

## **Análisis de patrones de circulación y temperaturas en México, asociado al calentamiento global con un modelo climático global (EDGCM, NASA/GISS)**

Guillermo Montiel Juan Carlos, Hernández Rosales Arturo  
Instituto Politécnico Nacional ESIA Ticomán, Distrito Federal, México.  
[ahernandezro@ipn.mx](mailto:ahernandezro@ipn.mx)

En la actualidad, nos hemos familiarizado con los términos de Calentamiento Global y Cambio Climático. Dos conceptos muy ligados entre sí, y que han adquirido una gran importancia en las últimas décadas. El calentamiento global, es posible determinarlo como un aumento en la temperatura en la atmosfera terrestre que ha sido observado desde finales del siglo XIX, las causas de este fenómeno son atribuibles con una certeza del 95% al aumento de los gases de efecto invernadero resultado del crecimiento poblacional y el desarrollo industrial. Con el término de cambio climático nos referimos a la modificación del clima con respecto al historial climático dentro de una escala global o regional, estos cambios se pueden analizar dentro de escalas diversas de tiempo y sobre todo en el comportamiento de parámetros meteorológicos tales como temperatura superficial, evaporación, nubosidad, precipitaciones, etc.

A lo largo de la historia de nuestro planeta, estos cambios dentro del comportamiento climático han existido invariablemente, modificaciones drásticas en las temperaturas a nivel global han causado eras glaciales que han extinguido especies. Otros cambios ocasionados por erupciones volcánicas intensas han creado intensas capas de agentes nocivos dentro de la atmosfera causando épocas de temperaturas elevadas. Sin embargo, estos cambios se han generado en grandes escalas de tiempo. El planeta sufre de manera natural un incremento en su temperatura global generado por diversas fuentes de carácter natural que generan un efecto invernadero natural en la atmosfera, el cual mantiene un equilibrio en la dinámica atmosférica y donde los cambios son significativos después de un seguimiento de siglos o milenios.

Durante el siglo pasado, la comunidad científica empezó a analizar el comportamiento de estos cambios, ante el incremento en la presencia e intensidad de diversos fenómenos meteorológicos, como la intensidad en las precipitaciones a nivel mundial, la recurrencia de largos periodos de estiaje que afectan gravemente la zona norte de nuestro país, y el aumento de las temperaturas promedio a nivel mundial, teniéndose temperaturas históricas en diferentes zonas del planeta. Un fenómeno que ha incrementado su recurrencia, son los deslaves en diversos países, principalmente aquellos donde los eventos meteorológicos se presentan constantemente, ante la acumulación masiva de humedad por las constantes precipitaciones que reblandecen los suelos, afectando considerablemente a la población asentada cerca y sobre laderas de cerros y montañas, con estragos parciales sobre las ciudades o poblados o casos críticos donde estos fenómenos sepultan pueblos enteros. Otro factor que determino la preocupación por analizar el cambio dentro de la dinámica atmosférica fue el descubrimiento del agujero en la capa de ozono en la Antártida así como también la detección del deshielo acelerado de los casquetes polares, siendo este más visible en el polo norte en el cual por la orografía continental es más caliente que el polo sur y que durante la última década ha acelerado considerablemente su ritmo, esto ha causado la presencia de oleajes no vistos previamente en el océano Ártico, y la apertura de nuevas rutas marítimas antes bloqueadas por el hielo ártico.

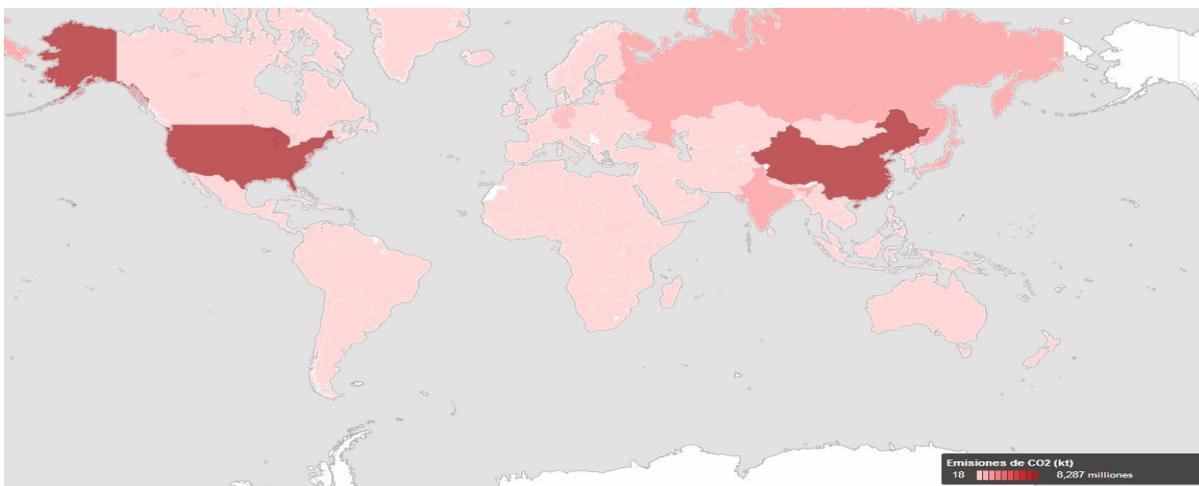


**Imagen 1. Inundaciones en Poza Rica Veracruz del año de 1999.**



**Imagen 2. Afectaciones por deslaves en el municipio de Coscomatepec Veracruz en el año 2013**

Se ha determinado una acumulación de agentes contaminantes en la atmosfera, el cual ha sido causado por las actividades humanas, el crecimiento poblacional que ha demandado un mayor uso de combustibles de origen fósil que suministre la energía necesaria para las necesidades de la población a nivel mundial, así como la activación del crecimiento industrial y tecnológico que se ha experimentado en las últimas décadas. Dentro de la atmosfera, se encuentran numerosos agentes contaminantes de origen antropogénico, y a pesar de la existencia de agentes que son más dañinos y destructivos que el Dióxido de Carbono su presencia es en proporciones mucho menor, debido a este efecto, se ha puesto una mayor atención, debido a las grandes cantidades que se han concentrado y a su vez, este acentúa de manera muy crítica el efecto invernadero, generando un incremento acelerado en la temperatura a nivel global.



**Imagen 3. Emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en Kilotoneladas a nivel mundial en el periodo 2009-2013. Fuente: Banco Mundial.**

En la figura 3, y de acuerdo a los datos proporcionados por el Banco Mundial, se muestran las emisiones que se generaron en el lapso del año 2009 al 2013, donde se observa que son los países de primer mundo y aquellos que han experimentado un desarrollo económico e industrial en los últimos años los que han elevado sus emisiones de Dióxido de Carbono, siendo el primer lugar ocupado por China con emisiones cercanas a las 8287 millones de kilotoneladas, seguido por los Estados Unidos de América, India, Japón y Rusia en ese orden. A pesar de la marcada

distribución geográfica en donde se encuentran estos países, los efectos generados por sus emisiones son de efecto global, debido a la dispersión de las partículas en la atmosfera y el crecimiento en la intensidad de los impactos en las áreas determinadas.

Ante esta serie de fenómenos que se han presentado a nivel global, derivado de la acumulación de agentes contaminantes en la atmosfera, el tema del cambio climático y el calentamiento global han tenido un profundo impacto en la sociedad y es un tema de suma importancia para analizar por su enorme relevancia en temas de carácter político, económico y energético. Sin embargo los Modelos Climáticos Globales (GCM por sus siglas en ingles), normalmente requieren de un amplio conocimiento en diversas áreas afines a la meteorología y climatología, así como de programación, para la manipulación de los códigos que rigen el funcionamiento de los GCM. También es necesario hacer uso de equipos complejos con requerimientos de hardware y altas capacidades de almacenamiento y procesamiento. Ante estas limitaciones, este tipo de investigaciones se realizan principalmente por investigadores y científicos que tengan los conocimientos mencionados y acceso a este tipo de equipos de cómputo.

Para este estudio, hemos hecho uso de un GCM, de carácter educativo, que presenta una interfaz de carácter amigable con el usuario y los requerimientos de cómputo son más accesibles para estudiantes que inician en el manejo de este tipo de programas. El EdGCM (Educative Global ClimateModel), no requiere de conocimientos sofisticados del área, a pesar de esto, las ciencias climáticas son un campo multidisciplinario donde es necesario tener conocimientos generales de sus diversas ciencias asociadas (océano, atmosfera, geología, física, química, matemáticas, etc.). El EdGCM, usa la estructura del modelo GISS GCM II y es desarrollado por el Instituto Goddard para Estudios Espaciales de la NASA en conjunto con la Universidad de Columbia, y está disponible en versión educativa, bajo licencia académica para el uso de alumnos de diferentes niveles educativos.



Imagen 4. EdGCM.

Los gráficos mostrados a continuación, son proyecciones estadísticas en series de tiempo desde 1958 hasta el año 2100 donde se analiza el comportamiento de determinadas variables climáticas en este lapso de tiempo, como consecuencia de los efectos generados por el cambio climático. Se toma como inicio para las proyecciones el año de 1958, debido a que a partir de esta fecha es cuando se empieza a tomar importancia sobre estos fenómenos y empiezan a existir registros más confiables.

## Resultados

En esta sección mostramos una serie de resultados que indican los comportamientos a nivel global para nuestro estudio, misma que se relacionaran con datos reales facilitados por la DIGAOHM y el IOGMC de la SEMAR, obtenidos en la zona costera del Estado de Veracruz.

La radiación solar es la principal fuente de energía que regula y controla el comportamiento del clima en nuestro planeta. La distribución y forma en que estos rayos inciden sobre la Tierra está determinado por la ubicación y los ciclos de movimientos de rotación y traslación. Es posible observar como la radiación solar neta incidente sobre el planeta no varía durante el periodo de análisis, manteniéndose en una tendencia lineal. La radiación solar que incide sobre los continentes y el océano sigue esta misma tendencia, detectándose una ligera disminución en el océano abierto a partir del año 2005 que continua hasta el año 2100. Debido a la escala sobre la cual se maneja el grafico, esta disminución es mínima y por tanto no ve afectada la tendencia del comportamiento global.

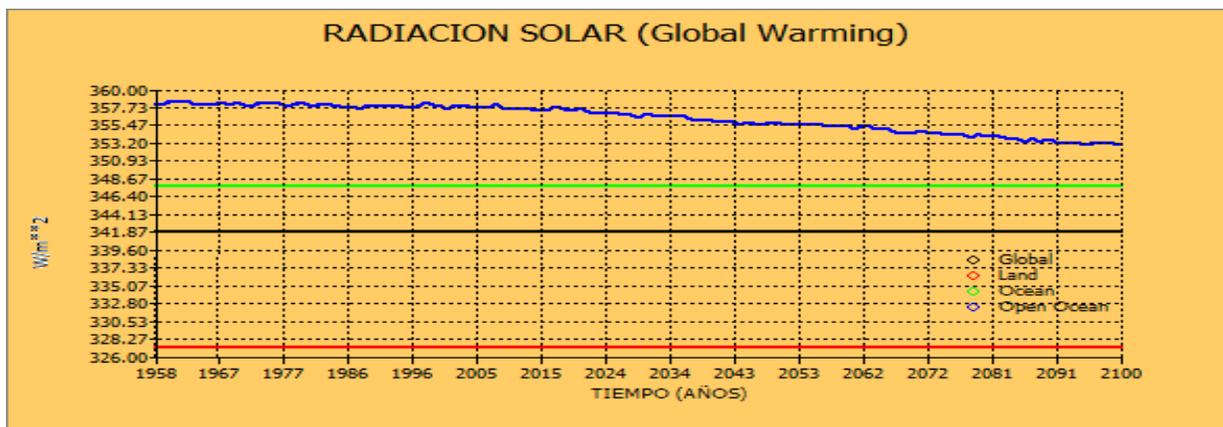


Figura 1. Proyección estadística de la radiación solar incidente sobre el planeta dentro del lapso de tiempo del año 1958 al 2100. EdGCM.

Como se puede observar, la variación en la radiación solar incidente sobre la Tierra es prácticamente nula, comportándose de manera constante durante todo este periodo, sin embargo, dentro de otras variables climáticas si se detectan modificaciones drásticas en su comportamiento que representan un grave deterioro al equilibrio natural de la dinámica atmosférica y causando graves variaciones en los fenómenos naturales.

El albedo terrestre se encarga de la absorción y reflexión de la radiación solar incidente sobre el planeta. Un albedo de menor porcentaje significa una mayor absorción de la radiación solar sobre la superficie, lo cual significa un incremento en la temperatura superficial y un calentamiento del planeta, las zonas de menor albedo terrestre se ubican en las zonas de océano abierto alrededor del ecuador, así como las porciones continentales dentro de la misma área. Conforme se avanza hacia los polos, el porcentaje de reflexión de la tierra aumenta, encontrando sus mayores valores en los polos, debido a la cobertura de nieve y los casquetes polares que se ubican en estas zonas, así como también en las zonas de altas montañas como la cadena del Himalaya y valores intermedios en las zonas selváticas y boscosas de los trópicos, por lo tanto, una mayor reflexión de la radiación genera un enfriamiento de la Tierra. Un equilibrio entre el albedo ecuatorial y el albedo polar genera un equilibrio en la temperatura global.

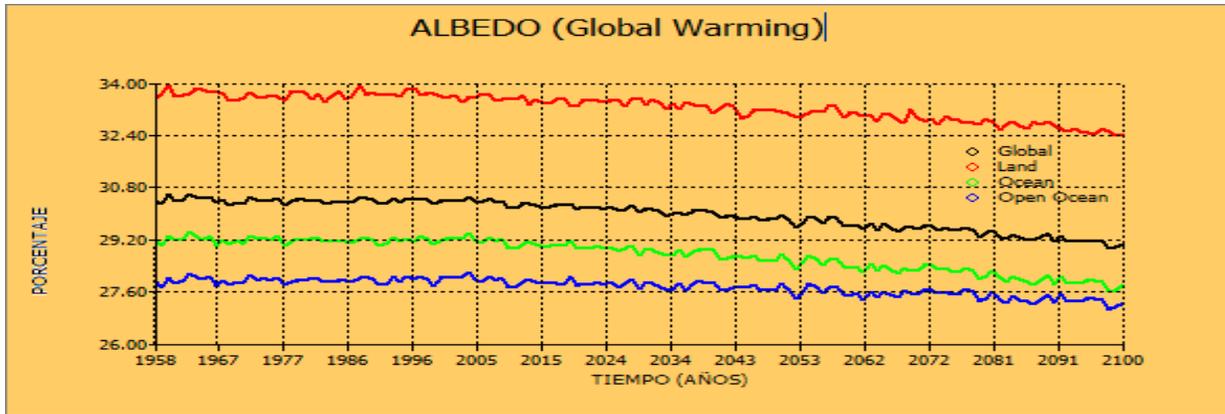


Figura 2. Proyección estadística de la variación del albedo terrestre dentro del lapso de tiempo del año 1958 al 2100. EdGCM.

Como resultado del deshielo que se ha presentado en los casquetes polares y la disminución anual de la cobertura de nieve que se ha observado en las montañas de gran elevación, así como la deforestación generada por la agricultura y la expansión de las zonas urbanas, el albedo terrestre se ha visto afectado y ha sufrido una disminución tanto en la zona continental, las zonas costeras y el océano abierto, siendo en la zona continental donde se ha observado una grave disminución de este, dentro de las observaciones globales es más notorio a partir del año 2005. De acuerdo a la proyección estadística generada, el albedo terrestre continuara degradándose sufriendo un decaimiento casi constante sin presentar periodos de recuperación hasta el año 2100.

La disminución en el porcentaje global del albedo ha causado y causara que nuestro planeta sufra un calentamiento mayor al enfriamiento que tendrá, lo cual rompe el equilibrio del clima global. Al disminuirse el porcentaje de reflexión de los rayos incidentes sobre la superficie, la Tierra presentara un aumento en su temperatura superficial, como se puede mostrar en la siguiente figura.

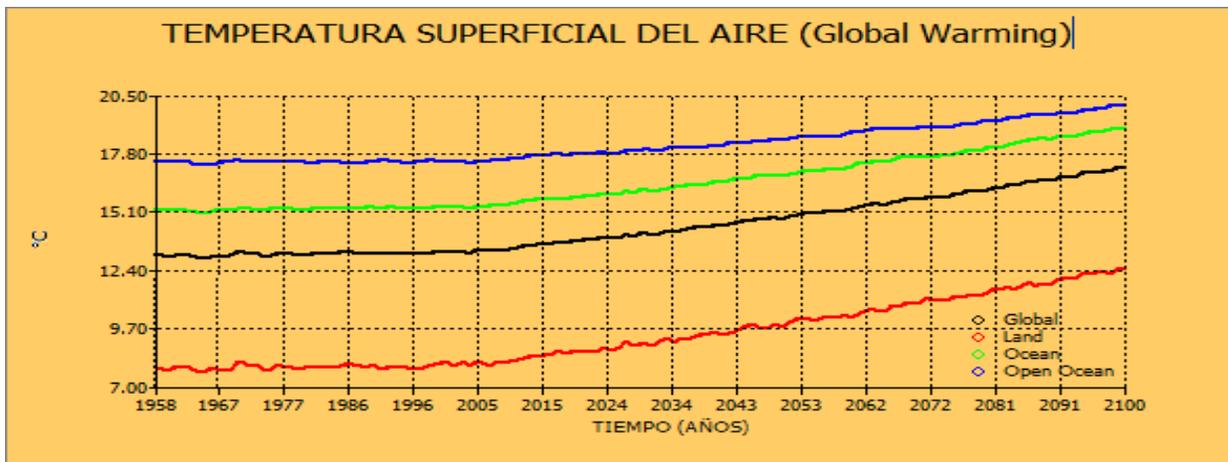


Figura 3. Proyección estadística del comportamiento de la temperatura superficial dentro del lapso de tiempo del año 1958 al 2100. EdGCM.

Como puede observarse, la temperatura superficial global del planeta presente en el lapso de tiempo del año 1958 al año 2005 un incremento gradual de la temperatura, con un incremento

aproximado menor a 1°C, este comportamiento se observa también en la porción de zonas costeras y océano abierto, percibiéndose en la zona continental una mayor variación. Dentro de nuestra proyección estadística se observa posterior al año 2005 un incremento de carácter exponencial en el aumento de la temperatura superficial global continuo hasta el año 2100 de aproximadamente 4°C. Observando de manera individual dichos parámetros, se puede observar un incremento mayor en la zona continental con un incremento de hasta casi 5°C, cercano a los 4°C en las zonas costeras y de 3°C aproximadamente en el océano abierto. Las proyecciones generadas arrojan resultados de carácter crítico, ante los cortos lapsos de tiempo en que se generaran, causando modificaciones drásticas en todos los componentes de la dinámica atmosférica.

La interacción entre los cuerpos de agua y la temperatura genera una evaporación natural, siguiendo el ciclo del agua. Ante el incremento de la temperatura superficial; tanto en las zonas continentales como en el océano, se ha observado un aumento en la evaporación siendo este fenómeno más observado en las zonas entre los trópicos. En la zona continental, las zonas de humedales, bosques y selvas y las áreas que perciben mayores precipitaciones es donde se puede observar una mayor evaporación, encontrándose los mayores niveles en el sureste de Asia, cuya zona es golpeada constantemente por tifones.

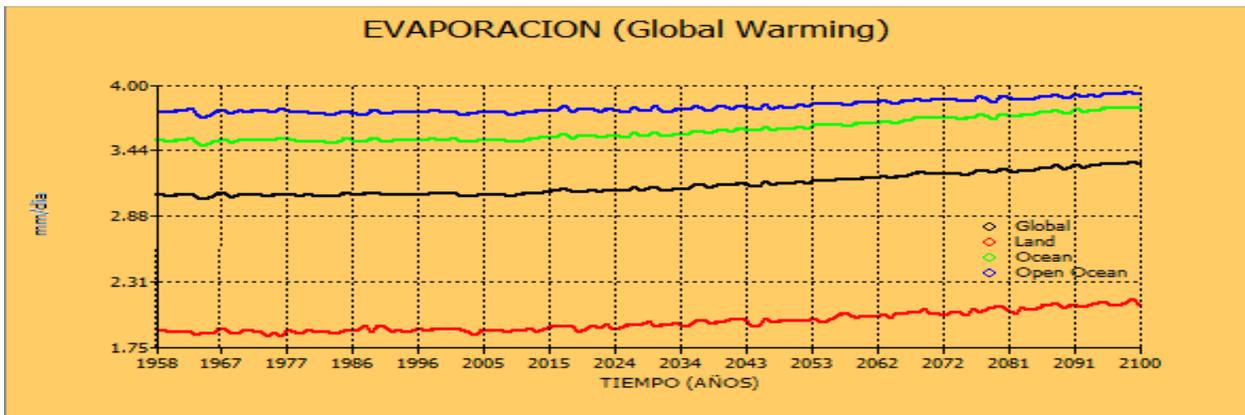


Figura 4. Proyección estadística del comportamiento de la evaporación dentro del lapso de tiempo del año 1958 al 2100. EdGCM.

Como se pudo notar en el grafico anterior (figura 3), y también se ha constatado en los resultados previos, el comportamiento que existe dentro del lapso de 1958 al año 2005 presenta una tendencia con un incremento gradual, siendo a partir de este año donde se proyectan un aumento significativo en las variables. Dentro de la proyección estadística, hasta el año 2100 se tendrá un aumento de casi el 25% en la evaporación. Los mayores incrementos se presentan en el océano abierto y la zona continental. Un incremento en la evaporación genera una mayor presencia de vapor de agua en la atmosfera, y a pesar de no considerarse un agente contaminante el vapor de agua es un potente agente que aumenta el efecto invernadero. También este aumento genera una mayor cobertura de nubes, el cual realiza una dispersión de la radiación solar incidente en el planeta, y si se analiza la presencia de mayores niveles de evaporación en el océano, se puede asociar a la disminución observada en la radiación incidente tal como se mostró en la figura 1. Debido al incremento dentro de la cobertura de nubes generada por el aumento de la evaporación, tenemos un aumento de la precipitación potencial. El cual podemos observar en la siguiente proyección estadística.

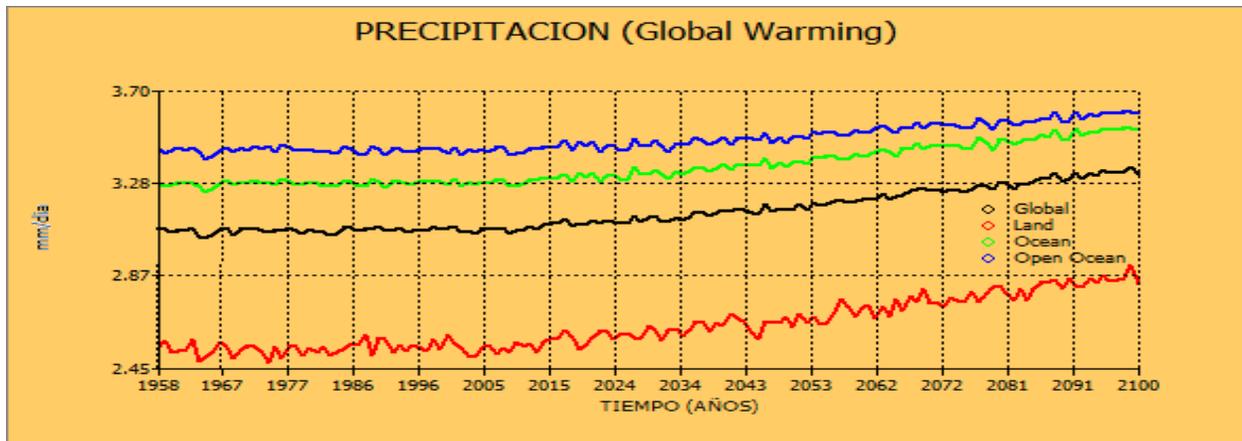
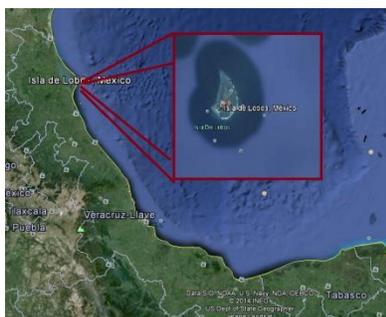


Figura 5. Proyección estadística de la precipitación dentro del lapso de tiempo del año 1958 al 2100. EdGCM.

La intensidad en las precipitaciones se ha visto aumentada en la última década, datos concordantes con la proyección observada en la figura 5, sin embargo hasta el año 2005 el incremento no se reflejaba tan drástico. A partir de este año y en la proyección hasta el año 2100 se observa un incremento casi exponencial la intensidad de precipitaciones, siendo esto más visible en la zona continental y con un aumento menor en el océano. Los fenómenos meteorológicos ven incrementado su potencial ante estas variaciones, siendo las zonas más golpeadas la zona Sureste de Asia por el incremento en la intensidad de los tifones, así como la zona del Caribe y Golfo de México durante la temporada de huracanes que afectan dichas regiones. Ante la disminución de las zonas de absorción y la disminución del potencial de los sitios de recargas hídricas por la erosión causada por la deforestación, los escurrimientos son mayores causando daños más desastrosos.

En este trabajo, las proyecciones estadísticas que se han generado, consideramos el escenario actual de emisiones de Dióxido de Carbono y otros agentes contaminantes como el Metano y los HFC presentes en la atmósfera. Los incrementos en las variables climáticas analizadas pueden verse aceleradas si las emisiones de estos agentes en la atmósfera se ven incrementadas. Caso contrario, las proyecciones pueden disminuirse (lentamente) en su intensidad si el escenario de emisiones cambia a una disminución de estos.

De los datos proporcionados por la SEMAR, se ha hecho un proceso de filtración, buscando la coherencia de las mediciones obtenidas y descartando los errores de adquisición, para una mayor confiabilidad en los resultados. Consideramos los datos de dos sitios en las costas del estado de Veracruz: Isla Lobos en la zona norte y la localidad de El Salado en la zona sur del estado.

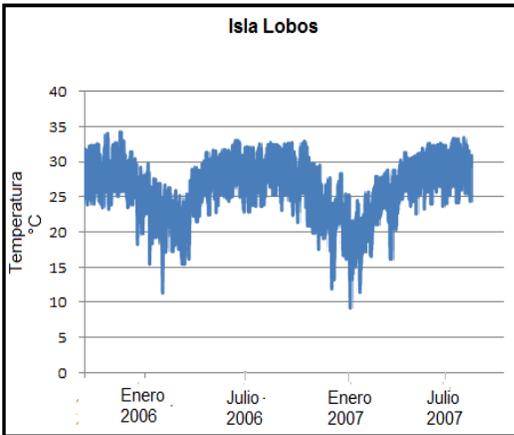


La Isla Lobos está localizada en la zona norte del estado de Veracruz, cercana a la laguna de Tamiahua, en las coordenadas  $21^{\circ}28'11''N$  y  $97^{\circ}13'36.35''O$ . En esta estación se han analizado datos de precipitación y temperatura del sitio del año 2000 al 2007.

Se verificaron la tendencia que los valores presentan en un lapso determinado de tiempo, graficando esta tendencia exclusivamente en los últimos 3 años (Julio 2005 – Agosto

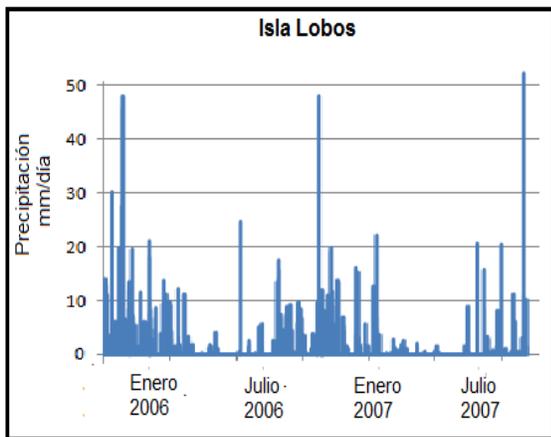
Imagen 5. Localización de la Isla Lobos, 2007). Se descartan valores que no poseen secuencia bajo la en el estado de Veracruz. Google Earth.

tendencia normal, eliminando los valores extremos, siempre y cuando estos no concordaran con el comportamiento de las demás variables, considerándolos errores de adquisición del equipo meteorológico.



**Figura 6. Reanálisis de temperaturas Julio 2005- Agosto 2007. Estación Isla Lobos.**

Como se analizó en las proyecciones estadísticas de temperatura superficial (figura 3), la temperatura global aumenta gradualmente durante la primera década del siglo XXI. En nuestra zona de análisis, hacemos el cálculo dentro del lapso de tiempo determinado, graficamos un tiempo menor al total para observar con mayor detalle el comportamiento de la temperatura. Como se puede observar tenemos un incremento en la media de estos valores. En las estaciones frías, se observa que las temperaturas mínimas son menores, presentándose una mayor presencia de temperaturas más cálidas y la presencia de temperaturas altas es más recurrente.

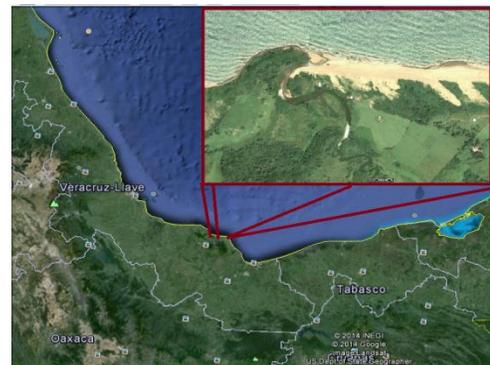


**Figura 7. Reanálisis de precipitaciones Julio 2005- Agosto 2007. Estación Isla Lobos.**

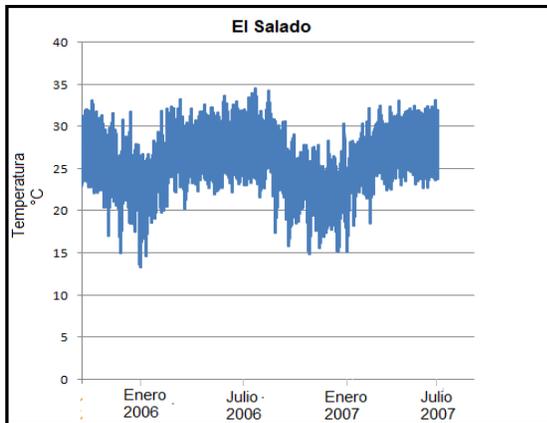
Seguimos el mismo procedimiento para el análisis de precipitaciones, disminuyendo el rango de tiempo para los perfiles, buscando algún patrón inestable de los datos en el sitio de análisis.

Como se puede observar, los puntos máximos de precipitación se observan más recurrentes, además de esto, se observa que en épocas de lluvia, éstas presentan una mayor precipitación, mismo comportamiento que a nivel global se observa en la proyección estadística de precipitación de la figura 5.

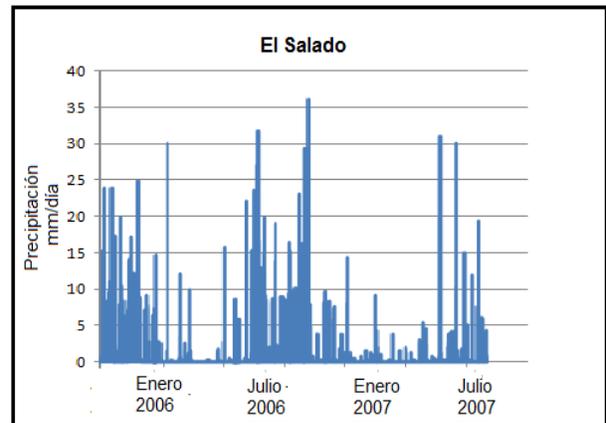
La siguiente zona de estudio es El Salado y se ubica en la zona sur del estado, cercana a la zona de los Tuxtles, cuyas coordenadas son 18°32'45.64"N y 94°53'42.65"O, en esta estación se analizan datos de precipitación y temperaturas del sitio del año 2000 al 2007, graficando esta tendencia exclusivamente en los últimos 3 años (Julio 2005 – Agosto 2007). El procedimiento de análisis fue el mismo de la estación Isla Lobos.



**Imagen 6. Localización de El Salado, en el estado de Veracruz. Google Earth.**



**Figura 8. Reanálisis de temperaturas Julio 2005- Agosto 2007. Estación El Salado.**



**Figura 9. Reanálisis de precipitaciones Julio 2005- Agosto 2007. Estación El Salado.**

En esta zona de estudio, se observa el mismo comportamiento (aumento). El reanálisis de los datos obtenidos en la estación meteorológica muestra las tendencias determinadas previamente en los gráficos de proyecciones estadísticas. Un incremento en los valores de las lecturas obtenidas, presentándose con mayor frecuencia la presencia de altas temperaturas y en las temporadas frías (Invierno), la menor presencia de temperaturas frías, concordante con las predicciones.

## Conclusiones

Un GCM, permite conocer y analizar el comportamiento de las variables climáticas a escala global, siendo posible observar los valores significativos en toda la cobertura del planeta. Las proyecciones estadísticas generadas, se realizan a partir de valores iniciales, considerándose en este estudio el escenario actual de emisiones, si este fuera modificado, los tendencias de igual forma se verían modificadas en su comportamiento, viéndose incrementadas o disminuidas dependiendo el caso. Con datos reales obtenidos en estaciones meteorológicas, podemos hacer el reanálisis de dichos datos, buscando identificar los patrones de comportamiento que estos presentan y relacionarlos con las proyecciones estadísticas. De esta manera, con datos reales, se puede determinar si a nivel regional se observa el mismo comportamiento que estadísticamente a nivel global, cabe aclarar que debido a ello igual se pierde información debido a interacciones externas de parámetros meteorológicos y oceanográficos. El lapso de tiempo analizado con datos reales es corto comparado con el rango de tiempo de los estadísticos generados con EdGCM, a pesar de esto, es posible analizar y observar que a nivel regional, se presenta el mismo comportamiento de incremento en la presencia de temperaturas anuales, así como un incremento gradual en la intensidad de las precipitaciones.

## Bibliografía

- 1.- Hansen, J., et al., 1988: Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies 3-dimensional model. Journal Of Geophysical Research-Atmosphere,93(D8), 9341-9364.
- 2.- Chandler, M.A., S.J. Richards, and M. Shopsis, 2005: EdGCM: Enhancing climate science education through climate modeling research projects and the EdGCM Project at Columbia University, CCSR.
- 3.- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., and Lo, K., 2010: Global surface temperature change. Rev Geophys-48 RG4004.