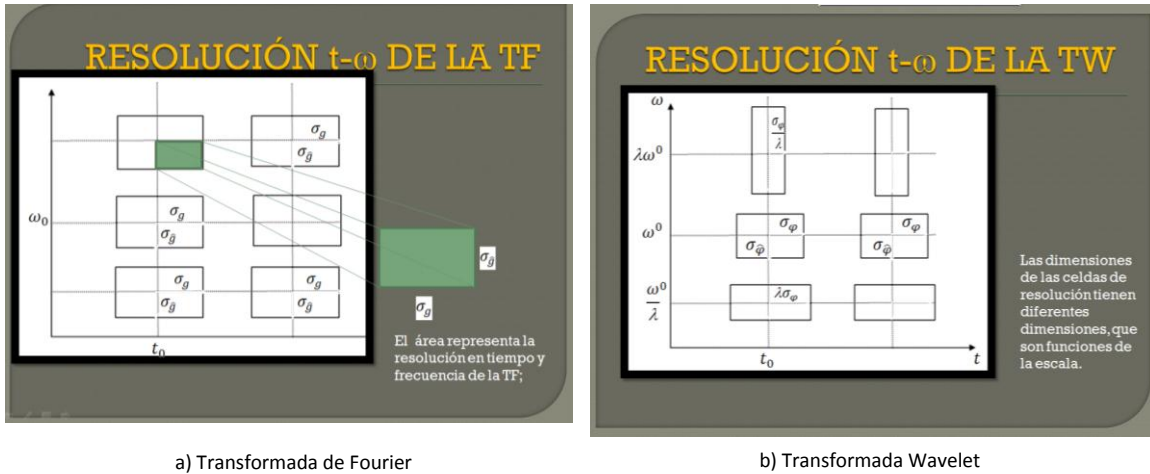


Figura 12 Resolución tiempo-frecuencia de las transformadas de Fourier y Wavelet.

Puede verse que esta transformación depende de la forma en particular de la ondícula. Existen varias especificaciones de ondículas, entre las que destaca la de Morlet, por su amplia variabilidad y soporte (cercanía del conjunto sobre el cual la señal/proceso es diferente de cero). La modificación del software libre ION y su implementación en Matlab utiliza la ondícula Morlet.

Ondícula Morlet

La ondícula de Morlet está dada por:

$$\varphi(t) = \pi^{-1/4} \left(e^{-i\omega_0 t} - e^{-\omega_0^2/2} \right) e^{t^2/2} \dots (A.1)$$

La cual es usualmente aproximada por:

$$\varphi(t) = \pi^{-1/4} \left(e^{-i\omega_0 t} \right) e^{-t^2/2} \quad \omega_0 \geq 5 \dots (A.2)$$

Ya que $\omega_0 \geq 5$, el segundo término en la primera ecuación, es despreciable, es decir, $\varphi(t) \approx 0$, satisfaciendo así la condición de admisibilidad. Por ondícula de

Morlet nos referiremos ahora a (A.2). Esta ondícula es compleja, podemos extraer información acerca de la amplitud y la fase de los procesos que comiencen a analizarse. La constante es elegida tal que $\|\varphi\|^2 = 1$. La transformada de Fourier de (2) está dada por:

$$\hat{\varphi}_{\lambda,0}(\omega) = \pi^{-1/4} e^{-(\omega-\omega_0)^2/2} \dots (A.3)$$

La transformada de Fourier de la ondícula escalada está dada por:

$$\hat{\varphi}_{\lambda,0}(\omega) = \lambda\pi^{-1/4} e^{-(\omega-\omega_0)^2/2} = \lambda\pi^{-1/4} e^{-\frac{\lambda^2}{2}(\frac{\omega_0}{\lambda}-\omega)^2} \dots (A.4)$$

Esta ondícula tiene la propiedad de que su transformada de Fourier está definida para $\omega > 0$, con centro en $\omega_{\hat{\varphi}_{\lambda,t}}^0 = \omega_0/\lambda$ con una dispersión de $\sigma_{\hat{\varphi}_{\lambda,t}} = 1/\lambda$. La ondícula $\varphi_{\lambda,t}$ asimismo está centrada en t con una dispersión de $\sigma_{\lambda,t} = \lambda$

La siguiente figura muestra las partes real e imaginaria de la ondícula de Morlet y su TF (con $\omega_0 = 5$). Podemos interpretar los resultados del análisis de un proceso de valores reales usando esta ondícula graficando el cuadrado del módulo y la fase, es decir, $|\langle f, \varphi_{\lambda,t} \rangle|^2$ y $\tan^{-1} \frac{Im\langle f, \varphi_{\lambda,t} \rangle}{Re\langle f, \varphi_{\lambda,t} \rangle}$.

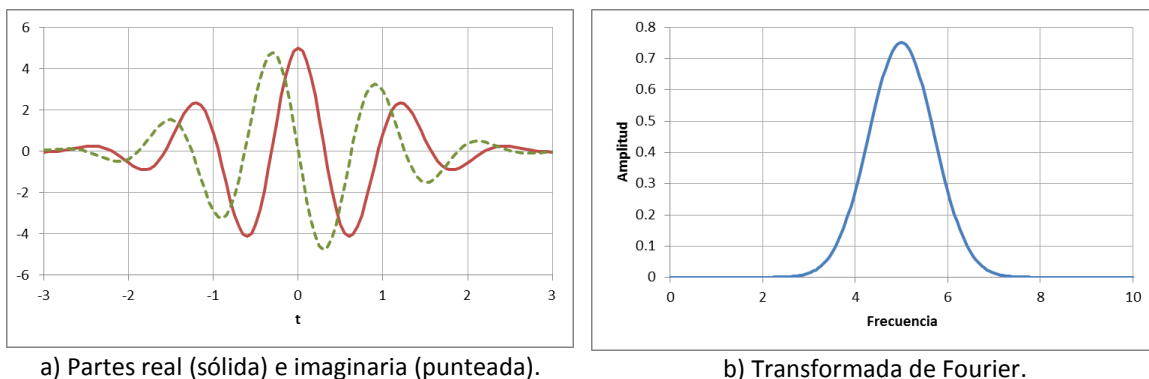


Figura 13 Ondícula de Morlet.

El rango de escalas de las gráficas se decide a partir del siguiente criterio. Si Δt es el intervalo de muestreo de $f(t)$ entonces el centro de pasa banda ω_0/λ_{min} debe ser menor que o igual a la frecuencia de Nyquist, es decir, $\omega_0/\lambda_{min} \leq 2\pi/2\Delta t$ lo que implica:

$$\lambda_{min} = \frac{\omega_0 \Delta t}{\pi} \dots (A.5)$$

La escala máxima de análisis se obtiene considerando la dispersión de $\varphi_{\lambda,t}$. Reconociendo que $|\varphi_{\lambda,t}|$ decae a 99.9% de este valor a $3\sigma_{\varphi_{\lambda,t}}$, nosotros imponemos la condición $3\sigma_{\varphi_{\lambda,t}} \leq (t_{max} - t_{min})/2$, es decir, el soporte wavelet debe estar contenido dentro del rango de datos, dado por:

$$\lambda_{max} \leq \frac{t_{max} - t_{min}}{6} \dots (A.6)$$

Transformadas Wavelets discretas

Cuando los parámetros λ y t en la transformada wavelet $\langle f, \varphi_{\lambda,t} \rangle$ son tomados sobre valores continuos, ésta es llamada la transformada wavelet continua. Para aplicaciones prácticas el parámetro de escala λ y el de localización t necesitan ser discretizados. Uno puede escoger $\lambda = \lambda_0^m$ donde m es un entero y λ_0 es un paso fijo mayor de dilatación que 1. Ya que $\sigma_{\varphi_{\lambda,t}} = \lambda \varphi_{\lambda,t}$ podemos escoger $t = nt_0 \lambda_0^m$ donde $t_0 > 0$ y depende de $\varphi(t)$, y n es entero.

La idea esencial de esta discretización puede ser entendida por una analogía con un microscopio. Si escogemos una magnificación, es decir, λ_0^{-m} , y estudiamos el proceso en una posición en particular y después pasamos a otra posición. Si la magnificación es mayor, es decir, una escala pequeña, nos movemos en pasos pequeños y viceversa. Esto se puede llevar a cabo fácilmente escogiendo los incrementos inversamente proporcionales a la magnificación (es decir, proporcional a la escala λ_0^m) que logra el método, antes mencionado, de discretización de t . Definimos entonces:

$$\varphi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{\lambda_0^m}} \varphi\left(\frac{t - nt_0 \lambda_0^m}{\lambda_0^m}\right) \dots (A.7)$$

$$= \lambda_0^{-m/2} \varphi(\lambda_0^{-m}t - nt_0) \dots (A.8)$$

La transformada wavelet

$$\langle f, \varphi_{m,n} \rangle = \lambda_0^{-m/2} \int f(t) \varphi(\lambda_0^{-m}t - nt_0) dt \dots (A.9)$$

Es llamada la transformada wavelet discreta.

Utilizando la transformada wavelet discreta (con φ decreciendo suficientemente rápido y con una elección apropiada de λ_0 y t_0 , podemos caracterizar completamente a $f(t)$. En efecto podemos escribir $f(t)$ como un desarrollo en serie.

El término “función wavelet” es usado genéricamente para referirse por completo a las wavelets ortogonales y no ortogonales. El término “base wavelet” se refiere sólo a un conjunto ortogonal de funciones. El uso de una base ortogonal implica el uso de una transformada wavelet discreta, mientras una función wavelet no ortogonal puede ser usada tanto para la transformada wavelet discreta o la continua (Farge 1992).

Transformada Wavelet Continua

La transformada wavelet continua de una secuencia discreta x_n está definida como la convolución de x_n con una versión trasladada y escalada de $\varphi_0(u)$.

$$W_n(\lambda) = \sum_{n'}^{N-1} x_{n'} \varphi^* \left[\frac{(n' - n)\delta t}{\lambda} \right] \dots (A.10)$$

Es posible calcular la transformada wavelet usando (A.10), aunque es considerablemente más rápido hacer los cálculos en el espacio de Fourier.

Para aproximar la transformada wavelet continua, la convolución en A.10 puede ser realizada N veces para cada escala, donde N es el número de puntos en la serie de tiempo (Kaiser 1994).

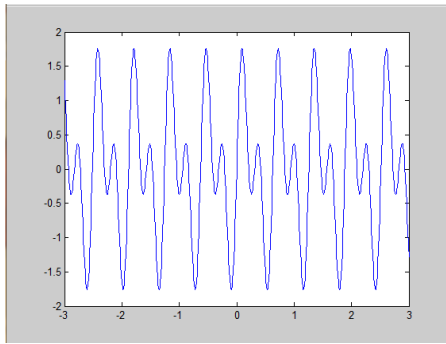
$$W_n(\lambda) = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{x}_k \hat{\varphi}^*[(s\omega_k)] e^{i\omega_k n \delta t} \dots (A.11)$$

Donde la frecuencia angular está definida como:

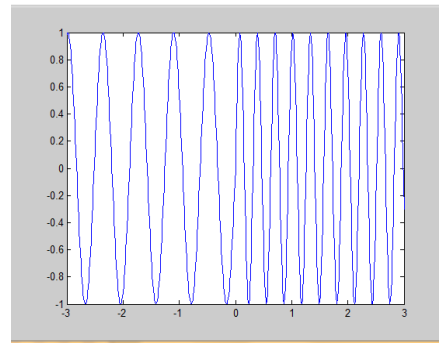
$$\omega_k = \begin{cases} \frac{2\pi k}{N\delta t} : k \leq \frac{N}{2} \\ -\frac{2\pi k}{N\delta t} : k > \frac{N}{2} \end{cases} \dots (A.12)$$

Usando A.11 y la rutina de la TF uno puede calcular la transformada wavelet continua (para una λ dada) para todas las n , simultánea y eficientemente.

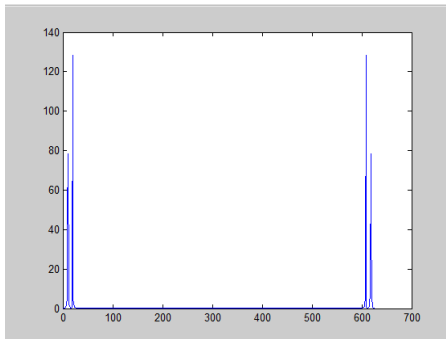
Presentamos un análisis con series teóricas, ya que en éstas podemos controlar ciertas combinaciones de frecuencias. En la siguiente figura observamos dos funciones senoidales con las mismas frecuencias pero distribuidas de diferente forma a lo largo del tiempo, al calcular el espectro de potencia de Fourier, las frecuencias que más contribuyen en la señal son las mismas, pero Fourier no distingue la distribución de éstas en el tiempo al contrario del espectro Wavelet que las ubica perfectamente.



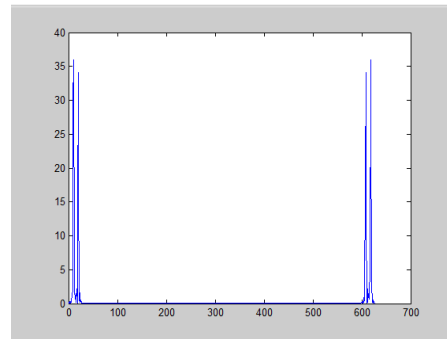
b) Función $\text{sen}(10t)+\text{sen}(20t)$



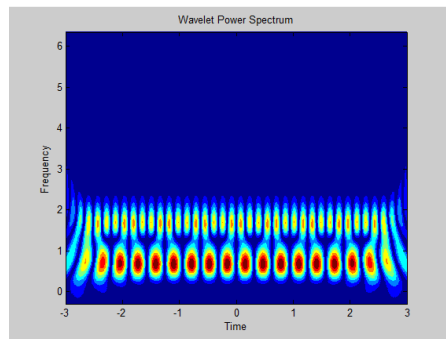
a) Función $\text{sen}(10t)$ para $t < 0$ y $\text{sen}(20t)$ para $t > 0$



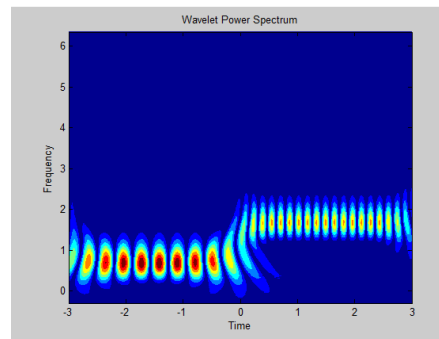
c) Espectro de potencia de Fourier de a)



d) Espectro de potencia de Fourier de b)



e) Espectro de potencia de Wavelet de a)



f) Espectro de potencia de Wavelet de b)

Figura 14 Comparación de la aplicación de las transformadas de Fourier y Wavelet en dos señales (a) y (b).

Desarrollo, adaptación y aplicación de técnicas para el análisis de tendencias hidroclimáticas

Dominio del tiempo

En el enfoque de análisis en el dominio del tiempo existen diversas técnicas y metodologías para el estudio de los datos, aquí se trata de abordar las más útiles y adecuadas para las variables de estudio que nos competen en nuestro caso.

Al estudiar las series de tiempo pueden querer alcanzarse dos metas diferentes:

- Caracterizar la serie en función de sus componentes de interés
- Predecir valores futuros de las variables

Ambos objetivos pueden conseguirse a muy distintos niveles. Es evidente que, dada la muestra, calcular la media y la desviación típica de las observaciones supone describir características de la serie. De la misma manera podemos predecir que los valores futuros de la variable van a ser iguales al último valor observado. Sin embargo, en ninguno de los dos casos se usa la información de una manera sistemática. El uso sistemático de la información muestral pasa normalmente por la formulación de modelos que pueden describir la evolución de la serie.

Análisis Gráfico y Promedios Móviles

Al analizar una serie de tiempo, es imprescindible primero revisar los gráficos de los datos a estudiar, ya que esto nos dará idea de los comportamientos y tendencias principales. El enfoque del análisis gráfico es tan importante que en la actualidad hay corrientes de investigación de identificación de patrones sólo para pronóstico por medio de 'Charts' (gráficos) en los que un supuesto importante es que no importa de qué tipo de datos se trate, lo importante es que sus gráficos pueden manifestar síntomas de sus comportamientos futuros. Esta característica hace que el enfoque también tenga muchos detractores. Ignorando si se hará

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

pronóstico o no por medio de gráficos, siempre es importante hacer un análisis gráfico de los datos. Cuando se estudian series de tiempo de variables como las meteorológicas o financieras, generalmente se hace distinción entre tres tipos de movimientos en la dinámica de las variables:

- Movimientos primarios o tendencias primarias
- Movimientos secundarios o tendencias secundarias
- Movimientos erráticos

Los movimientos o tendencias primarias son aquellos comportamientos que mantienen cierto crecimiento o decrecimiento y se identifican a largo plazo, los movimientos o tendencias secundarias se identifican como comportamientos permanentes en periodos de tiempo más o menos cortos, y los movimientos erráticos generalmente no representan tendencias porque son movimientos que se presentan en periodos de tiempo demasiado cortos como para poder determinar una postura. Veamos, por ejemplo, las siguientes imágenes:

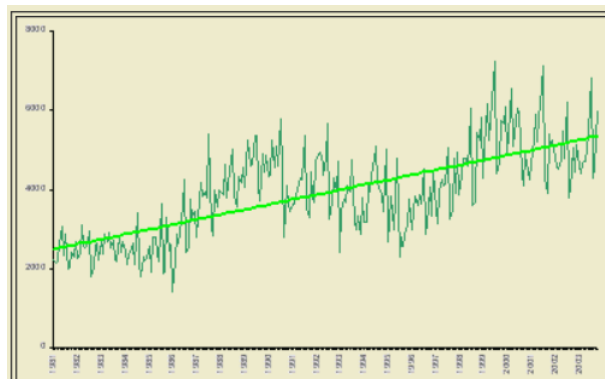


Figura 15 Serie de tiempo y su tendencia primaria.

La tendencia primaria o central de esta serie de datos es creciente mientras las tendencias secundarias, es decir, a plazos más cortos no lo son.

En siguiente imagen observamos que además los movimientos o tendencias secundarios son tanto crecientes como decrecientes en determinados periodos pero esta componente refleja comportamientos recurrentes, aunque no tienen por qué ser exactamente periódicos, con un periodo de determinado tamaño.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

Muestran, habitualmente, cómo se suceden las etapas de crecimiento y desaceleración en esta variable sin importar cuál sea.

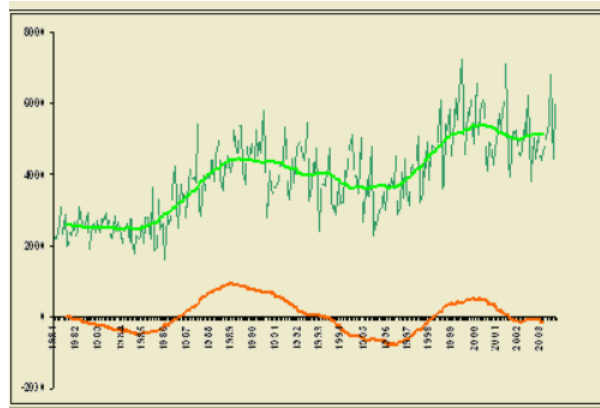


Figura 16 Serie de tiempo y su tendencia secundaria.

Con frecuencia los ciclos en las series de tiempo resultan de la superposición o juxtaposición de distintos efectos, con periodos diferentes, más cortos o más largos unos que otros, por ello, son difícilmente reconocibles y muchas veces no se consiguen separar de la tendencia, al menos para series no demasiado largas.

La figura anterior lo ilustra con la representación de la serie tiempo (verde) junto con la componente cíclica (de color naranja). Como decíamos, a veces no se separa de la tendencia y entonces a la componente se le denomina entonces "*ciclo-tendencia*". En esa figura se muestra (en color verde y con trazo grueso) la del ciclo-tendencia de la serie. Por otro lado, si sólo observamos una sección anual de los datos tenemos los movimientos erráticos que difícilmente nos dejan interpretar a muy corto plazo, esto debe tomarse en cuenta, ya que es una razón por la que es difícil hacer pronóstico de valores de manera poco riesgosa ya sea a corto o largo plazo.

Desde otro punto de vista, podemos descomponer las series de tiempo en cuatro tipos de componentes:

1. Componente tendencial: Hace referencia al componente que identifica la tendencia primaria (comportamiento o movimiento a largo plazo). Generalmente las tendencias se construyen como la recta de regresión de la nube de puntos que representa la serie y, como veremos, es una de las opciones a la hora de calcular la tendencia.
2. Componente cíclico: Esta componente refleja comportamientos repetitivos o recurrentes, aunque no necesariamente se presenten tiempo.
3. Componente estacional: Este es el motivo por el que se consideran los periodos agrupados en otros periodos más amplios en el tratamiento de muchas series temporales. Muchas series meteorológicas presentan oscilaciones regulares en el mismo mes, por ejemplo, de cada año, y con unas pautas que se presentan, sin repetirse exactamente, todos los años. Son las llamadas "*variaciones estacionales*", y pueden deberse a las características climatológicas de cada época del año.

La estacionalidad no se presenta sólo cuando el periodo amplio es el año. A veces hay estacionalidades mensuales o semanales en series diarias, o estacionalidades diarias en series horarias, como son las series de cotizaciones bursátiles, por ejemplo. Sí es importante que las estacionalidades tengan un periodo no superior al anual, para que no se confundan con las componentes cíclicas.

4. Componente irregular: También llamado "*ruido*", recoge alteraciones de la serie, pequeñas en su incidencia, y sin una pauta periódica ni tendencial reconocible. Se considera que está ocasionada por múltiples factores, de pequeña entidad y diferentes ritmos temporales, que no se pueden estudiar individualmente. Esto en la teoría, porque en la práctica lo que ocurre es que la consideración de una serie como compuesta por componentes tendenciales, cíclicas y estacionales no deja de ser un modelo y, como tal, una representación aproximada e imperfecta, aunque valiosa, del mundo real. La componente irregular recogería, en consecuencia, la incapacidad del modelo para explicar a la perfección el comportamiento de la serie temporal.

Nótese que si se impone la condición de que no tengan pautas tendenciales o periódicas de la serie, deben entonces comportarse de forma independiente de las otras componentes, que tienen unas pautas sistemáticas.

Un reto en series temporales es identificar cada uno de los componentes mencionados anteriormente de manera exitosa, tarea que no siempre es fácil. Una técnica que puede ayudar a suavizar los gráficos de series de tiempo y que se usa principalmente para determinar tendencias a largo y corto plazo es la obtención de Promedios Móviles de las series. Los promedios móviles, como su nombre lo indica, se obtienen calculando promedios de determinado número de datos (este número es el orden) y recorriendo los datos para calcular el siguiente promedio. Por ejemplo, si se desea calcular un promedio móvil de orden 3, MA(3), se toman los primeros tres datos y se calcula el promedio, a continuación, se calcula un promedio con los datos del segundo al cuarto, posteriormente el promedio de los datos del tercero al quinto, y así sucesivamente.

Para comenzar la ejemplificación de esta sección consideremos la serie de datos de precipitación mensual de una zona central de México que fueron tomados de 1901 al 2009. En este primer gráfico tenemos en rojo un MA(12), que identifica tendencias anuales (debido a que el orden es 12 y las observaciones son mensuales).

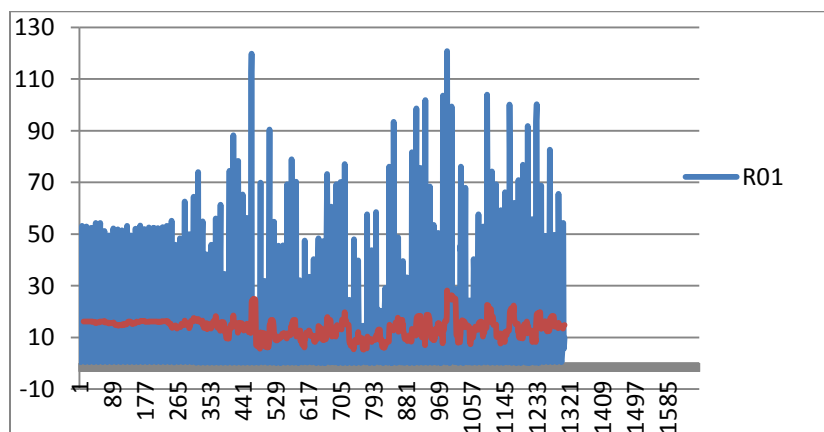


Figura 17 Serie de tiempo de precipitación mensual en el centro de México entre 1901 y 2009, y su promedio móvil MA(12).

Podemos ver que no existe una tendencia anual a crecer o decrecer de manera concreta, más bien el comportamiento se ha mantenido constante pero después de los primeros 20 años (correspondientes a los primeros 300 datos) ha habido

muchos movimientos erráticos, es decir, aproximadamente a partir de 1920, esto puede coincidir con la idea de que puede verse como referente del cambio climático el periodo de 1930 a 1960.

En el siguiente gráfico veamos la tendencia trianual. Vemos que en periodos de tres años no podemos concluir demasiado pues no existe una componente tendencial de este orden.

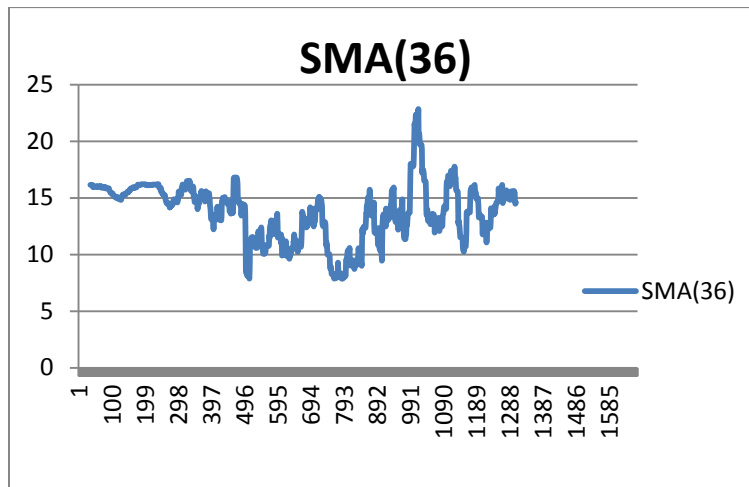


Figura 18 Promedio móvil trianual de precipitación mensual.

Para las tendencias decadales, MA(120), es decir, el comportamiento en periodos de 10 años, podemos ver en la siguiente figura que la precipitación decreció los primeros 50 años y pareciera que los 10 años siguientes repunta pero vuelve a caer a finales de los 60's cuando comienza un verdadero repunte que termina en los 90's. Con base en esta escala, no se puede definir cuál es la tendencia, en caso de existir.

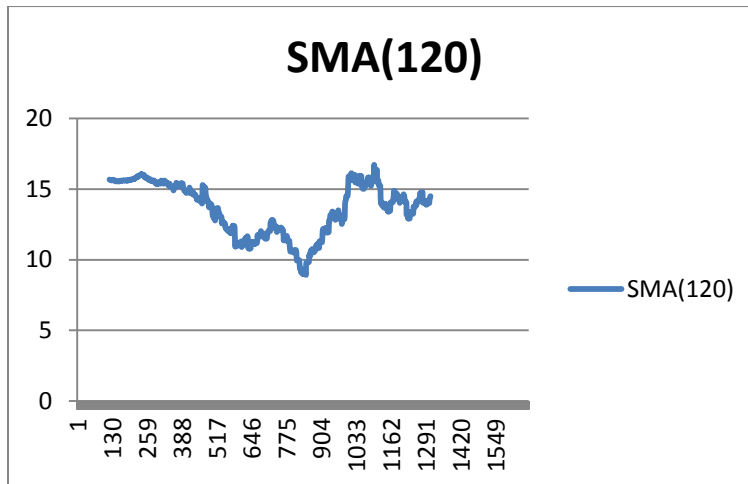


Figura 19 Promedio móvil decadal de precipitación mensual.

Ahora veamos tendencias en periodos de tres décadas:

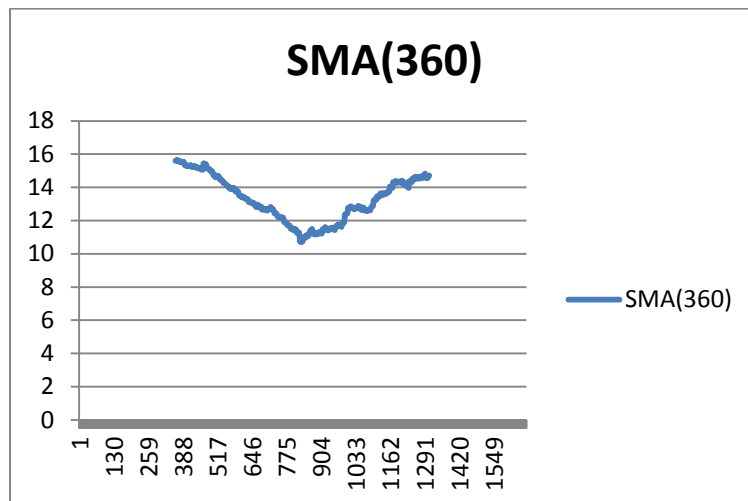


Figura 20 Promedio móvil tridecadal de precipitación mensual.

Este caso es interesante ya que vemos como la precipitación decayó hasta mediados de la década de los 60's y desde ese momento hasta hoy ha tenido un repunte sin alcanzar sus niveles iniciales aún. Esta conclusión que es muy interesante debido a que reforzaría la idea generalizada de “que ya no llueve como antes”.

Correlogramas

Considerando que estudiaremos variables que, a pesar de ser continuas, pueden ser discretizadas y han sido tomadas a intervalos regulares, el instrumento fundamental a la hora de analizar las propiedades de una serie temporal en términos de la interrelación temporal de sus observaciones es el denominado **coeficiente de Autocorrelación** que mide la correlación, es decir, el grado de asociación lineal que existe entre observaciones separadas k periodos. Estos coeficientes de autocorrelación proporcionan mucha información sobre cómo están relacionadas entre sí las distintas observaciones de una serie temporal, lo que ayudará a construir un modelo apropiado para los datos.

La **dependencia serial** en una series de tiempo hace referencia al hecho de que las respuestas emitidas por el sistema que produce la serie de datos en un determinado momento están estrechamente relacionadas con las respuestas emitidas por el mismo sistema en un tiempo anterior de la misma serie, esto significa que, las mediciones no son completamente independientes unas de otras.

Algunos investigadores afirman que la dependencia serial manifiesta que las mediciones temporalmente contiguas o adyacentes tienden a estar relacionadas una con otra. Es la correlación existente entre datos, por lo que se denomina **Correlación Serial o Autocorrelación**.

Para una serie temporal dada, se calculan varios coeficientes de autocorrelación, se puede calcular uno por cada valor de " k ", donde k representa el número de observaciones de separación entre cada par de datos. En concreto, se puede fijar el grado en que un valor en el tiempo t se ve influido por valores de los tiempos $t-1$, $t-2$, $t-3$, etc. El grado en que un valor del tiempo t se ve afectado por el tiempo $t-1$ se denomina autocorrelación de un retardo, el grado en que un valor del tiempo t se ve afectado por el tiempo $t-2$ se denomina autocorrelación con retardo de tamaño dos, etc.

Las causas principales de autocorrelación son las tendencias o ciclos. Las tendencias se definen como una dirección natural en el nivel del comportamiento observado que aumenta o disminuye progresivamente a lo largo del tiempo. El coeficiente de autocorrelación es un indicador de la posible existencia de tendencias o ciclos.

Dominio de la frecuencia

Para analizar una serie de tiempo (ST) en el dominio de la frecuencia, se puede utilizar alguna herramienta que tenga capacidades para el cálculo de la transformada de Fourier, como el paquete *The Signal Processing Toolbox* de MATLAB, con el objeto de estimar y analizar la utilidad del espectro de potencia. Analizaremos la aplicación en dos ST de precipitación, extraídas de los archivos: “CR-USMXR01.xlsx” y “CR-USMXR02.xlsx”, ST1 y ST2, respectivamente. Ambas corresponden a eventos de precipitación mensual, comprendiendo del año 1901 hasta el año 2009, teniendo así un total de 1308 muestras cada una.

En la figura 21 se muestran las gráficas de estas series de tiempo, y se puede observar que ambas gráficas presentan comportamientos similares en el tiempo, aunque la segunda presenta amplitudes significativamente mayores.

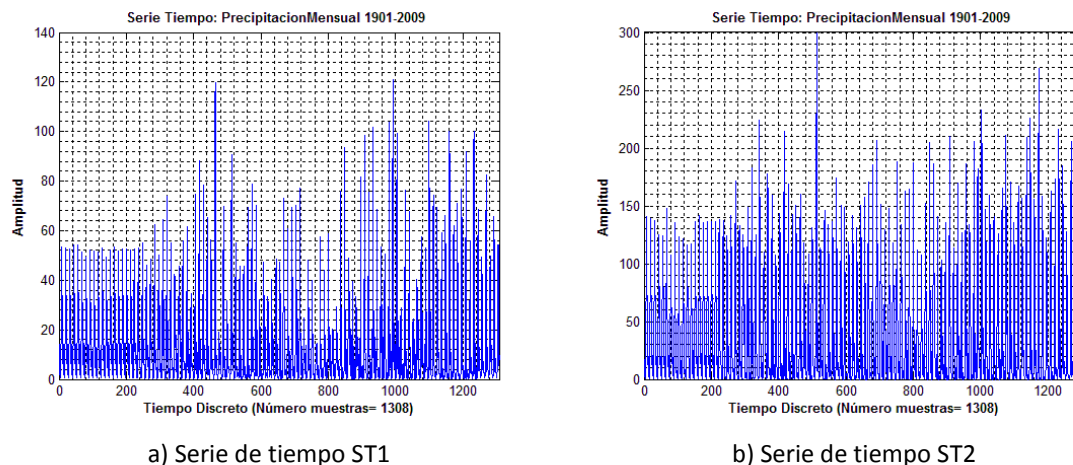


Figura 21 Series de tiempo de precipitación.

Al analizar los espectros de potencia, se pueden identificar las frecuencias en las que se presentan los mayores aportes de precipitación, con lo cual es posible asociar a cada frecuencia identificadas un periodo de tiempo T , el cual, dependiendo de su duración, puede ser estudiado y de ser el caso, relacionado con algún evento atmosférico u oceánico que coincida con dichas periodicidades en la precipitación.

Por ejemplo, eventos como: la variabilidad de la temperatura superficial del océano Atlántico tropical (caracterizada por ciclos de 10 a 15 años), El Niño/Southern Oscillation (ENSO), el cual tiene ciclos que duran entre dos y siete años, el ciclo anual, etc.

Para nuestro caso de ejemplo, los espectros de potencia se muestran en la figura 22. Observamos que para la ST1 destacan 4 frecuencias $f_1=0.0835$, $f_2=0.1665$, $f_3=0.25$ y $f_4=0.3335$, las cuales corresponden a periodos de 12, 6, 4 y 3 meses respectivamente. Por otra parte, para la ST2 destacan sólo 3 frecuencias $f_1=0.0835$, $f_2=0.1665$ y $f_3=0.25$, con periodos de y 4 meses respectivamente.

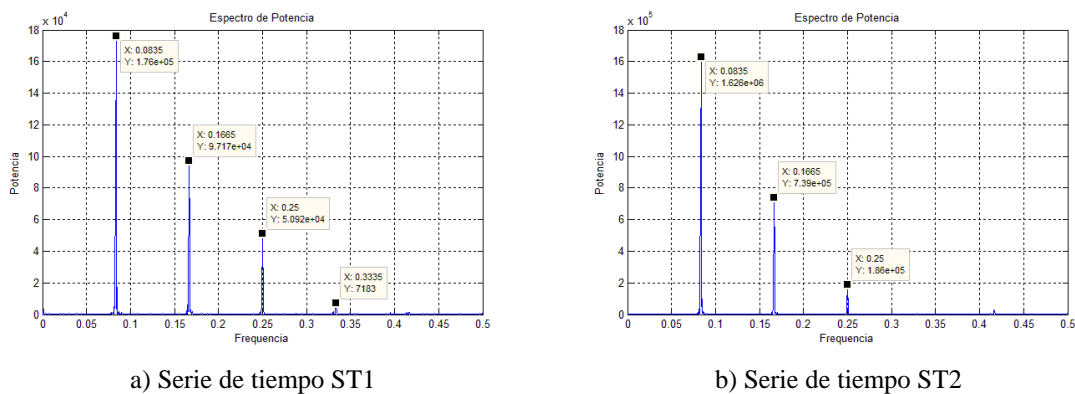


Figura 22 Espectro de potencia

Cabe mencionar que para este ejemplo, se eliminó la tendencia lineal (a largo plazo) mediante el comando *detrend* de MATLAB, ya que la transformada rápida de Fourier (FFT), tiene la desventaja que la resolución en frecuencia depende del periodo muestreado ($f_r=1/T$), y si la señal tiene frecuencias más bajas que esta la FFT puede malinterpretar dicha tendencia como un periodo muy largo con una

amplitud alta (Trauth, 2010). Por este motivo, es una práctica común en el análisis espectral la eliminación de tendencia.

Por otro lado, también conviene aclarar que es muy importante considerar la teoría de filtrado lineal de una señal empleando el análisis de frecuencias. Con el fin de eliminar el ruido en las series de tiempo, el espectro de potencia también resulta de gran ayuda.

Dominios del tiempo, frecuencia y del espacio

Las aplicaciones de las transformadas wavelets continuas para el análisis de series de tiempo es similar al ventaneo en la Transformada de Fourier, la transformada wavelet descompone un serie de tiempo unidimensional en una bidimensional, en el espacio tiempo-frecuencia.

La mayoría de las series de tiempo que capturan el comportamiento de algún proceso natural exhiben una no periodicidad en sus estadísticas. Mientras las series de tiempo contengan periodos dominantes, estas señales pueden variar en amplitud y frecuencia sobre largos periodos de tiempo. Idealmente tendríamos que separar los periodos de oscilación (repetición de una fluctuación en la serie de tiempo, ya sea regular o no) largos de los cortos.

El análisis wavelet procura resolver este problema por la descomposición de las series de tiempo en el espacio tiempo/frecuencia simultáneamente. Uno puede obtener información de ambos espectros, de cualquier señal “periódica” y saber cómo estas amplitudes varían con el tiempo.

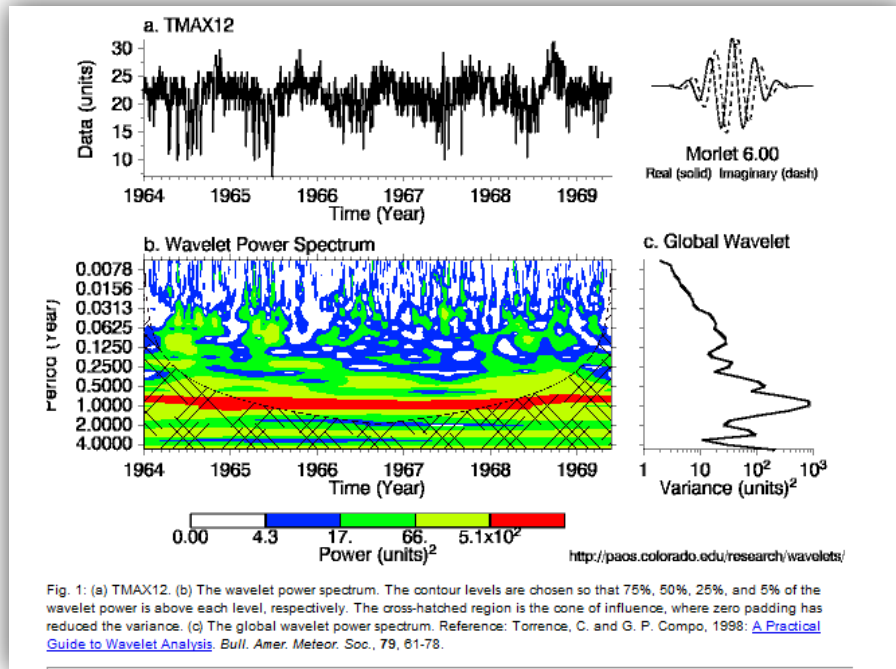


Figura 23 Ejemplo del uso de la transformada Wavelet para analizar la temperatura máxima.

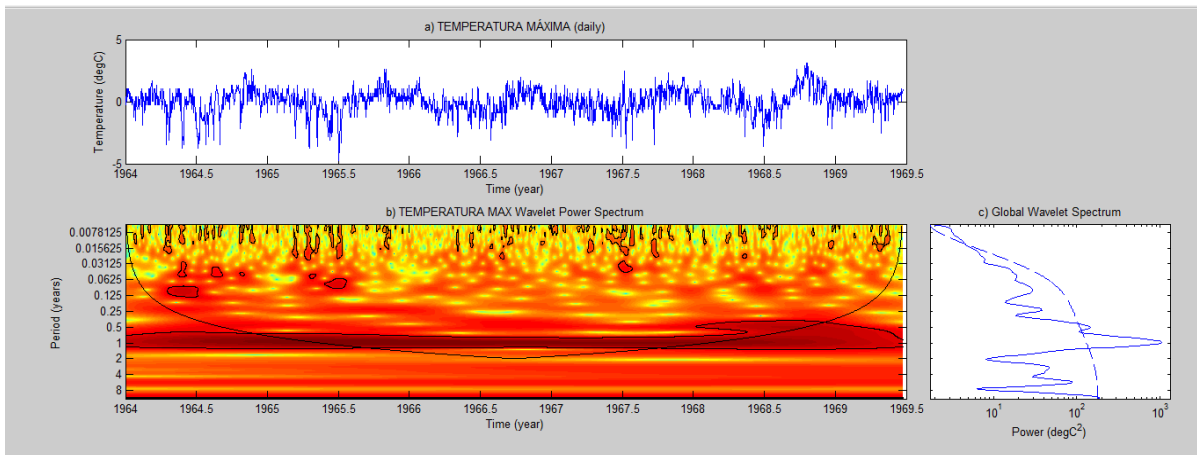


Figura 24 Espectro de potencia wavelet para la temperatura máxima en Apizaco de los últimos 2000 mil datos del periodo 1940-1970 (obtenido del software ION scripts wavelets modificado en MATLAB).

Un ejemplo de aplicación de la transformada wavelet es el análisis de una serie de tiempo de precipitación obtenida de la base datos del Estado de Tlaxcala se presenta en la figura anterior, en la que el eje X es la localización wavelet del tiempo y el eje Y es el periodo wavelet en años. En la figura se distingue claramente (línea roja de color obscuro) que la aportación principal en la variable temperatura es la variabilidad anual, pues cada año llueve de distinta forma.

Finalmente, haciendo un comparativo de la capacidad de los métodos mencionados anteriormente, observamos la ventaja de la transformada Wavelet sobre la de Fourier en cuanto a que ésta última considera un estado oscilatorio establecido, es decir, que dado un patrón, este se repite indefinidamente, mientras que con la transformada Wavelet se pueden reproducir señales no solamente establecidas sino también con variaciones en el tiempo.

Además de los ejemplos realizados con ION en MATLAB, también se descargó la librería wavelet2d, para C++, que incorpora transformaciones 1D y 2D discreta, estacionarias, que funciona en Windows y Linux. Es paquetería de uso gratuito.

Referencias

- [1] CENAPRED, (2002) Serie Fascículos, Secretaría de Gobernación
- [2] Davis, J.C., 1973: Statistics and data analysis in geology. J.Wiley Ed., 550 pp.
- [3] Dai Aiugo, Trenberth Kevin E. y Quian Taotao; 2004: A global dataset of Palmer Severity Index for 1870-2002:Relationship with Soil Moisture and Effects of surface Warming, Journal of Hidrometeorology,1117-1130.
- [4] Flasse, S.P. and P. Ceccato, 1996. A contextual algorithm for AVHRR fire detection. Int. J. Remote Sensing 17(2), 419- 424.
- [5] Heim, Richard R., 2002: A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83, 1149–1165.
- [6] Huang, J., H. Van den Dool, and K. P. Georgakakos, 1996: Analysis of model-calculated soil moisture over the United States (1931–93) and application to longrange temperature forecasts. *J. Climate*, **9**, 1350–1362.
- [7] Kogan, F. N., 1995: Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **76**, 655–668.
- [8] Lott, N., and T. Ross, 2000. NCDC Technical Report 2000-02, A Climatology of Recent Extreme Weather and Climate Events. [Asheville, N.C.]: National Climatic.
- [9] McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, *Eighth Conf. on Applied Climatology*, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc., 179–184.
- [10] Palmer, W. C., 1965: Meteorological drought. Office of Climatology Research Paper 45, U.S. Weather Bureau, 58 pp.

- [11] Riebsame, W. E., S. A. Changnon, and T. R. Karl, 1991: Drought and natural resources management in the United States. Westview Special Studies in Natural Resources and Energy Management, 174 pp.
- [12] Svoboda, Mark; LeComte, Doug; Hayes, Mike; Heim, Richard; Gleason Karin, Angel, Jim; Rippey, Brad; Tinker, Rich; Palecki, Mike; Stooksbury, David; Miskus, David y Stephens Scott.(2002), The Drought Monitor.
- [13] Wilhite, D. A., 2000: Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. *Drought: A Global Assessment*, D. Wilhite, Ed., Vol. 1, 3–18.
- [14] Willeke, G., J. R. M. Hosking, J. R. Wallis, and N. B. Guttman, 1994: The National Drought Atlas. Institute for Water Resources Rep. 94-NDS-4, U. S. Army Corps of Engineers, CD-ROM.
- [15] Abramowitz, M., and I. A. Stegun (eds), (1965) Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. Dover Publications, Inc., New York, New York, 1046pp.
- [16] Alley, W. M., (1984) The Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions. *Journal climate applied meteorology*, **23**, 1100–1109.
- [17] Artusa, A., B. Pugh, A. Allgood, R. Thicker and D. Miskus (2012). Current and Future Applications of Tools for U.S. Seasonal Drought Outlook. *En: 37th Climate Diagnostics & Prediction Workshop (Ft. Collins Colorado, October 25, 2012). Hilton Fort Collins. 38 slide.* <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/outreach/proceedings/cdw37/proceedings/AArtusa.pdf>.
- [18] Cancelliere, A., Loukas A., Pangalou D., Rossi G., Tigkas D., Tsakiris G., Van gelis H. (2007) Drought characterization [Part 1. Components of drought planning. 1.3. Methodological component]. In: Iglesias A. (ed.), Moneo M. (ed.), López - Francos A. (ed.). *Drought management guidelines technical annex*. Zaragoza : CIHEAM / EC MED A Water, 2007 . p. 85-102 (Options Méditerranéennes: Série B. Etudes et Recherches; n. 58)

- [19] Edwards C. D and T. B McKee (1997). Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. Atmospheric Science paper No.634. Climatology Report No. 97-2. 155pp.
- [20] Hamill T. M. and J. S. Whitaker (2006) Probabilistic Quantitative Precipitation Forecasts Based on Reforecast Analogs: Theory and Application. *Monthly Weather Review*. November Vol 134: 3209-3230. http://www.esrl.noaa.gov/psd/people/tom.hamill/reforecast_analog_v2.pdf
- [21] Huang, J., H. M. van den Dool, and K. G. Georgakakos, (1996) Analysis of model calculated soil moisture over the US (1931 – 1993) and applications to long range temperature forecasts, *Journal of Climate*.,Vol 9, 1350 –1362.
- [22] Huang, J., H. M. van den Dool, and K. G. Georgakakos, (1996) Analysis of model calculated soil moisture over the US (1931 – 1993) and applications to long range temperature forecasts, *Journal of Climate*.,Vol 9, 1350 –1362.
- [23] Huang, J., H. M. van den Dool, and K. G. Georgakakos, (1996) *op. cit.*
- [24] Huang, J., H.M. van den Dool, and A.G. Barnston, 1996: Long-Lead Seasonal Temperature Prediction Using Optimal Climate Normals. *J. Climate*, 9, 809–817.
- [25] Lyon, B., M. A. Bell, M. K. Tippett, A. Kumar, M. P. Hoerling, Xiao-Wei Quan, Hui Wang, 2012: Baseline Probabilities for the Seasonal Prediction of Meteorological Drought. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 51, 1222–1237.
- [26] McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January,, Anaheim, California, American Meteorological Society, 179-184
- [27] McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, (1995) Drought monitoring with multiple time scales. *Preprints, 9th Conference on Applied Climatology*, 15-20 January, Dallas, Texas, American Meteorological Society: 233-236.
- [28] Méndez, P., M. (2010) Variabilidad espacio Temporal de la sequía meteorológica en México: aspectos dinámicos. Tesis UNAM, Ciudad Universitaria México DF.102 pp.

- [29] Mercado J. R., M. Íñiguez, P. Guido, J. Ramírez, A. González. (2014). "El coeficiente de descarga y la densidad beta". Tecnología y Ciencia del Agua. Saldrá publicado en el Vol. V, No. 2, marzo-abril de 2014.
- [30] Palmer, W. C., (1965) Meteorological drought. Office of Climatology Research Paper 45, Weather Bureau, Washington, D.C., 58 pp.
- [31] Thom, H. C. S., 1966: Some Methods of Climatological Analysis. WMO Technical Note Number 81, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 53 pp.
- [32] Thornthwaite, C. W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, **38**, 55–94.
- [33] Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R. (1955). *The water balance*. Publication in Climatology. Laboratory of Climatology. Dresel Inst. Technol., 8(8), pp. 1-104.
- [34] Verdin, J., D. Pedreros y G. Eilerts (2003). Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI)", *FEWS - Red de Alerta Temprana Contra la Inseguridad Alimentaria, Centroamérica*, USGS/EROS Data Center.
- [35] Wells, N., S. Goddard and M. J. Hayes (2004). Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index. *American Meteorological Society*. Vol 17: 2335:2351.
- [36] Zhang, C. and J. Gottschalck (2002): SST Anomalies of ENSO and the Madden-Julian Oscillation in the Equatorial Pacific. *Journal of Climate*, 15, 2429-2445.
- [37] Dominique Marbouty, ECMWF Newsletter, 2006/07, ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. ECMWF Newsletter 110, Winter 2006/7 [http://www.ecmwf.int/publications/newsletters/pdf/110_rev.pdf].
- [38] ERA-interim (2013) http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim_full_daily
- [39] Pacanowsky, r. C., and s. M. Griffies, cited 1998: mom 3.0 manual. Noaa/gfdl. [available online at http://www.gfdl.noaa.gov/smg/mom/web/guide_parent/guide_parent.html]

- [40] Rojas-Castro, A. y G. Colorado-Ruiz (2012): reporte técnico “Identificación, descarga y procesamiento de datos de un modelo de circulación general para su análisis y uso en el pronóstico de sequía”. Apoyado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua mediante el proyecto TH1205.1.
- [41] Saha, S., S. Moorthi, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, P. Tripp, H. Pan, D. Behringer, Y. Hou, H. Chuang, M. Iredell, M. Ek, J. Meng, R. Yang, 2011: The NCEP Climate Forecast System Version 2. (To be submitted to the Journal of Climate).
- [42] Schulzweida, U. L. Kornblueh y R. Quast, 2009: CDO User’s Guide, climate data operators version 1.4.1.
- [43] Wang, w., s. Saha, h.-l. Pan, s. Nadiga, and g. White, 2005: simulation of enso in the new ncep coupled forecast system model. Mon. Wea. Rev., 133, 1574–1593.
- [44] Willmott, C.J. y K. Matsuura, 2005: Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Climate Research, 30, 79-82.
- [45] Liu S.D., S.K. Liu, Z.T. Fu, K. Ren, Y. Guo, (2003). *The most intensive fluctuation in chaotic time series and relativity principle*, Chaos, Solitons and Fractals 15, 627–630.
- [46] Molz F. J., Liu H. H., Szulga J., (1997). “Fractional Brownian motion and fractional Gaussian noise in subsurface hydrology: A review, presentation of fundamental properties, and extensions”, *Water resources research*, vol. 33, No. 10, 2273-2286, Oct.
- [47] Mercado J. R., Lázaro P., Brambila F., Fuentes C., (2002). Aproximación Fractal para los Semivariogramas de los Niveles Freáticos, *Revista de Matemáticas: Teoría y Aplicaciones*, Vol. IX, No. 2, Julio, 85-100.
- [48] Embrechts P., Maejima M., (2000). An introduction to the theory of selfsimilar stochastic processes. *International Journal of Modern Physics B.*, 14(12-13):1399-1420.
- [49] Rafael L. Bras and Ignacio Rodríguez-Iturbe, (1993). Random functions and hydrology. Chapter 5, Long-term Persistence in Hydrologic Modeling. Dover Pub., New York, pp. 561.
- [50] Meyer Yves, (1993). *Wavelets, Algorithms and Applications*. SIAM, Philadelphia, pp. 133.
- [51] Louis A. K., P. Maaß, A. Rieder (1997). *Wavelets Theory and Applications*, John Wiley and Sons, Chichester, pp. 324.

- [52] Chui Charles K., (1997). Wavelets: A Mathematical Tool for Signal Processing, SIAM, Philadelphia, pp. 210.
- [53] Crowley, T. J. y North, G. R.: Paleoclimatology, Oxford Monographs on Geology and Geophysics 18, Oxford, UK, 349 pp, 1991.
- [54] Emile-Geay, J., Cane, M., Seager, R., Kaplan, A. y Almasi, P.: El Niño as a mediator of the solar influence on climate, *Paleoceanography*, 22 (3), A3210, doi:10.1029/2006PA001304, 2007.
- [55] Fairbridge, R. W. y Sanders, J. E.: The Sun's orbit AD 750-2050. Basis for new perspectives on planetary dynamics and Earth-Moon linkage, en: *Climate, history and predictability*, Rampino, M. R., Sanders, J. E., Newman, W. S., y Königsson, L. K. (Eds.), Van Nostrand-Reinhold, New York, USA, pp 446-471, 1987.
- [56] Fairbridge, R. W. y Shirley, J. H.: Prolonged minima and the 179-yr cycle of the solar inertial motion, *Sol. Phys.*, 110, 191-220, 1987.
- [57] Hurrell, J. W., Visbeck, M., Busalacchi, A., Clarke, R. A., Delworth, T. L., Dickson, R. R., Johns, W. E., Koltermann, K. P., Kushnir, Y., Marshall, D., Mauritzen, C., McCartney, M. S., Piola, A., Reason, C., Reverdin, G., Schott, F., Sutton, R., Wainer, I. y Wright, D.: Atlantic climate variability and predictability: A CLIVAR perspective. *J. Climate*, 19(20), 5100-5121, 2006.
- [58] IPCC (2007): Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. y Miller, H. L. (Eds.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 996 pp, 2007.
- [59] IRI (2010): International Research Institute for Climate and Society, IRI/LDEO Climate Data Library, <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.Indices/.nino/.EXTENDED/.NINO3/>, acceso: 10 Enero 2010.
- [60] Jose, P. D.: Sun's Motion and Sunspots, *Astron. J.* 10(1), 193-200, 1965.
- [61] Landscheidt, T.: Extrema in sunspot cycle linked to Sun's motion, *Sol. Phys.*, 189, 413-424, 1999.
- [62] Loutre, M. F., Berger, A., Bretagnon, P. y Blanc, P.-L.: Astronomical frequencies for climate research at the decadal to century time scale, *Clim. Dynam.*, 7, 181–194, 1992.
- [63] Mann, M. E., Cane, M. A., Zebiak, S. E. y Clement, A.: Volcanic and Solar Forcing of the Tropical Pacific Over the Past 1000 Years, *J. Climate*, 18, 447-456, 2005.
- [64] Peixoto, J. P. y Oort, A. H.: *Physics of Climate*, American Institute of Physics, New York, 520 pp, 1992.

“Análisis de metodologías para monitorear y estimar escenarios de la ocurrencia de sequía a corto, mediano y largo plazo para México (TH1325.1)”

- [65] Schove, D. J.: The Sunspot Cycle, 649 B.C. to A.D. 2000, *J. Geophys. Res.*, 60, 127-145, 1955.
- [66] Smith, P. G. y Scott, J. S.: *Dictionary of water and waste management*, Elsevier Butterworth-heinemann, Oxford, UK, 486 pp, 2005.
- [67] Seager, R., Graham, N., Herweijer, C., Gordon, A. L., Kushnir, Y. y Cook, E.: Blueprints for Medieval Hydroclimate, *Quaternary Sci. Rev.*, 26, 2322-2336, 2007.
- [68] Rein, B., Lückge, A., Reinhardt, L., Sirocko, F., Wolf, A. y Dullo, W.-C.: El Niño variability off Peru during the last 20,000 years, *Paleoceanography*, 20, PA4003, doi:10.1029/2004PA001099, 2005.
- [69] Torrence, C. y Compo G. P.: *A Practical Guide to Wavelet Analysis*, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 61-78, 1998.
- [70] Zebiak, S.E., y Cane M.A.: A model El Niño-Southern Oscillation, *Mon. Weather. Rev.*, 115, 2262-2278, 1987.
- [71] Baker, V. R.: Glacial to modern changes in global river fluxes. En: *Material Fluxes on the Surface of the Earth. Studies in Geophysics*, 86-98. National Academy Press, Washington DC, 1994.
- [72] Duhau, S. y de Jager, C.: The Forthcoming Grand Minimum of Solar Activity. *Journal of Cosmology*, 2010, 8, 1983-1999.
- [73] Eltahir, E.A.B. y Wang, G.: Nilometers, El Niño, and climate variability. *Geophysical Research Letters* 26: 489-492, 1999.
- [74] Fairbridge, R. W. y Shirley, J. H.: Prolonged minima and the 179-yr cycle of the solar inertial motion, *Sol. Phys.*, 110, 191-220, 1987.
- [75] Fowler, W.: What Cooks with Solar Neutrinos? *Nature* 238, 24 - 26; doi:10.1038/238024a0, 1972.
- [76] Gildor, H. y Tziperman, E.: Sea-ice switches and abrupt climate change. *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, A361, 1935–1942, 2003.
- [77] Gyllencreutz, R., Mahiques, M. M., Alves, D. V. P. y Wainer, I. K. C.: Mid- to late-Holocene paleoceanographic changes on the southeastern Brazilian shelf based on grain size records, *The Holocene*, doi:10.1177/0959683610365936, 2010.
- [78] Horizons: Solar System Ephemeris, JPL/NASA, www.horizons.jpl.nasa.gov, 2010.
- [79] Landscheidt, T.: Long-range forecasts of solar cycles and climate change. En: Rampino, M. R., Sanders, J. E., Newman, W. S. y Königsson, L. K., eds.: *Climate. History, Periodicity, and predictability*. New York, van Nostrand Reinhold, 421-445, 1987.
- [80] Marotzke, J.: Instability and multiple equilibria of the thermohaline circulation. En: *Oceanic circulation models: combining data and dynamics*, pp. 501–511. Dordrecht: Kluwer, 1989.

- [81] Marotzke, J.: Abrupt climate change and thermohaline circulation: mechanisms and predictability. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 97, 1347–1350, 2000.
- [82] Sánchez-Sesma, J.: Extreme climatic and hydrologic events associated with El Niño Southern Oscillation: analysis (1500-1999) and forecast (2000-2050). *The Extremes of the Extremes: Extraordinary Floods*. Editado por Árni Snorasson, Helga P. Finnsdóttir y Marshall E. Moss. IAHS Publicación no. 271 (publicado Marzo 2002) en IAHS Series of Proceedings and Reports. ISBN 1-901502-66-X, 394 + xiv pp, 2002.
- [83] Sánchez-Sesma, J.: Analysis and synthesis of climate change. PhD dissertation. Universidad Nacional Autónoma de México (en Español), 2004.
- [84] Sánchez-Sesma, J.: Technical Note: Multi-centennial scale analysis and synthesis of an ensemble mean response of ENSO to solar and volcanic forcings, *Clim. Past Discuss.*, 6, 2055-2069, 2010.
- [85] Vlahos, L. y Georgoulis, M. K.: On the Self-Similarity of Unstable Magnetic Discontinuities in Solar Active Regions. *Astrophys. J. Lett.* 603, L61 – L64. doi:10.1086/383032, 2004.
- [86] Joel Michaelsen, “Cross-Validation in Statistical Climate Forecast Models”, Department of Geology, University of California, 1987.
- [87] Connie A. Woodhouse, “Tree-ring reconstructions of circulation indices”, University of Arizona, 1997.
- [88] L.M. Libby, L.J. Pandolfi, “Temperature Dependence of Isotope Ratios in Tree Rings”, Junio 1974.
- [89] William D. Nichols, “Reconstructed Drought History, North-Central Great Basin 1601-1982”.
- [90] Bruce L. Bowerman, Richard T. O'Connell, “Pronósticos, Series de Tiempo y Regresión: Un Enfoque Aplicado”.
- [91] Alley, W. M., “The Palmer drought severity index: limitations and assumptions”.
- [92] Gu, D. and S. G. H. Philander, 1997. Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the Tropics and the extratropics. *Science*, 275, 805-807.
- [93] Miller, A. J., D. R. Cayan, and W. B. White, 1998. A westward-intensified decadal change in the North Pacific thermocline and gyre-scale circulation. *J. Climate*, 11, 3112-3127.
- [94] Schneider, N., A. J. Miller, M. A. Alexander, and C. Deser, 1999. Subduction of decadal North Pacific temperature anomalies: Observations and dynamics. *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 1056-1070.

- [95] Garreaud, R.D and D. S. Battisti, 1999. Interannual (ENSO) and inter-decadal (ENSO-like) variability in the southern hemisphere tropospheric circulation, *J. Climate*, 12, 2113-2123.
- [96] Técnicas de diagnóstico utilizadas: CEOF, POP, CCA, modelación numérica. Ver p. ej. : von Storch and Zwiers, 2000: *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press, 499 pp.
- [97] Latif, M. and T. P. Barnett, 1994. Causes of Decadal climate variability over the North Pacific and North America. *Science*, 266, 634-637.
- [98] Trenberth, K. E. and J. W. Hurrell, 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dynamics*, 9, 303-319. NP index usado por los autores (valores negativos representan una Aleutiana muy intensa y vice-versa) .
- [99] Latif, M. and T. P. Barnett, 1996. Decadal climate variability over the North Pacific and North America: Dynamics and predictability. *J. Climate*, 9, 2407-2423.
- [100] Kumar, A., A. Leetmaa, M. Ji., 1994. Simulations of atmospheric variability induced by sea surface temperatures and implications for global warming. *Science*, 266, 632-634.
- [101] Salmerón R., Análisis estadístico de datos espacio-temporales mediante modelos funcionales de series temporales, Tesis Doctoral.
- [102] Manual de ClimLab.
- [103] Chatfield, C. (1995). *The analysis of time series: an introduction*. CHAPMAN & HALL/CRC.
- [104] Percival, D. B. and Walden, A. T. (1993). *Spectral analysis for Physical applications: Multitaper and conventional univariate techniques*. Cambridge University Press.
- [105] Priestley, M. B. (1981). *Spectral Analysis and Time Series*, vols 1 and 2. London: Academic Press.
- [106] Anderson, O.D., *Time Series Analysis and Forecasting*, (1977).
- [107] Ardanuy, R., Martín, Q. , *Estadística para Ingenieros*, Hespérides (1993).
- [108] Chatfield, C., *The Analysis of Time Series*, Chapman & Hall (1996).
- [109] Diebold, F.X., *Elementos de pronósticos*, International Thomson Editores (1998).
- [110] Makridakis, S. , Wheelwright, S., McGee, V., *Forecasting: Methods and Applications*, John Wiley (1983).
- [111] Newbold, P., *Estadística para los negocios y la economía*, Prentice Hall (1997).
- [112] Cowperwait, P., Metcalfe, A. (2009), "Introductory Time Series with R", Springer.

- [113] A. Ian McLeod, Hao Yu, Esam Mahdi (2012), "Time Series Analysis with R", Handbook of Statistics. Volume 30. Pág. 661-712, Elsevier.
- [114] Cryer, J., Chan, K. (2008), "Time Series Analysis with Applications in R", Springer.
- [115] C. A. Oria, Tendencia actual de los indicadores extremos de cambio climático en la cuenca del río Mantaro.
- [116] Zhang K., Douglas B.C. y Leatherman S.P. (2004), Global warming and coastal erosion.
- [117] Climate Change 64, 41-58 ETCCDI/CRD Climate Change Indices, <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>

Referencias electrónicas

<http://www.conagua.gob.mx/spr/>

<http://droughtmonitor.unl.edu/>

<http://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/nadm/>

<http://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/nadm/indices.php>

<http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/>

<http://www.conabio.gob.mx/incendios/>

<http://activefiremaps.fs.fed.us>

<http://maps.geog.umd.edu/firms>

http://www.servir.net/en/Incendios_HMS_NOAA

<http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas/>

<http://www.agr.gc.ca/eng/?id=1326402878459>,

<http://www.crean.unc.edu.ar/index.html>

<http://www.smn.gov.ar/serviciosclimaticos/index.php>

<http://mirador.gsfc.nasa.gov/>

<http://www.dsc.nrsc.gov.in/DSC/Drought/index.jsp#>

http://www.imd.gov.in/main_new.htm

http://www.bom.gov.au/climate/drought/drought_links.shtml

<http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx> Revisado en Septiembre, 2013.

<http://drought.unl.edu/MonitoringTools/USDroughtMonitor/DroughtMonitorTips.aspx> Revisado en Septiembre, 2013.

<http://droughtmonitor.unl.edu/> Revisado en Noviembre, 2013

<http://droughtmonitor.unl.edu/> Revisado en Octubre, 2013

<http://droughtmonitor.unl.edu/classify.htm> Revisado en Septiembre, 2013.

<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/> Revisado en Octubre, 2013.

<http://greenleaf.unl.edu/> (Revisado septiembre, 2013)

http://iri.columbia.edu/climate/forecast/net_asmt/2013/oct2013/text/NAmerica.html, Revisado en Octubre 2013

<http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/us-mexico-drought-predictions/>, Revisado en Octubre 2013

http://smn.cna.gob.mx/climatologia/sequia/SPI/201301_01.png Revisado en Septiembre, 2013.

http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=257&Itemid=10 Revisado en Septiembre 2013.

<http://www.cna.gob.mx> Revisado en Octubre, 2013.

<http://www.cna.gob.mx> Revisado en Octubre, 2013.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>, Revisado en Octubre 2013

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_update/ssta_c.gif http://iri.columbia.edu/climate/ENSO/currentinfo/SST_table.gif Revisado en Noviembre, 2013.

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/lanina/us_impacts/precip_thresh.gif, Revisado en Octubre 2013.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/CFSv2/CFSv2seasonal.shtml> Revisado en Diciembre 2013.

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/expert_assessment/month_drought.png
Revisado en Octubre 2013

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/expert_assessment/season_drought.png
Revisado en Octubre 2013.

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/current/images/NMME_ensemble_prte_us_lead1.png Revisado en Noviembre 2013.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/current/IMMEprte.html> Revisado en Noviembre 2013.

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/current/IMMEprte_us.S.html
Revisado en Diciembre 2013.

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/current/usprte_Seas1.html
Revisado en Diciembre 2013.

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/NMME/NMME_description.html Revisado en Noviembre 2013.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/people/mchen/CFSv2FCST/monthly/>
Revisado en Noviembre 2013.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/climatology> Revisado en Octubre, 2013

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/climatology/usmexp/precip.clim.nov_y1979-1995.gif) Revisado en Octubre, 2013

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/teleconnections.shtml Revisado en Noviembre, 2013.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/mjo.shtml> Revisado en Noviembre, 2013.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml>, Revisado en Noviembre 2013.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/pna.shtml>, Revisado en Noviembre 2013.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/30day/> Revisado en Noviembre 2013.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/610day/610analog.off.gif>,
Revisado en Octubre, 2013.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/90day/> _Revisado en Diciembre 2013.

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/long_range/cca.php?lead=1,
Revisado en Noviembre 2013.

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/long_range/ecca.php?lead=1
Revisado en Noviembre 2013.

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/long_range/fxus07.html
Revisado en Noviembre 2013.

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/long_range/fxus07.html,
Revisado en Noviembre 2013.

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/long_range/smt.php?lead=1,
Revisado en Noviembre 2013.

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/predictions/short_range/NAEFS/naefs_prc_p.php Revisado en Octubre, 2013.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/soilmst/cas.shtml> Revisado en Noviembre, 2013.

<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/soilmst/forecasts.shtml> Revisado en Octubre 2013

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/soilmst/mrf_diff.shtml Revisado en Octubre 2013

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/forecasts/reforecast2/analogs/index.html> Revisado en Octubre 2013

<http://www.nc-climate.ncsu.edu/climate/patterns/PDO.html>, Revisado en Noviembre 2013.

<http://www.nc-climate.ncsu.edu/climate/patterns/PDO.html>, Revisado en Noviembre 2013.

<http://www.star.nesdis.noaa.gov> Revisado en Octubre, 2013.

<http://www.wpc.ncep.noaa.gov/gpf/day1-7.shtml>. Revisado en Octubre, 2013.

<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/cmb/teleconnections/pdo-f-pg.gif>, Revisado en Noviembre 2013.

sequia_smn@conagua.gob.mx Consultado en Septiembre, 2013.