

# Modelos Climáticos y sus aplicaciones en el sector agrícola.

**Marlemys Martínez**

Maestría Científica en Ingeniería Matemática

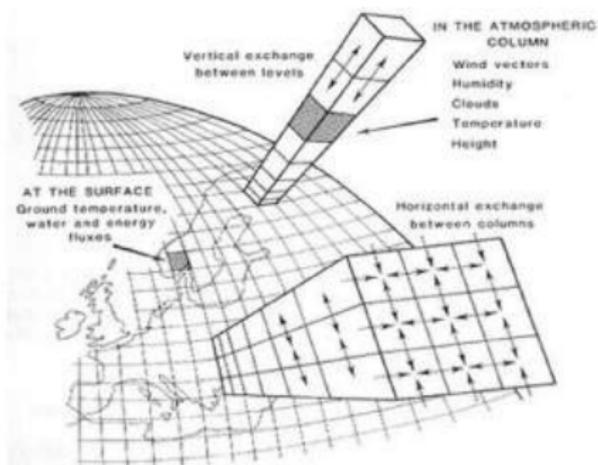
Asesor Javier Sánchez Galán, PhD

Septiembre, 2019

- 1 Introducción
- 2 Evaluación de escenarios climáticos futuros para Panamá: implicaciones en el rendimiento del cultivo de maíz en la península de Azuero.
- 3 Exploración de las bases matemáticas de los modelos climáticos y sus métodos de resolución.
- 4 Caracterización del Comportamiento Dinámico de Variables Meteorológicas en Los Santos, Panamá.

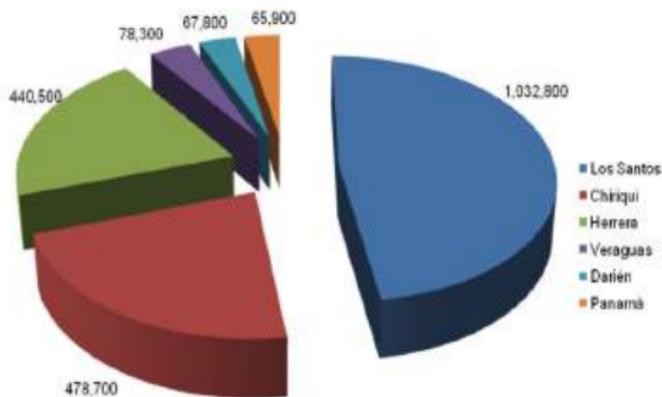
# Modelos Climáticos

Los modelos climáticos globales se utilizan para la predicción meteorológica, la comprensión del clima y la previsión del cambio climático.



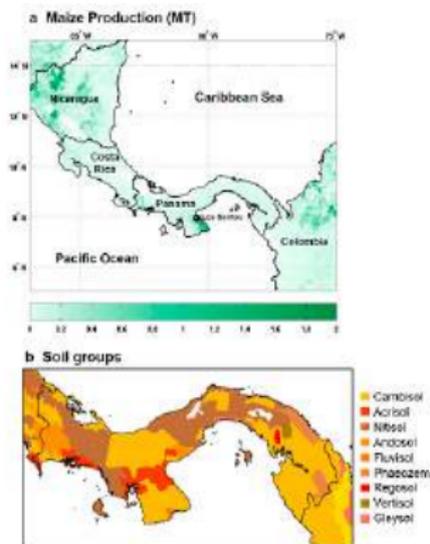
Cabrera, J. (2013). Modelo de Circulación General Océano-Atmosférico Acoplado (AOGCM).

# Realidad Panameña



Cosecha de maíz (en Quintales) en las provincias con mayor producción, (INEC, 2015).

# Climate change impact uncertainties for maize in Panama: Farm information, climate projections, and yield sensitivities



(a) Estimaciones de producción de maíz para 2000 en todo Panamá y sus alrededores (miles de TM; de Monfreda et al., 2008) (b) Grupos de suelos de la Base de Datos Mundial de Suelos Armonizados para Panamá (FAO, 2009),(Ruane et al., 2013).

# Modelo de regresión. Los granos básicos y la Variabilidad climática en Azuero: Caso maíz 1



Fechas de siembra para la región de Azuero según análisis de lluvia periodo 1995-2013, (Gordón, 2014).

## Escenarios climáticos

- Permiten proyectar cómo las actividades humanas o efectos naturales pueden alterar el clima durante años.
- Se caracterizan por incluir posibles cantidades de emisiones de gases efecto invernadero y otros forzantes por causas antropogénicas.
- En el 2001, el **IPCC**, presenta el Informe sobre escenarios de emisiones (**SERES**) e implementan un conjunto de cuatro familias de escenarios (A1, B1, A2, B2).
- En 2014 implementan Representative Concentration Pathways (**RCP**) para describir cuatro vías diferentes de emisiones de gases efecto invernadero y emisiones atmosféricas, emisiones de contaminantes del aire y uso de la tierra.

## Escenarios climáticos

- Permiten proyectar cómo las actividades humanas o efectos naturales pueden alterar el clima durante años.
- Se caracterizan por incluir posibles cantidades de emisiones de gases efecto invernadero y otros forzantes por causas antropogénicas.
- En el 2001, el **IPCC**, presenta el Informe sobre escenarios de emisiones (**SERES**) e implementan un conjunto de cuatro familias de escenarios (A1, B1, A2, B2).
- En 2014 implementan Representative Concentration Pathways (**RCP**) para describir cuatro vías diferentes de emisiones de gases efecto invernadero y emisiones atmosféricas, emisiones de contaminantes del aire y uso de la tierra.

## Escenarios climáticos

- Permiten proyectar cómo las actividades humanas o efectos naturales pueden alterar el clima durante años.
- Se caracterizan por incluir posibles cantidades de emisiones de gases efecto invernadero y otros forzantes por causas antropogénicas.
- En el 2001, el **IPCC**, presenta el Informe sobre escenarios de emisiones (**SERES**) e implementan un conjunto de cuatro familias de escenarios (A1, B1, A2, B2).
- En 2014 implementan Representative Concentration Pathways (**RCP**) para describir cuatro vías diferentes de emisiones de gases efecto invernadero y emisiones atmosféricas, emisiones de contaminantes del aire y uso de la tierra.

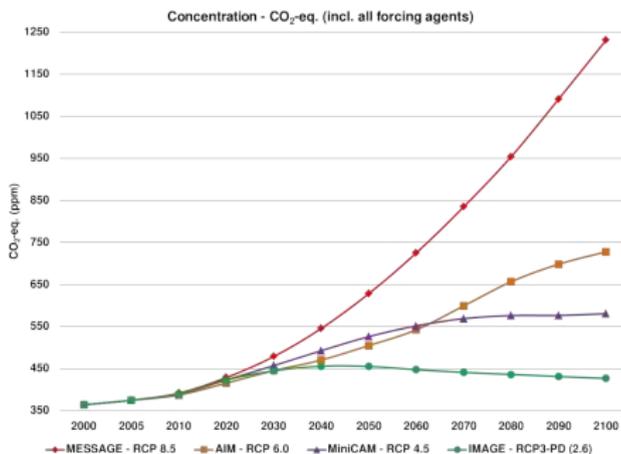
## Escenarios climáticos

- Permiten proyectar cómo las actividades humanas o efectos naturales pueden alterar el clima durante años.
- Se caracterizan por incluir posibles cantidades de emisiones de gases efecto invernadero y otros forzantes por causas antropogénicas.
- En el 2001, el **IPCC**, presenta el Informe sobre escenarios de emisiones (**SERES**) e implementan un conjunto de cuatro familias de escenarios (A1, B1, A2, B2).
- En 2014 implementan Representative Concentration Pathways (**RCP**) para describir cuatro vías diferentes de emisiones de gases efecto invernadero y emisiones atmosféricas, emisiones de contaminantes del aire y uso de la tierra.

## Escenarios climáticos

- Permiten proyectar cómo las actividades humanas o efectos naturales pueden alterar el clima durante años.
- Se caracterizan por incluir posibles cantidades de emisiones de gases efecto invernadero y otros forzantes por causas antropogénicas.
- En el 2001, el **IPCC**, presenta el Informe sobre escenarios de emisiones (**SERES**) e implementan un conjunto de cuatro familias de escenarios (A1, B1, A2, B2).
- En 2014 implementan Representative Concentration Pathways (**RCP**) para describir cuatro vías diferentes de emisiones de gases efecto invernadero y emisiones atmosféricas, emisiones de contaminantes del aire y uso de la tierra.

## RCP 8.5



IPCC (2014). Trayectorias representativas de concentración de CO<sub>2</sub>: RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5, RCP 2.6.

Las variables de precipitación y temperatura están proyectadas para el escenario RCP 8.5, con valores de forzamiento radiativo en el año 2100 en  $+8,5W/m^2$  de CO<sub>2</sub> en relación con los valores preindustriales.

# Limitaciones de los GCM

## Problemas

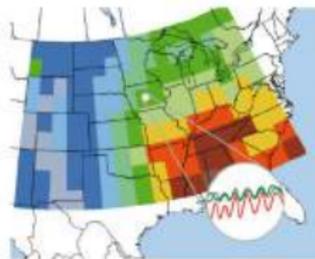
- Errores sistemáticos o sesgos.
- Baja resolución (> 50 Km).
- Conocimiento incompleto del sistema climático.
- Altas desviaciones con respecto a los datos observados.

## Necesidades

- Corregir sesgos.
- Poveer datos de alta resolución y contextualizados.

## Opciones

- Downscaling por métodos estadísticos o dinámicos.
- Métodos de corrección de sesgo.



## Corrección de sesgo

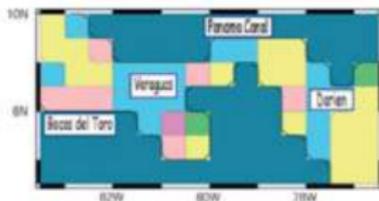
La corrección de sesgo es una técnica para el procesamiento posterior de la salida de los modelos de circulación general (GCM).

Es importante corregir el sesgo y reducir la escala de los resultados del modelo climático sin procesar para producir proyecciones climáticas que se ajusten mejor al modelo agrícola. Existen diferentes métodos como:

- 1 Bias Correction
- 2 Change Factor
- 3 Linear scaling
- 4 Variance Scaling
- 5 Power Transformation
- 6 Quantile mapping

## MRI-AGCM3.2S

El modelo MRI-AGCM3.2S de “super alta resolución” (20 km)[Mizuta et al., 2006], para la proyección de lluvia y temperatura en Panamá y América Central a partir de cuatro diferentes temperaturas de la superficie del mar.



Nakaegawa et al., (2013). Proyecciones hidroclimáticas para Panamá en el último siglo.

# Evaluación de escenarios climáticos futuros para Panamá: implicaciones en el rendimiento del cultivo de maíz en la península de Azuero.

## Objetivo General

Evaluar escenarios climáticos futuros para Panamá y sus implicaciones en el rendimiento del cultivo de maíz en la península de Azuero.

## Objetivos Específicos

- Analizar el modelo MRI-AGCM de super alta resolución.
- Ajustar el modelo de predicción de MRI-AGCM para el área de la región de Azuero.
- Utilizar los valores ajustados en un modelo de producción de maíz para la región de Azuero.
- Relacionar los datos ajustados del modelo MRI-AGCM con el modelo de Los granos básicos y la Variabilidad climática en Azuero: Caso maíz 1.

## Objetivo General

Evaluar escenarios climáticos futuros para Panamá y sus implicaciones en el rendimiento del cultivo de maíz en la península de Azuero.

## Objetivos Específicos

- Analizar el modelo MRI-AGCM de super alta resolución.
- Ajustar el modelo de predicción de MRI-AGCM para el área de la región de Azuero.
- Utilizar los valores ajustados en un modelo de producción de maíz para la región de Azuero.
- Relacionar los datos ajustados del modelo MRI-AGCM con el modelo de Los granos básicos y la Variabilidad climática en Azuero: Caso maíz 1.

## Alcances del estudio

- Divulgar resultados preliminares de una investigación de maestría que tiene como objetivo hacer una evaluación de los escenarios climáticos futuros y sus implicaciones en el rendimiento del cultivo de maíz en la península de Azuero,
- Hacer énfasis en la seguridad alimentaria de nuestro país ya que para el periodo agrícola 2017-2018 un 93 % de la producción nacional de maíz mecanizado se obtuvo en Azuero (MIDA, 2019) y también por ser el sector agrícola uno de los más vulnerable ante el cambio climático.

# Metodología

## Ajuste de datos

- Explorar la base de datos con información de climas futuros.
- Uso de paquete Grid Analysis and Display System(Grads).



Grid Analysis and Display System  
(GrADS)



- Uso de herramientas de estadísticas descriptivas para estudiar la precipitación y la temperatura proyectada para los escenarios del RCP 8.5

# Metodología

## Ajuste de datos

- Explorar la base de datos con información de climas futuros.
- Uso de paquete Grid Analysis and Display System(Grads).



Grid Analysis and Display System  
(GrADS)



- Uso de herramientas de estadísticas descriptivas para estudiar la precipitación y la temperatura proyectada para los escenarios del RCP 8.5

# Metodología

## Ajuste de datos

- Explorar la base de datos con información de climas futuros.
- Uso de paquete Grid Analysis and Display System(GrADS).



Grid Analysis and Display System  
(GrADS)



- Uso de herramientas de estadísticas descriptivas para estudiar la precipitación y la temperatura proyectada para los escenarios del RCP 8.5

## Datos proyectados para el escenario RCP 8.5

Clima	Descripción	Periodo	Nombre
Presente	Datos obtenidos del patrón de la media del conjunto del multimodelo de SST calculado de proyecciones futuras de los 18 modelos CMIP3.	1979-2003	SPA 8.5
Futuro	Datos obtenidos de tres patrones (clúster 1, clúster 2, clúster 3) utilizando un análisis de clúster basado en 28 modelos climáticos de CMIP5.	2075-2099	SFA 8.5 (C0, C1, C2, C3)

## Temperaturas de la superficie del mar (C0, C1, C2, C3)

C0: Composición total de los 28 modelos. Diferencia de cada clúster en relación con la media de todos los modelos.

C1: En el clúster 1 el calentamiento en el hemisferio sur es más grande que en el hemisferio norte.

C2: El clúster 2 se caracteriza por un calentamiento distinto en el Pacífico Central de los trópicos.

C3: El clúster 3 se distingue por el calentamiento visible cerca de Japón. La concentración de hielo marino en el futuro fue creada de manera similar a la agrupación de SST.

(Kusunoki et al, 2019).

# Construcción y adecuación de un modelo de regresión de rendimiento de cultivo de maíz

## Cálculo del Índice estandarizado de precipitación (SPI)

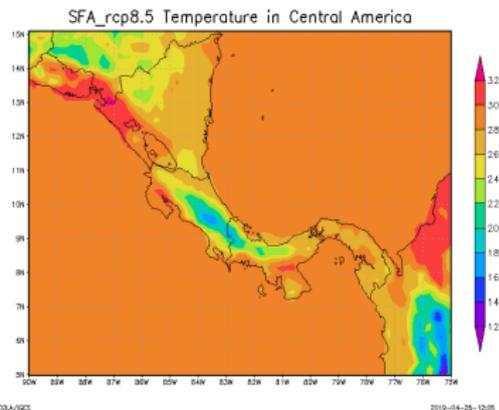
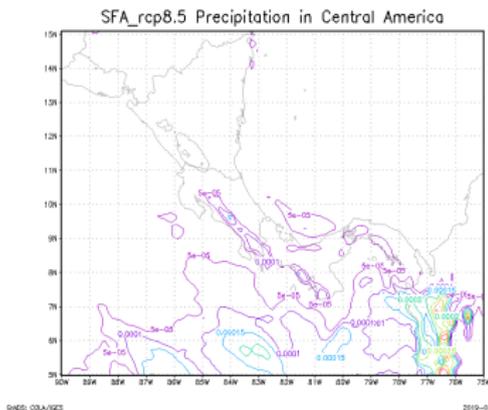
Es un índice basado en la probabilidad de precipitación para cualquier escala de tiempo, y sólo es dependiente de series históricas de precipitación.

## Corrección de sesgo

Aplicación de corrección de sesgo estadístico y método de mapeo cuantil a los datos proyectados por el modelado MRI-AGCM3.

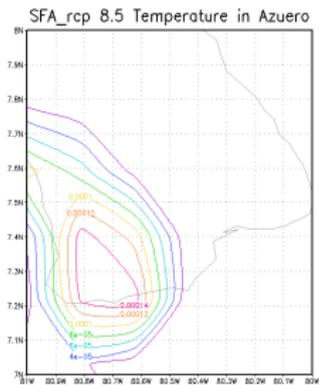
## Resultados preliminares

Clima futuro(2075-2099) para el escenario RCP 8.5 c0 América Central y el Caribe



Proyecciones futuras para el día 01/01/2075 para la región Centroamericana para las variables Precipitación y Temperatura.

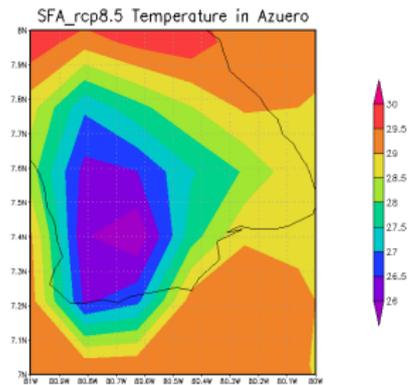
## Clima futuro (2075-2099) para el escenario RCP 8.5 c0 en la región de Azuero



GIS: COLA/NEZ

2019-04-25-11:53

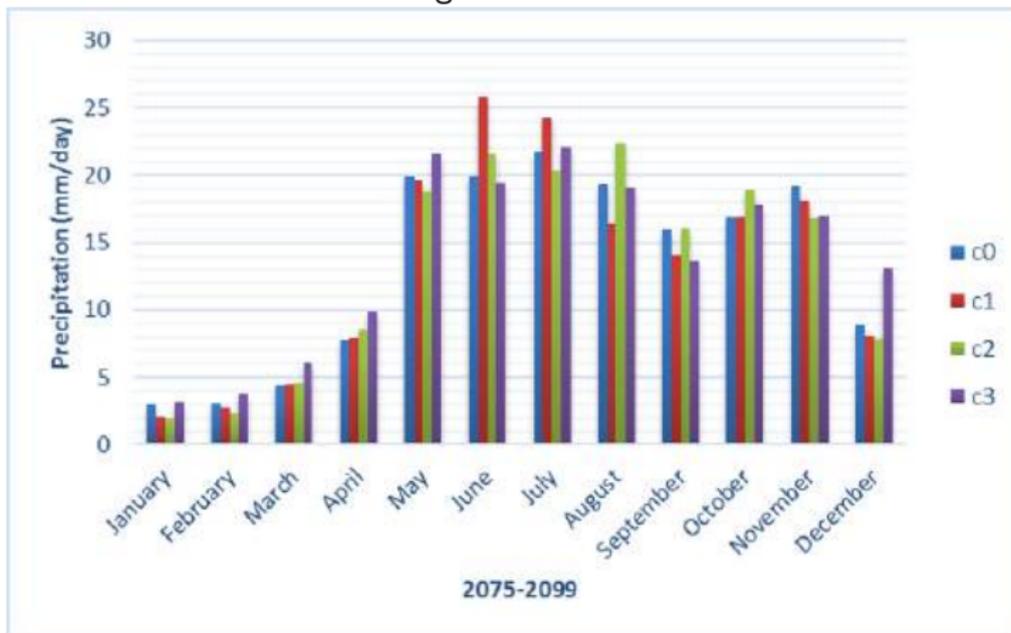
GIS: COLA/NEZ

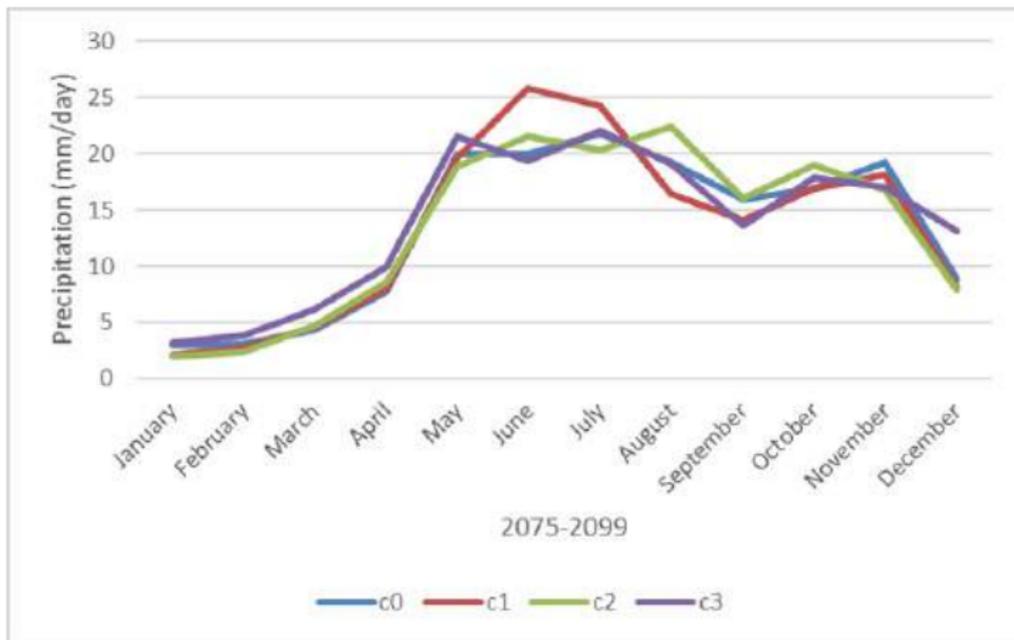


2019-04-25-11:58

Proyecciones futuras para el día 01/01/2075 para la región de Azuero para las variables Precipitación y Temperatura.

Promedios mensuales para los años 2075-2099 para la variable Precipitación según RCP 8.5

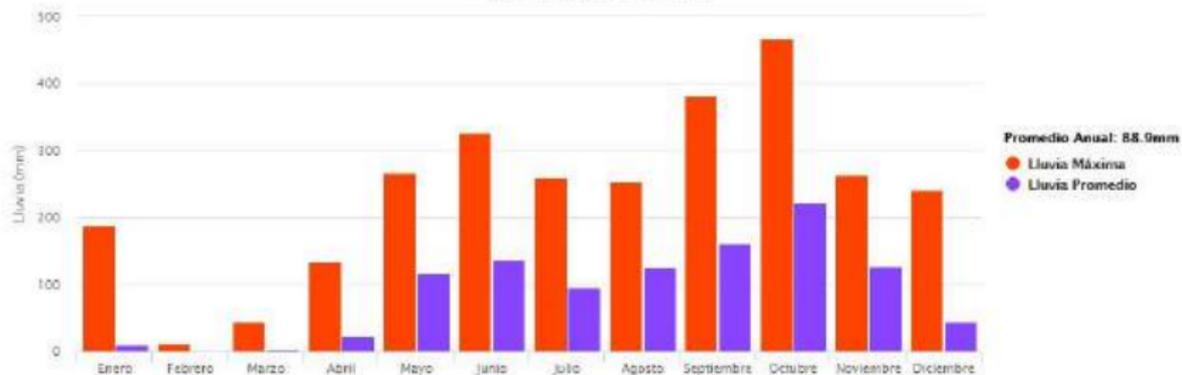




Canícula en la región de Azuero.

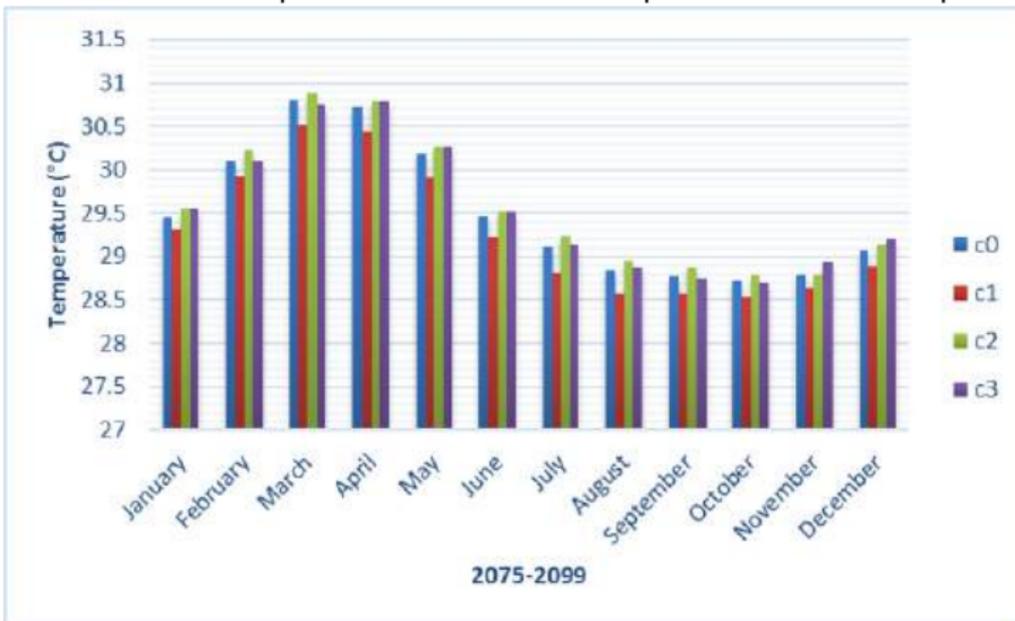
## Histórico de Lluvias

Estación: LOS SANTOS (128-001)



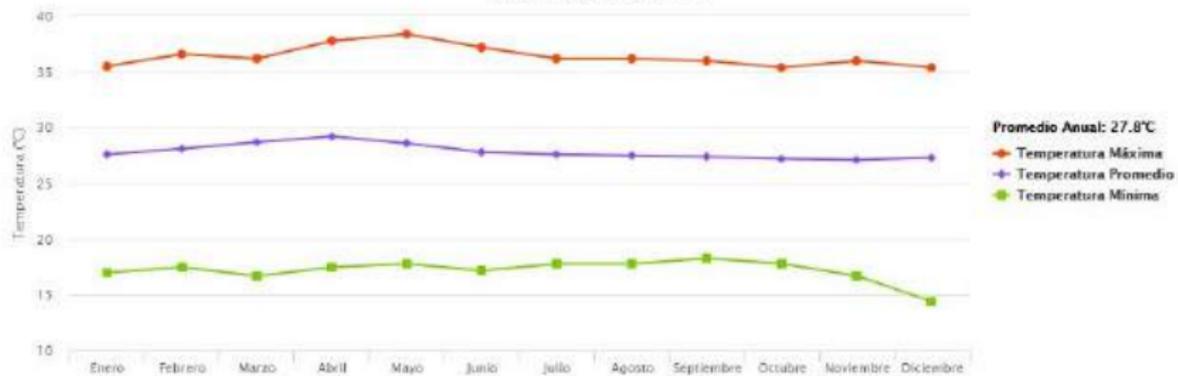
ETESA. Datos históricos de lluvia en Los Santos.

Promedios mensuales para los años 2075-2099 para la variable Temperatura.



## Histórico de Temperaturas

Estación: LOS SANTOS (128-001)



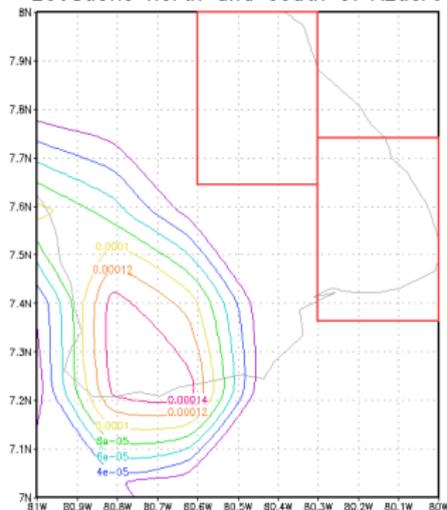
ETESA. Datos históricos de Temperatura en Los Santos.

<b>Tipo de clima</b>	<b>Localización</b>	<b>Temperatura media (° C)</b>	<b>Precipitación media anual (mm)</b>
Tropical húmedo y muy húmedo	Llanuras costeras y colinas del Atlántico y Pacífico entre 0 y 700 m	Entre 28 y 34	Entre 2 600 y 5 500
Templado húmedo y muy húmedo	Cordillera Central, Serranías y Cadena Occidental de Azuero, entre 700 y 3 475 m	Entre 18 y 20	Entre 4 000 y 7 000
Tropical Seco	Península de Azuero	Entre 28 y 34	Entre 1 000 y 1 500

Empresa de Transmisión Eléctrica (ETESA)

## Sub-Análisis para Localidades al Norte y al Sur de Azuero

Locations north and south of Azuero



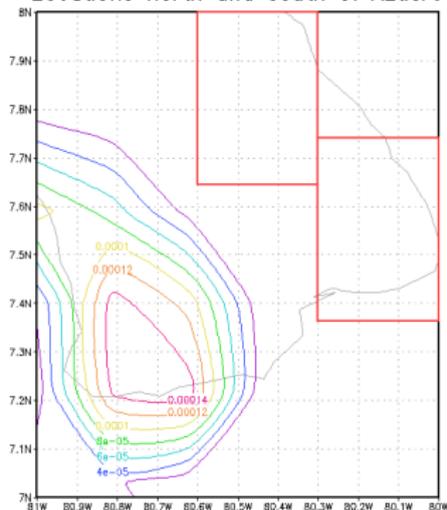
GMS: COLA/DES

2019-04-24-23:39

- Norte (Parita, Los Santos, Chitre, Guararé).
- Sur (Las Tablas, Pocrí, Pedasí).

## Sub-Análisis para Localidades al Norte y al Sur de Azuero

Locations north and south of Azuero



GHD: COLA/DES

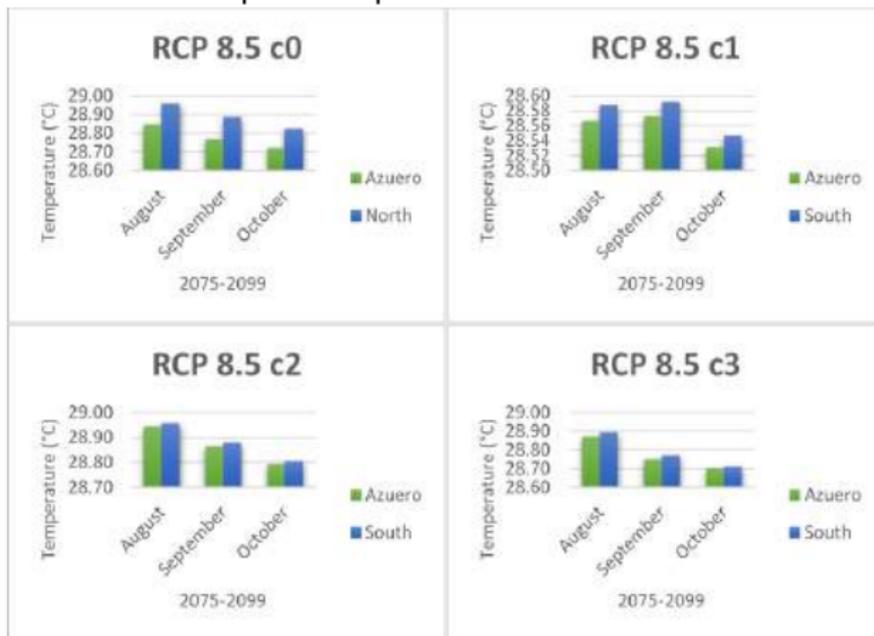
2019-04-24-23:39

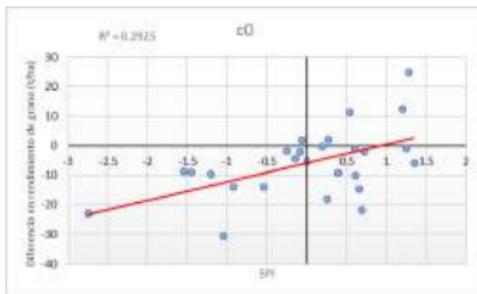
- Norte (Parita, Los Santos, Chitre, Guararé).
- Sur (Las Tablas, Pocrí, Pedasí).

Promedios de precipitación para los meses de siembra en Azuero.

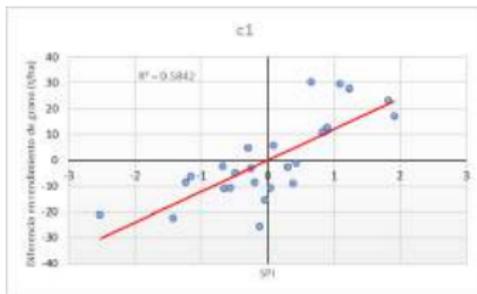


Promedios de temperatura para los meses de siembra en Azuero.

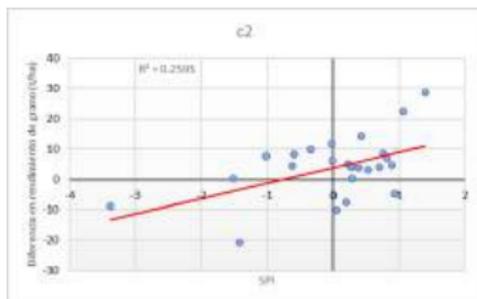




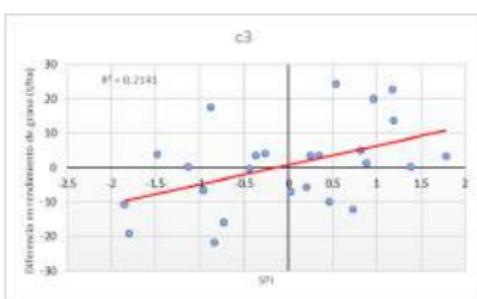
(a) C0



(b) C1



(c) C2



(d) C3

**Figura:** Relación entre el índice SPI-5 del mes de diciembre con la diferencia del rendimiento de cada año de la media por esquemas del escenario RCP 8.5, en la Península de Azuero para los años 2075-2099.

## Construcción y adecuación de un modelo de regresión de rendimiento de cultivo de maíz

Etapas	I	II	III	IV
Fechas(dds)	0-30	31-50	51-80	81-100

**Cuadro:** Gordón (2018), etapas del cultivo del maíz en la Península de Azuero.

## Modelo de regresión

$$\mathbf{Rend = 0,028ppt_3 - 2,078tpr_3 + 0,045ppt_4 + 2,109tpr_4} \quad (1)$$

*Rend* = Rendimiento de grano en *t/ha*.

*ppt*<sub>3</sub> = Precipitación pluvial acumulada III etapa.

*tpr*<sub>3</sub> = Temperatura promedio entre III etapa.

*ppt*<sub>4</sub> = Precipitación pluvial acumulada IV etapa.

*tpr*<sub>4</sub> = Temperatura promedio IV etapa.

## Rendimiento Histórico del Periodo 1990-2003 vs Predecido (Presente)



El Modelo de regresión con datos predecidos dió valores 10 veces mas grandes que los datos observados, esto se corrigió utilizando Corrección de Sesgos.

## Corrección de sesgo simple

Corrección de sesgo para los datos de clima presentes (SPA), 1991-2003, utilizando rendimiento calculado.

$$\text{Corrección} = \text{Rendimiento proyectado} * \left( \frac{\text{Rendimiento Histórico}}{\text{Rendimiento proyectado}} \right)$$



**Figura:** Corrección de sesgo simple para el rendimiento proyectado, clima presente, en la región de Azuero.

## Conclusiones

- Todos los escenarios proyectan temperaturas por encima de la temperatura promedio (ETESA), pero se mantienen entre la temperatura media para la Península de Azuero.
- No existen diferencias significativas entre las medias de las localidades norte-sur para las variables precipitación y temperatura.
- El desarrollo de los GCM implica mayor complejidad debido a la simulación de procesos de la interacción atmósfera-océano, errores e incertidumbres por las diferentes resoluciones del modelo u otras.
- Los GCM tienden a sobrestimar los datos simulados, entonces es necesario hacer una corrección estadística de sesgos.

Exploración de las bases matemáticas de los  
modelos climáticos y sus métodos de resolución.

## Objetivo General

Explorar las bases matemáticas de los modelos climáticos y sus métodos de resolución.

## Objetivos Específicos

- Estudiar las bases matemáticas del modelado climático.
- Analizar las bases de los métodos de solución numérica de modelos climáticos.
- Conocer los alcances y limitaciones del proceso de modelación matemática.

## Objetivo General

Explorar las bases matemáticas de los modelos climáticos y sus métodos de resolución.

## Objetivos Específicos

- Estudiar las bases matemáticas del modelado climático.
- Analizar las bases de los métodos de solución numérica de modelos climáticos.
- Conocer los alcances y limitaciones del proceso de modelación matemática.

## Materiales y métodos

Entre los materiales estuvieron ponencias en formato PowerPoint, artículos de investigaciones recientes, libros de consulta e investigación y revistas. Implementación del uso de softwares libres como: Times Series Analysis (TiSeAn versión 3.0), Visual Recurrence Analysis (VRA versión 4.9) y RClimDex (3.0) y EasyFit 5.6 Standard Además, el uso de bases de datos en formato archivo.ctl, archivo.csv y archivo.xcl

# Metodología

- Revisión de literatura sobre modelado climático.
- Estudio de las bases matemáticas del modelado climático (enfoque no lineal).
- Discusión sobre los modelos climáticos de interés de estudio en el CCA.



## **“EL NIÑO CONTRA LOS HURACANES”**

**TOMÁS MORALES ACOLTZI**

Modelación Matemática de Procesos Atmosféricos  
Centro de Ciencias de la Atmósfera, **UNAM**

ACADEMIA MEXICANA DE CIENCIAS

Ciclo  
SÁBADOS EN LA CIENCIA EN LA VASCOCELLOS

**Biblioteca Vasconcelos**

**CDMX**, a 25 de mayo 2019

# Metodología

- Estudio de métodos de solución numérica de modelos climáticos.
- Análisis de la dependencia de la complejidad y no linealidad de la escala usada en modelos climáticos.
- Revisión de ventajas y desventajas de los métodos de solución.
- Consideración de un análisis con los datos del modelo global MRI-AGCM 3.2 para Panamá y su aplicación a la producción futura de maíz.
- Interpretación de los datos obtenidos por modelo global MRI-AGCM 3.2 para Panamá y su aplicación a la producción futura de maíz.

# Productos

## Caracterización del Comportamiento Dinámico de Variables Meteorológicas en Los Santos, Panamá

**Autores:** <sup>1</sup>Marlemys Martínez, <sup>2</sup>Tomás Morales-Acoltzi, <sup>3</sup>Javier E. Sánchez-Galán

<sup>1</sup>Maestría Científica en Ingeniería Matemática, UTP, [marlemys.martinez@utp.ac.pa](mailto:marlemys.martinez@utp.ac.pa) <sup>2</sup>Modelación Matemática de Procesos Atmosféricos, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Licenciatura en Ciencias Ambientales, Campus Tlaxco, Facultad de Agrobiología, UATx, con Fundamento artículos 57 inciso B y 61 del Estatuto del Personal Académico de la UNAM, [acoltzi@atmosfera.unam.mx](mailto:acoltzi@atmosfera.unam.mx) <sup>3</sup>Grupo de Investigaciones en Biotecnología, Bioinformática y Biología Sintética (GIBBS), CEPIA, UTP, [javier.sanchezgalan@utp.ac.pa](mailto:javier.sanchezgalan@utp.ac.pa)

# Productos

## **Análisis dinámico del tiempo-clima en Los Santos, Panamá: periodo de referencia 1961-1990, periodo actual 1991-2015 y periodo futuro 2075-2099 (MRI-AGCM 3)**

**Autores:** <sup>1</sup>Marlemys Martínez, <sup>2</sup>Tomás Morales-Acoltzi, <sup>3</sup>Javier Sánchez-Galán, <sup>4</sup>Shoji Kusunoki, <sup>4</sup>Toshiyuki Nakaegawa, <sup>5</sup>Román Gordon, <sup>6</sup>Reinhardt Pinzón, <sup>7</sup>Mercedes Nería Castillo

<sup>2</sup>Maestría Científica en Ingeniería Matemática, **UTP**, [marlemys.martinez@utp.ac.pa](mailto:marlemys.martinez@utp.ac.pa) <sup>3</sup>Modelación Matemática de Procesos Atmosféricos, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Licenciatura en Ciencias Ambientales, Campus Tlaxco, Facultad de Agrobiología, **UATx**, [acoltzi@atmosfera.unam.mx](mailto:acoltzi@atmosfera.unam.mx) <sup>4</sup>**UTP**, Grupo de Investigaciones en Biotecnología, Bioinformática y Biología Sintética (**GIBBS**), **CEPIA**, **INDICASAT-AIP**, [javier.sanchezgalan@utp.ac.pa](mailto:javier.sanchezgalan@utp.ac.pa) <sup>5</sup>Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Japón, [tnakaega@mri-jma.go.jp](mailto:tnakaega@mri-jma.go.jp), [skusunok@mri-jma.go.jp](mailto:skusunok@mri-jma.go.jp) <sup>6</sup>Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá, Los Santos, [gordon.roman@gmail.com](mailto:gordon.roman@gmail.com) <sup>7</sup>Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, **UTP**, [reinhardt.pinzon@utp.ac.pa](mailto:reinhardt.pinzon@utp.ac.pa) <sup>7</sup>UATx, [meneri\\_20@hotmail.com](mailto:meneri_20@hotmail.com)

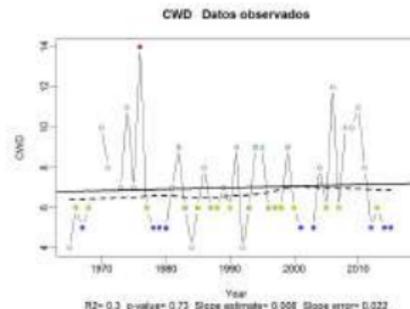
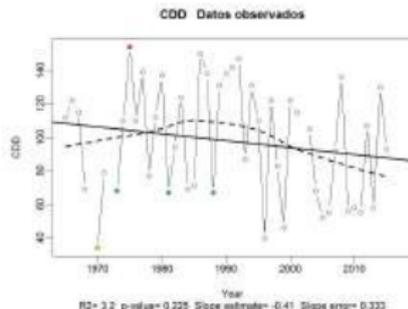
# Productos

## Identificación de Dinámica Compleja en Series de Tiempo Registradas en la Sierra Madre Oriental: *Zacatlán, Puebla y El Capulín, Terrenate, Tlaxcala, México.*

<sup>1</sup>Marlemys Martínez, <sup>2</sup>Tomás Morales-Acoltzi, <sup>3</sup>Yuri N. Skiba, <sup>4</sup>Javier Sánchez-Galán, <sup>4</sup>Rogelio Bernal-Morales, <sup>4</sup>Silvia Herrera-Cortés, <sup>4</sup>Silvia Chamizo Checa

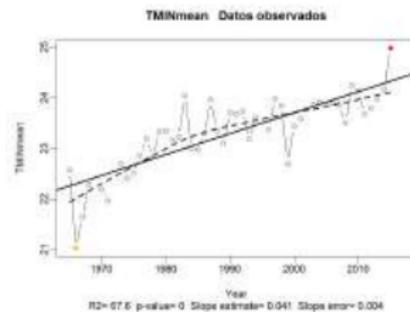
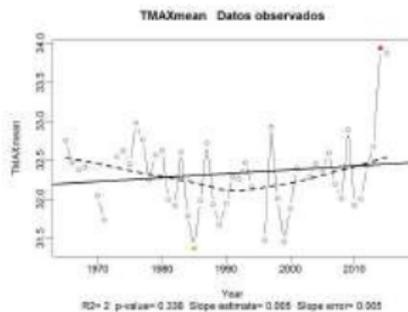
<sup>1</sup>Maestría Científica en Ingeniería Matemática, **UTP**, [marlemys.martinez@utp.ac.pa](mailto:marlemys.martinez@utp.ac.pa) <sup>2</sup>Modelación Matemática de Procesos Atmosféricos, Centro de Ciencias de la Atmósfera, **UNAM**, Licenciatura en Ciencias Ambientales, Campus Tlaxco, Facultad de Agrobiología, **UATx**, [acoltzi@atmosfera.unam.mx](mailto:acoltzi@atmosfera.unam.mx), [skiba@unam.mx](mailto:skiba@unam.mx), <sup>3</sup>**UTP**, Grupo de Investigaciones en Biotecnología, Bioinformática y Biología Sintética (**GIBBS**), **CEPIA**, **INDICASAT-AIP**, [javier.sanchezgalan@utp.ac.pa](mailto:javier.sanchezgalan@utp.ac.pa) <sup>4</sup>**UATx**, [rbernal07@hotmail.com](mailto:rbernal07@hotmail.com), [silvia\\_mat83@yahoo.com.mx](mailto:silvia_mat83@yahoo.com.mx), <sup>4</sup>**UATx**, [silchami@hotmail.com](mailto:silchami@hotmail.com)

# Análisis de índices climáticos



Índices climáticos a partir de datos observados en la estación meteorológica de Los Santos durante los años 1965-2017.

# Análisis de índices climáticos





# Caracterización del Comportamiento Dinámico de Variables Meteorológicas en Los Santos, Panamá.

# Introducción

Una Serie de Tiempo es una secuencia de observaciones de la dinámica de un proceso en meteorología, climatología, entre otras y la interacción de las variables relevantes a lo largo del tiempo.

Un sistema dinámico es un modelo matemático que consiste en una ecuación que describe cómo evoluciona el sistema con el paso del tiempo.

## Objetivo

Identificar un comportamiento caótico determinístico o en su defecto aleatorio en variables meteorológicas.

En las contribuciones de este estudio están: 1) comparar el comportamiento de las ST por cinco años, del periodo de referencia con el actual, 2) explicar la variabilidad interanual, incluyendo el estado del océano.

## Metodología: zona de estudio



**Figura:** estación meteorológica N° 128-001, ubicada en el corregimiento de Los Santos, provincia de Los Santos. Las coordenadas globales del área de las mediciones son de longitud  $7^{\circ}56'27''$  y latitud  $80^{\circ}25'03''$ .

## Descripción y análisis caótico

Las ST de los datos seleccionados fueron analizadas en detalle con el software VRA para conocer su dinámica básica, representada por los invariantes como tiempo de retraso  $\tau$  y dimensión de correlación  $D$ .

Aplicando el VRA, se utilizaron tres de sus funciones:

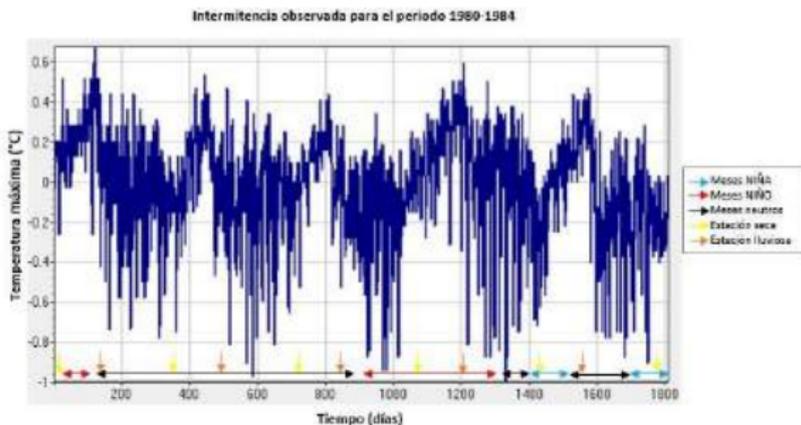
- Información mutua
- Dimensión de correlación
- Gráfica del espacio de fase

# Resultados

Periodo	Variable	$r$	D	Existe Límite a la predictibilidad	Redondeo de la dimensión de correlación - Número ecuaciones para modelar	Embedding M
1980-1984	Tmáx	8	7.73	Sí	8	$m=17, m_1=16+1$
	Tmín	4	No Saturado	No	-	-
	Rv	8	No Saturado	No	-	$m=20, m_1=22+1$
	BS	3	No Saturado	No	-	-
2010-2014	Tmáx	4	7.13	Sí	8	$m=17, m_1=16+1$
	Tmín	4	No Saturado	No	-	-
	Rv	5	No Saturado	No	-	-
	BS	4	No Saturado	No	-	-

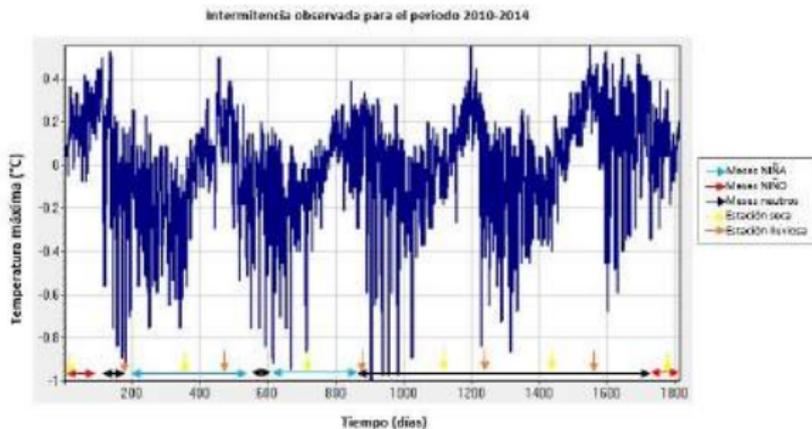
Figura: Análisis no lineal con VRA.

# Resultados



**Figura:** Comportamiento caótico para la variable temperatura máxima para el periodo 1980-1984.

# Resultados



**Figura:** Comportamiento caótico para la variable temperatura máxima para el periodo 2010-2014.

## Conclusión

Las variables meteorológicas son importantes para el estudio del clima y contaminación atmosférica, entre otros. El análisis de ST con métodos no lineales permite comprender la dinámica de los procesos de un sistema. Se logró identificar un comportamiento dinámico del tipo caótico determinístico en las temperaturas extremas, y aleatorio en el caso de la rapidez del viento a 2m y brillo solar.

# Colaboradores del proyecto



**Estudiante:** Marlemys Martínez  
(Maestría en Ingeniería Matemática)



**Dr. Reinhardt Pinzón**



**MSc. Román Gordon**



**Dr. Shoji Kusunoki**  
**Dr. Tosiya Nakaegawa**



**Asesor:** Dr. Javier Sánchez-Galán