

REPORTE FINAL DEL PROYECTO: “SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA EN EL NOROESTE DE MEXICO Y SU RELACION CON LA HUMEDAD DE SUELO Y CUBIERTA VEGETAL: UN ENFOQUE INICIAL CON REDES GPS”.

Participantes:

Investigador responsable: Dr. Ignacio Arturo Quintanar Isaías.
Investigador Titular A
Centro de Ciencias de la Atmosfera. UNAM
Especialista en interacción atmosfera-suelo

Ejes temáticos: “Interacción atmosfera-suelo-vegetación”, “Redes de observación de vapor de agua mediante tecnología GPS”, “Simulación numérica regional”.

Participantes:

Dr. David K. Adams
Investigador Titular A.
Centro de Ciencias de la Atmosfera. UNAM
Especialista en meteorología tropical y convección atmosférica

Dr. Carlos Lizárraga Celaya
Investigador Titular A
Departamento de Física. Universidad de Sonora
Especialista en percepción remota y cubierta vegetal

Dr. Carlos Manuel Minjárez Sosa
Investigador Asociado D
Departamento de Física. Universidad de Sonora
Especialista en el Monzón de Norteamérica y Tecnología GPS

Dr. Carlos Abraham Ochoa Moya
Investigador Asociado C
Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM
Especialista en cómputo y modelación regional de la atmósfera

Resumen ejecutivo

Este proyecto confirmó la efectividad de una red diseñada para estimar el valor del vapor de agua integrado en la columna atmosférica durante eventos de convección profunda en corredores a lo largo y perpendiculares al eje la de Sierra Madre Occidental (SMO) sobre la región comprendida por los estados de Sonora, Sinaloa y Chihuahua. La red permitió una alta resolución temporal (30 min) con la cual se determinó la evolución diurna de la convección profunda con un alto grado de precisión. Esto significa que se pudo establecer el inicio y el termino de los procesos físicos asociados a sistemas organizados de

mesoescala (MCS, por sus siglas en inglés) en la región y la caracterización de fenómenos de escalas temporales distintas como aquellos asociados a escalas regionales. Específicamente, se analizó el ciclo diurno de la convección profunda en la SMO y en zonas bajas frente al Golfo de California (GC) durante la puesta en marcha del experimento de verano de 2013. Se colocaron 10 estaciones GPS con estaciones meteorológicas situadas a una distancia aproximada entre estaciones de 50km, en dirección este-oeste, de manera casi perpendicular al eje sur-norte de la SMO. Con una resolución espacial como esta, la probabilidad de detectar la evolución y propagación de los MCS sobre terreno complejo aumenta considerablemente, al mismo tiempo que permite interpretar los procesos físicos asociados en el contexto de otros fenómenos atmosféricos presentes. Los datos de vapor de agua, presión atmosférica, temperatura en superficie así como dirección y velocidad de viento fueron analizados para caracterizar a detalle la variabilidad diurna de la precipitación y el agua precipitable (AP) integrada en la columna atmosférica. Los resultados más relevantes de este estudio se pueden resumir como sigue:

- 1) El ciclo diurno de precipitación estimado es consistente con estudios previos de redes de pluviómetros que fueron instaladas durante el Experimento del Monzón de Norteamérica (NAME, por sus siglas en inglés), que fue realizado en el verano de 2004. El ciclo diurno de precipitación muestra una clara dependencia de la orografía de la región, ya que la mayor frecuencia de precipitación ocurre en sitios altos (Basaseachi y Mulatos) de la SMO, mientras que en sitios de poca elevación el número de casos de lluvia es poco frecuente (Kino, Los Mochis y Puerto Peñasco). Por otra parte, se observó que el inicio de la precipitación ocurre horas más tarde (de madrugada) cuando se compara con sitios del lado oeste de la SMO. Un resultado distinto al observado en el NAME es que el inicio de la precipitación en estaciones a una mayor altura sobre la SMO ocurre antes. Las razones de estas variaciones son difíciles de determinar con un periodo de muestreo tan corto. Este resultado indica que es imprescindible establecer una red permanente de GPS que permita un muestreo sistemático en un dominio semejante al de la red utilizada en este proyecto.
- 2) La variabilidad diurna de la AP es muy importante en la región ya que indica la ocurrencia de convergencia de vapor de agua en niveles bajos de la atmósfera. Una característica a lo largo de todo el periodo del experimento es la ocurrencia de convergencia más intensa en promedio en los sitios más altos de la SMO, especialmente en su ladera occidental (Basaseachi y Mulatos) registrando un máximo alrededor de las 6:00 pm. En estos lugares la convección es más regular
- 3) Se sometió un artículo de investigación a la revista *Bulletin of the American Meteorological Society*. El artículo ha sido aceptado para su publicación.
- 4) Los datos de la campaña de medición se utilizaron para la obtención de la tesis de maestría “Precipitación convectiva y agua precipitable del experimento del transecto GPS del Monzón de Norteamérica” que el alumno Omar Ramos Pérez defendió en enero de 2016 bajo la dirección del Dr. David K. Adams.
- 5) Se diseñó un experimento numérico con las condiciones iniciales y de frontera del verano de 2013 cuando opera la red de GPS del CCA. El diseño incluyó la selección de diversas parametrizaciones de microfísica de nubes y el cambio de humedad de suelo de la región de estudio para estudiar la sensibilidad del ciclo diurno de la convección profunda simulada. Se optó, en esta etapa de la investigación, realizar

un conjunto limitado de simulaciones de alta resolución espacial (2.5 km x 2.5 km para el dominio computacional más fino) con casos de estudio en donde el ciclo diario de la AP ha sido analizado a partir de la red de GPS meteorológica del CCA.

1. La red de GPS meteorológica en el Noroeste de México.

La Figura 1 muestra el área de estudio y la red de 10 GPS meteorológicas utilizadas en el noroeste de México. La red consistió de un corredor costero desde Los Mochis (MOCH) hasta Puerto Peñasco (PSCO) y dos corredores casi perpendiculares de oeste a este, el primero de Rayón (RAYN) a Chihuahua (CHIH) cubriendo las elevaciones mayores de la SMO y el segundo corredor más corto de los Mochis hasta Badiraguato (BGTO) en el estado de Sinaloa.

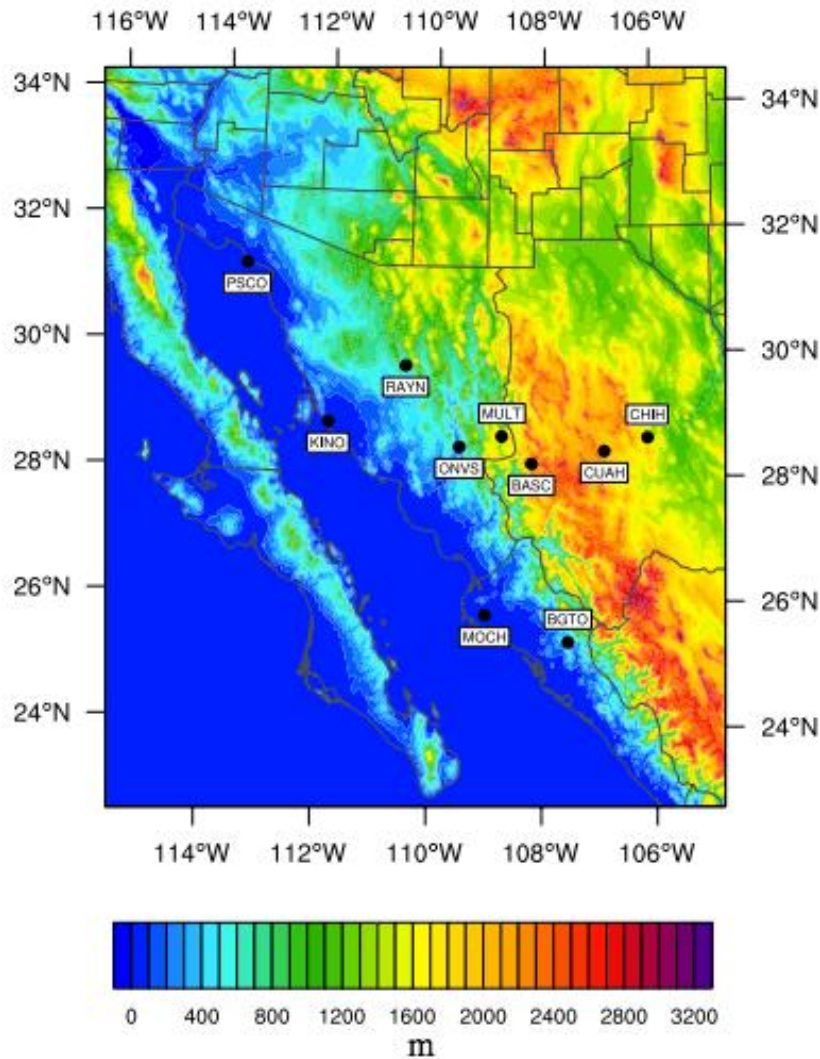


Figura 1. Distribución de la red de 10 GPS meteorológicas del CCA-UNAM en la región de estudio para la medición de vapor de agua integrado en la columna atmosférica. La red operó de junio 15 a septiembre 15 de 2013.

Ambos corredores perpendiculares fueron diseñados para capturar los fuertes gradientes de precipitación inducidos por la orografía. Cada estación incluyó un receptor GPS Trimble NetR9 conectado en tiempo real con una estación meteorológica Vaisala WXT520 que proporciona datos de presión atmosférica, humedad relativa, temperatura, precipitación, dirección y velocidad de viento.

Los datos de AP a partir del retraso de la señal del GPS están disponibles cada 5 minutos en tanto que los datos meteorológicos de la estación Vaisala están disponibles cada minuto. Las bases de datos de AP y meteorológicas se han guardado en archivos adjuntos a este reporte. En la Tabla 1 abajo se indica la posición y el tiempo de operación del equipo durante la campaña realizada en 2013.

Tabla 1 . Lista de estaciones GPS con su posición, elevación, y el periodo de observación

Estación	Latitud °N	Longitud °W	Altura msnm	Periodo de Observación
KINO	28.8149	111.9287	7	6/15 – 9/19
MOCH	25.7815	109.0264	15	6/18 – 9/18
PSCO	31.3004	113.5483	53	6/23 – 9/7
ONVS	28.4602	109.5288	189	6/15 – 9/20
BGTO	25.3625	107.5511	207	6/18 – 9/17
RAYN	29.7410	110.5366	641	6/26 – 7/16
CHIH	28.6224	106.1006	1463	6/25 – 9/30
MULT	28.6356	108.7595	1550	6/21 – 9/3
BASC	28.2035	108.2098	1999	6/22 – 9/30
CUAH	28.4079	106.8922	2058	6/24 – 9/30

El receptor GPS de la estación en Rayón falló en julio 16, 21 días después de haber sido instalado. Los datos observacionales crudos del GPS fueron procesados para estimar el AP en la columna atmosférica usando el software GIPSY-OASIS desarrollado en el MIT. Se genera un cono de 10 grados que permite capturar las escalas de tiempo y espacio de los eventos de convección profunda como la transición de convección somera a profunda. Además del GIPSY-OASIS se examinó el GAMIT, otro software independiente desarrollado por el Earth Systems Research Laboratory (ESRL). La comparación permitió establecer que ambos sistemas producen estimaciones de AP muy similares.

2. Simulación del ciclo diurno de convección durante la estación del monzón con el modelo regional WRF. Diseño experimental

Esta parte del trabajo de investigación fue liderada por el Dr. Carlos Abraham Ochoa Moya investigador del CCA. El objetivo general es conocer la capacidad del modelo regional Atmosférico WRF para simular los eventos de convección profunda que se detectaron durante el periodo observacional de la red de GPS meteorológicos. Bajo este objetivo general de modelación numérica, el grupo del Dr. Chris Castro del Departamento de Ciencias Atmosféricas de la Universidad de Arizona trabaja en colaboración con el grupo de Hidrología y Meteorología del CCA (Moker et al 2016). El objetivo particular de

recientes simulaciones realizadas en el CCA incluye la simulación del ciclo diurno de dos eventos para los días 15 y 16 de julio de 2013 y su sensibilidad a la selección de mallas anidadas, así como a la resolución horizontal y vertical y la sensibilidad a las condiciones de frontera utilizando dos fuentes de datos de re-análisis (NARR y ERA Interim). Asimismo, las condiciones de superficie con diferentes bases de datos de vegetación fueron utilizadas en el modelo de suelo (Noah-LSM, Noah-MP).

Tabla 2. Conjunto de 18 simulaciones realizadas para los días 15 y 16 de julio de 2013 junto con las diferentes condiciones de frontera y dominios utilizados para cada experimento. Nótese que las simulaciones sin Noah-MP son con Noah-LSM.

Run	NARR	ERA-Interim	50 vert lvl	MODIS 30s	100 vert lvl	3 dom exp	4 dom exp	NOAH-MP	Dynamic vegetation	SST-update	14 day spin-up	Analysis nudging	RTMG SW scheme
Sim01	X					X							
Sim02	X		X			X							
Sim03	X			X		X							
Sim04	X				X	X							
Sim05	X		X			X		X					
Sim06	X		X	X		X							
Sim07	X						X						
Sim08	X		X				X						
Sim09	X		X			X		X	X				
Sim10	X		X			X				X			
Sim11	X		X			X		X	X	X			
Sim12	X		X			X		X	X	X			X
Sim13	X		X			X		X	X	X	X		X
Sim14	X		X			X		X	X	X	X	X	X
Sim15		X	X			X		X	X	X	X	X	X
Sim16		X	X			X		X	X	X	X		X
Sim17		X				X							
Sim18		X				X					X		

Cada experimento es una simulación de 36 horas de simulación. La distribución de parametrizaciones de procesos de convección, capa límite, microfísica de nubes y dominios computacionales que reportan Moker et al (2016), fue utilizada como base para los experimentos mostrados en la Tabla 2. Para propósitos de comparación directa con los resultados del grupo de Arizona se han utilizado los mismos dominios computacionales y se incluye un dominio extra anidado (Figura 2, panel inferior) con resolución horizontal (1.25 km x 1.25 km) para estudiar la sensibilidad de la representación de la convección profunda simulada a la selección de la resolución horizontal. Con este mismo propósito, se incluyeron dos experimentos con 50 y 100 niveles verticales. Además de estos experimentos se incluyeron una serie de experimentos donde el esquema de vegetación es el estándar de WRF con el modelo de suelo Noah-LSM y donde el esquema de vegetación

permite tener una vegetación dinámica (Noah-MP) que interactúa con los procesos atmosféricos.

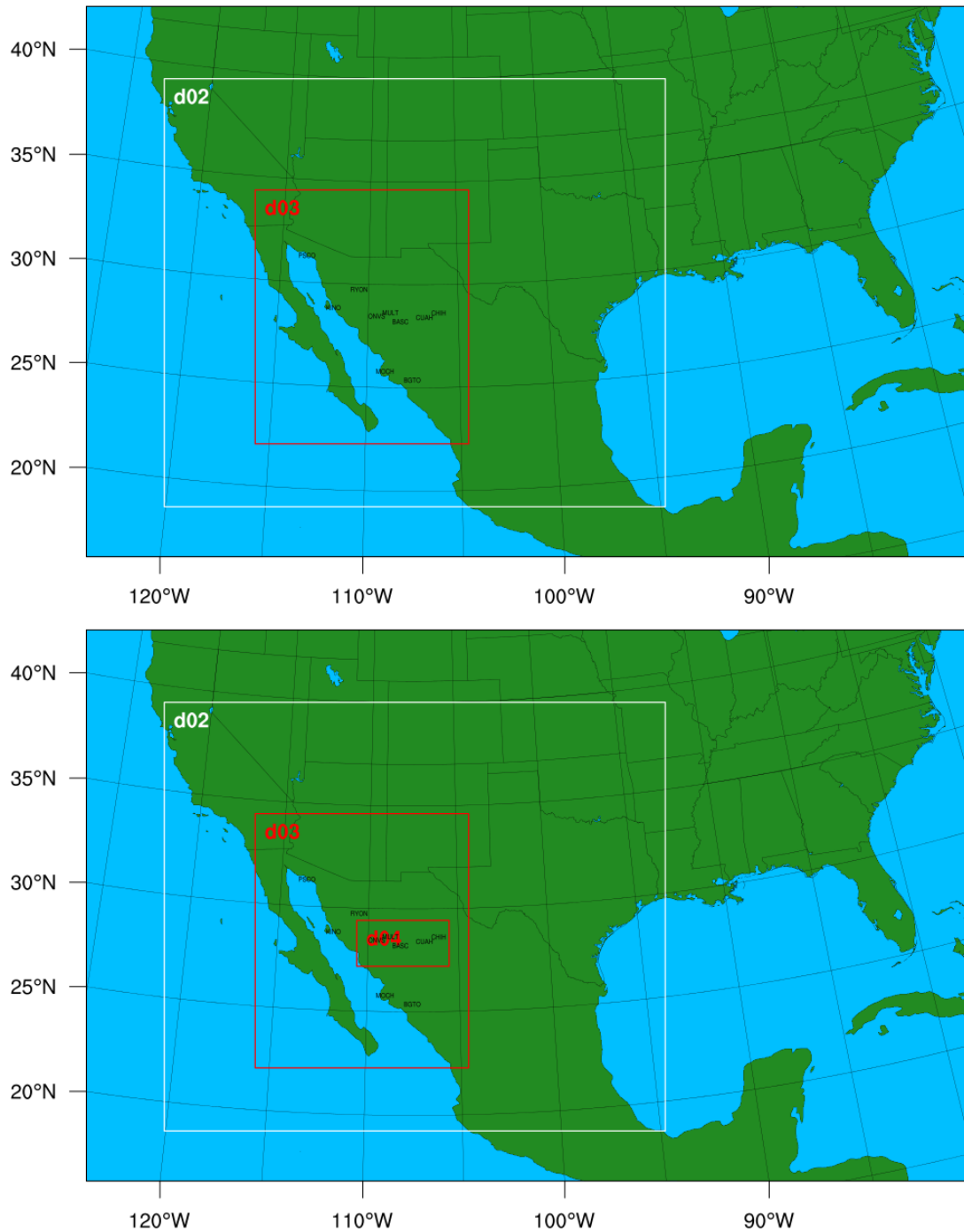


Figura 2. Anidamiento de los dominios computacionales utilizadas en los experimentos de sensibilidad. Panel superior, dominios como en Moker et al (2016), d01 a 30km de resolución horizontal, d02 a 10 km y d03 a 2.5 km. Panel inferior, dominios con una malla extra d04 a 1km de resolución horizontal. Los mapas incluyen la red de 10 estaciones de GPS meteorológicos. Las etiquetas dentro de los dominios d03 y d04 indican la posición de las estaciones de la red.

Cabe mencionar que se estudió la sensibilidad a los tiempos de “spin-up” del modelo y al “nudging” de escalas sinópticas en niveles superiores de los campos del re-análisis del NARR y del ERA Interim para el dominio madre. Finalmente, se utilizó el esquema de radiación de onda corta RTTMG-SW distinto del utilizado por el grupo de Arizona y se incluyó la actualización de la temperatura de superficie del océano como forzante térmico.

El ciclo diurno también fue abordado con otro experimento numérico en donde el modelo WRF fue utilizado para correr durante el periodo: junio 27 a julio 20, de 2013. El diseño de este experimento incluyó el uso de MODIS para el año 2012 y de ERA Interim debido a que las simulaciones de eventos diarios del primer experimento habían mostrado una habilidad superior en las simulaciones del ciclo diurno se decidió utilizar esta distribución de condiciones iniciales y de frontera. En un intento por entender el rol de la humedad del suelo en el AP simulado, se generó otra simulación configuración idéntica a la anterior, pero haciendo cambios en las condiciones iniciales de humedad de suelo. Se compararon estas simulaciones y su análisis está en proceso.

3. Resultados

3.1 Red de GPS Meteorológico

Un análisis preliminar de los datos arrojados por la red de GPS se detalla a continuación: Mediante los datos recopilados durante el experimento de 2013, el cual consistió de 10 GPS y estaciones meteorológicas, se documentaron varias características de la variabilidad diurna de precipitación y AP resaltando los siguientes hallazgos:

El ciclo diurno de la frecuencia de precipitación es consistente con estudios basados en datos recopilados mediante pluviómetros (Gochis et al. 2003; 2004; 2007) y/o radares (Lang et al. 2007; Rowe et al. 2008, Nesbitt et al. 2008) durante el experimento de NAME en 2004.

Dicho ciclo muestra una dependencia con la topografía de la región, ya que precipitación suele ocurrir con mayor frecuencia en los sitios altos (BASC y MULT) de la SMO mientras que en sitios de poca elevación el número de casos de lluvia es poco frecuente (KINO, MOCH y PSCO). Es importante resaltar el aporte en la variabilidad diurna de la precipitación son los sitios altos del lado Este de la SMO (CUAH y CHIH), principalmente en la banda latitudinal de 28°-29° N, región que faltó por estudiar durante el experimento de NAME y en donde se puede concluir que los mecanismos que generan precipitación son menos frecuentes y suelen ocurrir horas más tarde (madrugada) en comparación con sitios altos del lado Oeste de la SMO, situación, que se había deducido mediante modelos numéricos (Fawcett et al. 2010) y con pluviómetros ubicados en latitudes más al sur (Gochis et al. 2004). Donde difiere este estudio de los anteriores es que las lluvias en lo alto suelen ocurrir antes de lo se observó en los estudios del NAME. Con la cantidad de años de datos disponibles, este hecho es difícil explicar.

La variabilidad diurna de AP es muy importante en esta región ya que nos indica la ocurrencia de convergencia de vapor de agua en niveles bajos de la atmósfera. Una característica a lo largo de todo el periodo del experimento es la ocurrencia de convergencia

más intensa en promedio en los sitios altos de la SMO, especialmente en los del lado occidental (BASC y MULT), registrando un máximo alrededor de las 6:00 p.m. En estos lugares la convección es más regular durante el NAM en comparación con el resto de las elevaciones (llanura costera, pies y lado Este de la SMO). Mientras que el análisis de AP durante los días en los que ocurrieron actividad convectiva importante, resalta que los sitios donde la convergencia de vapor de agua es más intensa son: los de la llanura costera (KINO y MOCH) durante el fin de la mañana (~12 p.m.), seguido por los pies de la sierra (ONVS y BGTO) al inicio de la noche (~8 p.m.), después sitios altos del lado oeste de la SMO (~ 6 p.m.) y finalmente los sitios altos del lado oriental de la SMO (~ 10 p.m.). Esto ocurre horas después de lo que se había inferido de modelos numéricos (Berbery 2001) donde encontraron una máxima en la convergencia de flujo de humedad por la tarde (~ 5 p.m.) a lo largo de las laderas occidentales de la SMO mientras que en la noche (~ 11 p.m.) a lo largo de la costa. Esto resalta la versatilidad de Meteorología GPS, especialmente en terreno complejo.

En cuanto a la variabilidad intraestacional de AP únicamente tres de los 10 sitios presentan un comportamiento distinto a lo que se esperaría con el transcurso del NAM, es decir solo CHIH, BGTO y PSCO hay un aumento en la convergencia del vapor de agua (pendiente mas fuerte de AP) durante los últimos 15 días de agosto (periodo que en este caso se considera la etapa final del monzón). En el caso de BGTO y PSCO influye su ubicación con respecto a los demás sitios pues el primero al ubicarse más al sur es el primero en recibir las lluvias monzonales; mientras que en el segundo al ubicarse mas al norte es el último en recibir las primeras lluvias ya que el monzón llega a dicho lugar aproximadamente el 11 de julio a PSCO por lo que no hay suficientes datos en el periodo considerado como etapa inicial del NAM (1-15 de julio). Mientras que en CHIH influye la cantidad de humedad existente en la zona, ya que en los últimos 15 días de agosto hay más humidificación en comparación con los primeros días de julio debido a que durante el primer periodo el NAM está en su transición de madurez a decaimiento mientras que en el segundo esta iniciando su etapa de madurez. Finalmente, el sitio de PSCO debido a que se ubica más al norte con respecto a los demás sitios,

Mientras que la variación temporal de vapor de agua ($d AP/ dt$) es una novedosa métrica para evaluar la intensidad convección, en donde resalta que la convección es más somera en los sitios altos tanto del lado Este y oeste a la cima de la SMO en comparación con elevaciones más bajas y con la llanura costera, situación ya conocida mediante estudios de radar y satélites en la región del NAM (Nesbitt et al. 2008; Rowe et al. 2008). Lo novedoso es la comparación de la intensidad de convección entre los sitios altos del lado oriental (CUAH y CHIH) y occidental (BASC y MULT) de la SMO. Los resultados indican que en los primeros la actividad convectiva es más débil que los segundos indicio de que la circulación atmosférica cercana a la superficie es más débil en el lado Este en comparación con el lado oeste.

Además, los datos del vapor de agua mediante la técnica de GPS han sido utilizados en otra región continental tropical (Manaus) para crear una métrica, escala temporal de la convergencia de vapor de agua, con la finalidad de caracterizar la evolución temporal de convección profunda. Los resultados indican una escala temporal en promedio de 5 horas en la convergencia de vapor de agua asociada con la transición de convección somera a

profunda no muy lejana de lo encontrado en Manaus (4 horas). Esto nos lleva a inferir que dicha escala temporal es una métrica robusta, especialmente en sitios con topografía variada. Sería interesante calcular la escala temporal de la convergencia de vapor de agua en regiones urbanizadas como: el Valle de México.

La ubicación entre las estaciones de BASC-MULT-ONVS así como de BGTO-MOCH (50-70 km) ayudaron a resolver si piscinas frías generadas por MCS, es un mecanismo para la organización de convección a lo largo de las laderas occidentales (Lang et al. 2007; Rowe et al. 2012). Piscinas frías se pueden identificar de acuerdo a ciertas señales en variables meteorológicas superficiales (disminución en la temperatura entre 3 - 13°C, incremento en la velocidad del viento en promedio de 6 - 10 m/s; Provod et al. 2015) y las velocidades promedio encontradas fueron de 18 m/s y 30 m/s para el transecto BASC-MULT-ONVS y BGTO-MOCH, respectivamente. Dichas velocidades son muy altas para la propagación de una piscina fría por lo que se puede concluir que ésta no es el mecanismo más viable para la organización de convección a lo largo de la ladera occidental de la SMO.

Finalmente mediante el análisis de diagramas Hovmöller considerando los casos en los que se observa una formación y propagación de MCS a lo largo de BASC-MULT-ONVS (10 casos) y BGTO-MOCH (17 casos), se puede obtener su velocidad de propagación promedio y con ello evaluar la hipótesis propuesta en la organización de convección en una región tropical con topografía similar (costa oeste de Colombia) debido a la propagación de ondas de gravedad (Mapes et al. 2003). Las velocidades que se obtuvieron fueron de: 12 m/s y 14 m/s para el transecto BASC-MULT-ONVS y BGTO-MOCH, respectivamente, muy similares a lo encontrado en el estudio de Mapes et al. 2013 (15 m/s) con lo que podemos concluir que la propagación de ondas de gravedad hacia el GoC de convección organizada en las laderas occidentales de la SMO es un mecanismo factible para dicha organización.

3.2 Simulaciones con el modelo regional WRF.

Los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo WRF para los días de estudio (junio 15 y 16 de 2013) durante la campaña de observación se pueden resumir como sigue:

- 1) El incremento en resolución horizontal (en el 4° dominio computacional interno) no resulta en una mejoría en cuanto a los sesgos en precipitación que el modelo simula.
- 2) Los sesgos en agua precipitable y temperatura se reducen significativamente con respecto a la observación cuando se utiliza el re-análisis global ERA Interim a 0.7 grados de resolución espacial para condiciones iniciales y de frontera.
- 3) El uso de datos MODIS de vegetación y uso de suelo más recientes (2012) mejoran significativamente las tendencias simuladas de precipitación, temperatura y agua precipitable en la columna respecto de las simulaciones que solo usan MODIS del año 2001 que viene como parte de los datos estáticos disponibles para WRF.
- 4) La combinación de condiciones de frontera e iniciales no necesariamente mejoran las simulaciones. Se encuentra una sensibilidad importante a la combinación de distribuciones.

4. Conclusiones

La red de GPS meteorológico demostró su eficacia para observar eventos de convección en la mesoescala.

El arreglo de la red fue el óptimo dada las constricciones financieras, logísticas y es la mejor opción para observaciones en áreas de terreno complejo como la SMO.

Esta red temporal, también mostro la necesidad de una red permanente que permita generar una climatología de AP y de eventos de convección. Esto es de particular importancia para los estudios que dependan de caracterizar tendencias de precipitación en regiones semiáridas bajo la perspectiva de Cambio Climático.

Los datos obtenidos durante el funcionamiento de la red, conforman un buen “testbed” para la verificación de modelos atmosféricos regionales cuya resolución espacial permite resolver la convección de forma directa.

5. Entregables

- Base de datos de PWV, y variables meteorológicas de superficie (temperatura, humedad relativa, viento, presión atmosférica y precipitación) para el periodo de estudio.
- Base de datos con las salidas de experimentos con del modelo numérico regional
- Base de datos GOES en el canal infrarojo
- Una tesis de maestría.

6. Presentaciones.

- 1) Adams, D.K y Quintanar A.I. El Monzón del Noroeste de México visto a través de Tecnología GPS. Info-Atmosfera, Boletín, Abril 2013, pp 5-7.
- 2) Adams, D.K. “GPS Meteorology in the Tropics. A New Look at Deep Convection in the Amazon and during the Monsoon of Northwestern Mexico”. Conferencia presentada el Earth Systems Research Laboratory de la NOAA en Boulder Colorado, Noviembre 22 de 2013.
- 3) Carlos Ochoa, Arturo Quintanar, David Adams y Benjamin Martinez, 2015. Simulation of the Diurnal Cycle of Integrated Precipitable Water in the North American Monsoon Region. Presentación en la American Geophysical Union, AGU Fall Meeting.
- 4) Adams, D.K.2015. The North American Monsoon GPS TRANSECT Experiment 2013. Conferencia de Hidrometeorología en la 95th American Meteorological Society Annual Meeting, Sunday, 4 January 2015 to Thursday, 8 January 2015, in Phoenix, AZ.

7. Publicaciones.

- 1) Serra, Y., D. Adams, C. Minjarez-Sosa, J. Moker, Jr., A. Arellano, C. Castro, A. I. Quintanar, L. Alatorre, A. Granados-Olivas, E. Vazquez, K. Holub, and C.

- DeMets, 2016: The North American Monsoon GPS Transect Experiment 2013. Bull. Amer. Meteor. Soc. doi:10.1175/BAMS-D-14-00250.1, in press.
- 2) Adams, D. K., A. Q. Isaias, and C. Lizárraga (2016), The North American monsoon: Models versus observations, Eos, 97, doi:10.1029/2016EO043151.

Referencias consultadas

- Adams, D. K. and A. C. Comrie, 1997: The North American Monsoon. Bulletin of the American Meteorological Society, 78, 2197-2213.
- Adams, D.K., E.R. Kursinski and R. A. Bennett: GPS Observations of Precipitable Water Vapor in Deep Convective Tropical Regimes. International Radiation Symposium. Foz do Iguassu, Brazil, August 2008.
- Adams, D. K. and E. Souza, 2009: CAPE and Convective Events over the Southwest U.S. during the North American Monsoon. Mon. Wea. Rev. 137, 83-98.
- Adams, D. K., R. Fernandes, E. R. Kursinski, J. Maia, L. Sapucci, L. Machado, I. Vitorello, K.Holub, S.Gutman, Naziano Filizola, R. Bennett, 2011: A Dense GNSS Meteorological Network for Observing Deep Convection in the Amazon, Atmospheric Science Letters, DOI: 10.1002/asl.312
- Adams, D. K., R. Fernandes and J. Maia, 2011: GNSS Precipitable Water Vapor from an Amazonian Rain Forest Flux Tower, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, DOI:10.1175/JTECH-D-1100082.1.
- Adams, D. K., S. I. Gutman, K. L. Holub, and D. S. Pereira (2013), GNSS Observations of Deep Convective Time scales in the Amazon, Geophys. Res. Lett., 40, 2818–2823, doi:10.1002/grl.50573
- Bevis M, Businger S, Herring TA, Rocken C, Anthes RA , Ware RH. 1992. GPS meteorology: Sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. Journal of Geophysical Research 97:15787–15801.
- Ciesielski, P. E., and R. H. Johnson, 2008: Diurnal Cycle of Surface Flows during 2004 NAME and Comparison to Model Reanalysis. J. Clim, 21, 3890–3913, doi:10.1175/2008JCLI2206.1.
- Dominguez, F. ,P. Kumar, and E.R. Vivoni, 2008: Precipitation recycling variability and ecoclimatological stability – A study using NARR data. Part II: North American monsoon region. J. Climate, 21, 5187-5203.
- Higgins, R. W., and Coauthors, 2006: The NAME 2004 field campaign and modeling strategy. Bull. Amer.Meteor. Soc., 87, 79–94.
- Higgins, W. and D. Gochis, 2007: Synthesis of Results from the North American Monsoon

- Experiment(NAME) Process Study. *J. Climate*, 20, 1601–1607.
- Houze, R. 2004: Mesoscale convective systems. *REVIEWS OF GEOPHYSICS*, VOL. 42, RG4003, 43PP.,doi:10.1029/2004RG000150
- Khairoutdinov M, Randall D. 2006. High-resolution simulation of shallow-to-deep convection over land. *Journal of the Atmospheric Sciences* 63: 3421-3436.
- Kursinski, E. R., et al. "Water vapor and surface observations in northwestern Mexico during the 2004 NAME Enhanced Observing Period." *Geophysical Research Letters* 35.3 (2008): L03815.
- Kursinski, E. R., D. K. Adams and M. Leuthold, 2008: GPS Observations of Precipitable Water and Implications for the Predictability of Precipitation during the North American Monsoon. *CLIVAR Exchanges*, 13, 14, 16, 19-21.
- Lang, T. J., D. A. Ahijevych, S. W. Nesbitt, R. E. Carbone, S. A. Rutledge, and R. Cifelli, 2007: Radar observed characteristics of precipitating systems during NAME 2004. *J. Climate*, 20, 1713–1733.
- LeMone, M. A., E. J. Zipser, and S. B. Trier, 1998: The role of environmental shear and thermodynamic conditions in determining the structure and evolution of mesoscale convective systems during TOGACOARE, *J. Atmos. Sci.*, 55, 3493–3518.
- Lima, M. A., and J. W. Wilson, Convective storm initiation in a moist tropical environment, *Mon. Weather Rev.*, 136, 1847–1864, 2008.
- Nesbitt, S. W, D. J. Gochis, and T. J. Lang, 2008: The diurnal cycle of clouds and precipitation along the Sierra Madre Occidental observed during NAME-2004: Implications for warm season precipitation estimation in complex terrain. *J. Hydrometeor.*, 9, 728–743.
- Pereira, L. G., 2008: Characteristics and organization of precipitating features during NAME 2004 and their relationship to environmental conditions. Ph.D. dissertation, Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, CO, 229 pp.
- Rowe, A. K., S. A. Rutledge, T. J. Lang, P. E. Ciesielski, and S. M. Saleeby, 2008: Elevation-dependent trends in precipitation observed during NAME. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 4962–4979
- Rowe, A. K., S. A. Rutledge, T. J. Lang, 2011: Investigation of microphysical processes occurring in isolated convection during NAME. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 424–443.
- Rowe, Angela K., Steven A. Rutledge, Timothy J. Lang, 2012: Investigation of Microphysical Processes Occurring in Organized Convection during NAME. *Mon. Wea. Rev.*, 140, 2168–2187.

- Scott, R. L., E. A. Edwards, W. J. Shuttleworth, T. E. Huxman, C. J. Watts, and D. C. Goodrich, 2004: Interannual and seasonal variation in fluxes of water and carbon dioxide from a riparian woodland ecosystem. *Agr. Forest Meteorol.*, 122, 65–84, doi:10.1016/j.agrformet.2003.09.001.
- Sherwood SC, Roca R, Weckwerth TM, Andronova NG. 2009. Tropospheric water vapor, convection and climate: A critical review. *Review of Geophysics* 48: RG2001, doi:10.1029/2009RG000301.
- Tompkins AM. 2001a. Organization of tropical convection in low vertical wind shears: The role of water vapor. *Journal of the Atmospheric Sciences* 58: 529–545.
- Tompkins AM. 2001b. Organization of tropical convection in low vertical wind shears: The role of cold pools. *Journal of the Atmospheric Sciences* 58: 1650–1672.
- Watts, C. J., R. L. Scott, J. Garatuza-Payan, J. C. Rodriguez, J. H. Prueger, W. P. Kustas, and M. Douglas, 2007: Changes in vegetation condition and surface fluxes during NAME 2004. *J. Climate*, 20, 1810–1820.
- Vivoni, E.R., C.J. Watts, and D.J. Gochis, 2010a: Land surface ecohydrology of the North American monsoon system. *J. Arid. Environ.*, 74, 529-530.
- Vivoni, E.R., J.C. Rodriguez, and C.J. Watts, 2010b: On the spatiotemporal variability of soil moisture and evapotranspiration in a mountainous basin within the North American monsoon region. *Water Resour. Res.*, 46, W02509, doi:10.1029/2009WR008240
- Valdez Manzanilla, A. and V. L. Barradas Miranda, 2012: Mesoscale convective systems during NAME. *Atmósfera* 25(2), 155-170