

Sistema multiagente para la predicción de clima para usos agrícolas

Multi-agent system for weather forecasting for agricultural purposes

Ricardo Fuentes Covarrubias^{1*}, Andrés Gerardo Fuentes Covarrubias²,
Adalberto Iriarte Solís³, María Palmira González Villegas⁴, Liliana Zamora Cárdena⁵, Albert Alejandro González Ochoa⁶
^{1, 2, 5, 6} Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México

^{3, 4} Universidad Autónoma de Nayarit.

¹ fuentesr@ucol.mx, ² fuentesg@ucol.mx, ⁵ zamora_liliana@ucol.mx, ⁶ agonzalez57@ucol.mx, ³ Adalberto.iriarte@uan.edu.mx
⁴ Palmira.gonzalez@uan.edu

Resumen– La predicción exacta del tiempo es importante para el éxito del sector agrícola. Se presenta un modelo informático en el que el usuario puede obtener pronósticos basados en datos reales introduciendo simplemente el día y el mes a través de una interfaz gráfica. Los resultados son claros y fáciles de visualizar.

Palabras claves– Multiagente, pronóstico del clima, sistema experto.

Abstract– Accurate weather forecasting is important for the success of the agricultural sector. A computer model is presented in which the user can obtain forecasts based on actual data simply by entering the day and month through a graphic interface. The results are clear and easy to visualize.

Keywords– Multi agent, weather forecast, expert system.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 1 de agosto de 2016

Fecha de Aceptación: 12 de abril de 2017

1. Introducción

En nuestros días los avances tecnológicos e investigaciones han hecho que, en este caso en particular sepamos más acerca del clima, tanto que ahora podemos pronosticar que sucederá en un día determinado, mediante registros de años pasados y saber el comportamiento del clima en fechas específicas.

A pesar de esto, existe un problema, no puede haber un experto humano en cada parte del mundo, por lo cual este sistema es creado para remediar este hecho; ya que evaluaciones realizadas a nuestro sistema han demostrado que cubre las necesidades suficientes para lo que fue creado, facilitando así, el acceso a tal información sin requerir de un climatólogo.

Hoy en día el saber qué clima habrá en el futuro es muy importante para desarrollar nuestras actividades habituales, ya que nos permitirá dependiendo del clima, qué cosas podemos hacer y saber cómo reaccionar a tal situación.

La agricultura es el recurso más importante con el que cuenta el hombre, es una de las actividades humanas que más dependen del clima, los agricultores tienen que tomar un número de decisiones cruciales en el manejo del agua y tierra durante cada estación, las cuales están basadas en las condiciones climáticas y, algunas veces, estas decisiones deben ser tomadas varias semanas por adelantado. Desde esta perspectiva, hay opiniones bien informadas, por ejemplo, Alexander Mueller, Director General Adjunto para Recursos Naturales de la FAO advierte, “El coste económico asociado a los desastres naturales, incluyendo los fenómenos climáticos extremos, se ha multiplicado por 14 en la agricultura desde la década de 1950” [1].

Por lo tanto, trabajar en la información y predicción meteorológica y climática es de vital importancia para los más de 2,500 millones de personas que basan su medio de vida en la agricultura y sus actividades asociadas.

El presente trabajo describe el desarrollo de un sistema multiagente enfocado al pronóstico del clima para apoyar al sector agrícola utilizando técnicas de inteligencia artificial que ayuden en la toma de decisiones preventivas con el propósito de responder a los cambios climáticos de la actualidad.

2. Estado del arte

Recopilar observaciones del tiempo, explicar el comportamiento de la atmósfera y pronosticar el viento y la lluvia son prácticas muy antiguas. Así, hasta el siglo XX, las personas interesadas de forma científica en el tiempo atmosférico realizaban tres actividades: una actividad empírica consistente en recopilar datos de observaciones y a partir de ellos intentar inferir algo, una actividad teórica dedicada a explicar los fenómenos atmosféricos basándose en leyes generales, y una actividad práctica de predicción del tiempo. Naturalmente, estas actividades siempre han estado relacionadas entre sí y el término meteorología se ha utilizado para las tres prácticas mencionadas [2].

Desde la predicción meteorológica hasta la investigación sobre la contaminación del aire, pasando por el cambio climático, los estudios del agotamiento de la capa de ozono y la predicción de las tormentas tropicales, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) coordina la actividad científica mundial para que la información meteorológica, y otros servicios lleguen con rapidez y precisión cada vez mayores al público, al usuario privado y comercial, a la navegación aérea y marítima internacional. Dichas actividades de la OMM contribuyen a la seguridad de vidas y bienes, al desarrollo socioeconómico de las naciones y a la protección del medio ambiente [3].

Para emitir predicciones climáticas es necesario obtener datos de todo el mundo. Si no hubiera OMM, las naciones del mundo tendrían que concertar acuerdos entre sí para asegurar el intercambio y disponibilidad de datos con objeto de atender a sus necesidades nacionales, por ejemplo, las predicciones y servicios especiales destinados a distintos sectores económicos como la agricultura siguen una norma internacional para todos los países afiliados a la ONU, en este caso, el Programa de Meteorología Agrícola, es un esfuerzo de la OMM para estandarizar buenas prácticas de producción agrícolas con desarrollo sustentable [4].

La información que los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN) recopilan, administran y analizan, bajo los auspicios de la OMM y en colaboración con otras organizaciones y programas regionales e internacionales, ayuda a todas las comunidades a hacer frente a las condiciones climáticas presentes y futuras.

La predicción e identificación de tendencias sobre el cambio climático son problemas que han sido atendidas por los profesionales del ramo; por otro lado, las tecnologías de la información juegan un papel importante para la automatización del proceso de recuperación y análisis de datos para propósitos de modelaje.

Otros sistemas similares se centran en el monitoreo de índices agroclimáticos con el fin de registrar y predecir los índices de humedad en cierta época del año como lo describe Bautista en [5]. En estos casos de estudio, las series de tiempo y el comportamiento de los índices climáticos son de gran importancia, ya que, si bien el clima en apariencia tiene un comportamiento aleatorio, las series de tiempo con bases de datos de hasta 50 o 100 años dicen lo contrario, su análisis por medio de herramientas *software* permite el modelado de tendencias, así lo describen Cohen y Ojeda en [6].

Por lo anterior, no es de extrañar el uso de las técnicas de inteligencia artificial, tal como los sistemas expertos, en áreas como la agrometeorología, en cuyo caso el uso de índices climáticos en bases de datos para posterior análisis y modelado, son la base de los procesos de predicción y creación de series de tiempo, lo describe Amador en [7].

Otro enfoque de la predicción está basado en los análogos climáticos [8], esta técnica permite comparar entre proyecciones de climas futuros en lugares específicos y condiciones similares ya existentes con otros lugares en el mismo o en otro continente. El Centro Internacional de Agricultura Tropical ha desarrollado una herramienta *software* llamada "Herramienta de climas análogos" con el fin de efectuar predicciones con base a esta técnica.

3. Importancia del pronóstico en el sector agrícola

Los productos de pronóstico de largo rango proveen información útil a los gobiernos y otros usuarios en la planificación de sus actividades agrícolas en una

estación dada. La información oportuna sobre la pluviosidad esperada para la próxima estación ayuda a los agricultores de cultivos a decidir el tipo de semilla que plantar, en cuáles áreas y en qué tiempo de la estación [9].

Un pronóstico efectivo para granjeros apoyará la toma de decisiones que en última instancia mejorará el rendimiento a largo plazo de la empresa agrícola.

La agricultura y sus industrias asociadas son las fuentes primarias de comida y el mayor sector de empleo en la mayoría de los países en desarrollo [10].

La producción agrícola es muy dependiente del tiempo, clima y la disponibilidad del agua, y es afectada negativamente por desastres relacionados con el tiempo y el clima. Por ejemplo, en muchos países en desarrollo donde la norma es la agricultura de temporal regada por lluvia, una buena estación lluviosa conlleva a una buena producción de los cultivos, una mejor seguridad alimenticia y una economía saludable [11]. Una falla en la presencia de lluvias y/o la ocurrencia de desastres naturales tales como inundaciones y sequías pueden llevar a un fracaso en las cosechas, inseguridad alimenticia, y un crecimiento económico nacional negativa [12].

La predicción de clima brinda alta prioridad para generar conocimientos más precisos acerca de los impactos del cambio climático, identificando a su vez las opciones de adaptación que se pueden poner al alcance de la población rural de escasos recursos. El CIAT es el centro líder del Programa de Investigación de CGIAR sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS, por sus siglas en inglés) [13].

4. Predicción del clima

El clima es el conjunto de los valores promedio de las condiciones atmosféricas que caracterizan una región. Estos valores promedio se obtienen con recopilación de la información meteorológica durante un período suficientemente largo. Según se refiera al mundo, a una zona o región, o a una localidad concreta se habla de clima global, zonal, regional o local (microclima), respectivamente [14].

El clima es un sistema complejo por lo que su comportamiento es muy difícil de predecir. Por una parte, hay tendencias a largo plazo debidas, normalmente; a variaciones sistemáticas como el

aumento de la radiación solar o las variaciones orbitales, pero, por otra existen fluctuaciones caóticas debidas a la interacción entre forzamientos, retroalimentaciones y moderadores.

El clima global requiere por lo tanto el estudio de otro tipo de variables llamados forzamientos externos. Para conocer cómo evoluciona el clima, hay que tener en cuenta la influencia de esos aspectos capaces de alterarlo drásticamente.

La disponibilidad de datos completos sobre el estado del clima, permitirá el proceso e interpretación de los datos para poder así generar predicciones relevantes y garantizar la información de manera oportuna [15].

4.1 Parámetros climáticos

Para el estudio del clima local es necesario analizar los siguientes parámetros climáticos: la temperatura, la humedad, la presión, los vientos y las precipitaciones. De ellos, las temperaturas medias mensuales y los montos pluviométricos mensuales son los datos más importantes que normalmente aparecen en los gráficos climáticos.

Hay una serie de factores que pueden influir sobre estos elementos, como lo son:

- **Latitud geográfica:** La latitud determina el grado de inclinación de los rayos del Sol y la diferencia de la duración del día y la noche. Cuanto más directamente incide la radiación solar, más calor aporta a la Tierra.
- **Altitud:** La altitud de una región determina la delimitación de los pisos térmicos respectivos. A mayor altitud con respecto al nivel del mar, menor temperatura.
- **Orientación del relieve:** el relieve es un modificante del clima se debe tener presente no solo la altura sino también su orientación con respecto a los rayos solares y a la dirección de los vientos. Las laderas de las montañas que reciben mayor insolación se llaman solana y las que reciben menos el sol se llaman de umbría.
- **Vientos predominantes:** los vientos dominantes (los vientos planetarios) también determinan la existencia de dos tipos de vertientes: de barlovento y de sotavento. Lluvia mucho más en las vertientes de barlovento porque el relieve da origen a las lluvias orográficas, al forzar al ascenso de las masas de aire húmedo.

- Corrientes oceánicas: Las corrientes marinas o, con mayor propiedad, las corrientes oceánicas, se encargan de trasladar una enorme cantidad de energía en el sentido de los meridianos y explican en algunos casos, las anomalías climáticas más importantes del hemisferio Norte. Las corrientes frías también ejercen una poderosa influencia sobre el clima
- Continentalidad: La proximidad del mar modera las temperaturas extremas y suele proporcionar más humedad en los casos en que los vientos procedan del mar hacia el continente. Las brisas marinas atenúan el calor durante el día y las terrestres limitan la irradiación nocturna

4.2 Clasificación climática clásica

Describe los climas del mundo en función de su régimen de temperaturas y de precipitaciones:

- Clima árido: precipitaciones escasas. Se produce gracias a las cadenas montañosas y a las corrientes marinas, estas últimas condensan la humedad y evitan la precipitación.
- Clima intertropical: las temperaturas fluctúan poco durante el año.
- Clima mediterráneo: caracterizado por veranos cálidos y secos, e inviernos húmedos y templados.
- Clima alpino: frío a causa de la altitud.
- Clima continental: característico de las regiones interiores. La variación de temperaturas entre estaciones puede ser muy grande.
- Clima oceánico: característico de las regiones de temperaturas templadas cercanas al mar. Precipitaciones a lo largo de todo el año y temperaturas que no varían mucho a lo largo del año.
- Clima polar: temperaturas generalmente bajo 0°C, escasas precipitaciones.

5. Sistemas expertos

Son llamados así por que emulan el comportamiento de un experto en un conocimiento en concreto y en ocasiones son usados por ellos. Con los sistemas expertos se busca una mejor calidad y rapidez en las respuestas dando así lugar a una mejora de la productividad del experto.

Un sistema experto es una rama de la Inteligencia Artificial y es aquel que imita las actividades de un humano para resolver problemas de distinta índole.

También se dice que un sistema experto se basa en el conocimiento declarativo (hechos sobre objetos, situaciones) y el conocimiento de control (información sobre el seguimiento de una acción).

A continuación, la figura 1 representa de manera gráfica el funcionamiento de nuestro sistema las principales ideas de cómo se interactúa un usuario con nuestro sistema experto.



Figura 1. Interacción del usuario con el sistema experto.

Para que un sistema experto sea una herramienta efectiva, los usuarios deben de interactuar de una forma fácil, reuniendo dos capacidades para poder cumplirlo [16].

Base del conocimiento: se deben realizar siguiendo ciertas reglas o pasos comprensibles de manera que se pueda generar la explicación para cada una de estas reglas, que a la vez se basan en hechos.

Adquisición de nuevos conocimientos: son mecanismos de razonamiento que sirven para modificar los conocimientos anteriores.

Con base en lo anterior se puede decir que los sistemas expertos son el producto de investigaciones en el campo de la inteligencia artificial ya que esta no intenta sustituir a los expertos humanos, sino que persigue ayudarlos a realizar con más rapidez y eficacia todas sus tareas con menor dificultad. Es por eso que en la actualidad juega un papel preponderante los sistemas expertos.

Un sistema experto está conformado por:

- Base del conocimiento (BC): Contiene conocimiento modelado extraído del diálogo con el experto.
- Base de hechos: contiene los hechos sobre un problema que se ha descubierto durante el análisis.
- Motor de inferencia: Modela el proceso de razonamiento humano.

- Módulos de justificación: Explica el razonamiento utilizado por el sistema para llegar a una conclusión.
- Interfaz de usuario: es la interacción entre el SE y el usuario, y se realiza mediante el lenguaje natural.

Principalmente existen tres tipos de sistemas expertos:

- Basados en reglas: Aplicando reglas heurísticas apoyadas generalmente en lógica difusa para su evaluación y aplicación.
- Basados en casos o CBR (*Case Based Reasoning*): Aplicando el razonamiento basado en casos, donde la solución a un problema similar planteado con anterioridad se adapta al nuevo problema.
- Basados en redes bayesianas: Aplicando redes bayesianas, basadas en estadística y el teorema de Bayes.

6. Agentes inteligentes

Un agente es todo aquello que puede considerarse que percibe su ambiente mediante sensores y que responde y actúa en tal ambiente por medio de efectores [17].

Los elementos que conforman un agente inteligente son: su arquitectura, la cual delimita su actuación y un programa de computadora el cual le dará al agente la capacidad de interactuar con el medio ambiente para llevar a cabo las acciones que determinarán su desempeño.

En lo que respecta al *software* utilizado por el agente, invariablemente deberá tener integrada una base de conocimiento que contenga la secuencia de actividades para llevar a cabo las distintas acciones motivadas por cada una de las percepciones recibidas del medio ambiente; esto indica claramente la necesidad de dotar al agente de un nivel de autonomía derivada del uso de sus percepciones para “monitorear” constantemente al medio ambiente y comparar las condiciones imperantes con las condiciones almacenadas en su base de conocimiento y hacer los ajustes correspondientes, es decir se puede hablar de adquirir experiencias en la misma forma en la que lo hace un ser humano.

7. Desarrollos y resultados

El sistema para que pueda funcionar de una manera confiable, debe tener una base de conocimiento muy amplia y datos que sean útiles de los meses y años anteriores.

La base de conocimiento y la base de datos está avalada por datos certificados del Sistema Nacional de Meteorología (<http://smn.cna.gob.mx>) [14] y datos que nos proporcionó el Centro Universitario de Ciencias del Ambiente (CUICA) de la Universidad de Colima, México para extender y detallar la información.

Mediante toda esta información recabada podemos hacer un pronóstico más acertado, gracias a que tenemos diferentes fuentes de información con el cual podemos hacer comparaciones de las diferentes tablas de datos sobre el clima.

En la tabla 1, se muestran los diferentes datos que nos proporcionó nuestro experto humano. Es sobre la temperatura máxima de las principales ciudades del país (Período 1980-2004). Solo se capturaron los datos que son importantes para la base de datos, en este caso el estado de Colima, México.

Tabla 1. La temperatura máxima (Período 1980-2004)

	Temperatura máxima promedio estatal												
	Período 1980-2004												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Aguascalientes	21.5	23.2	26.5	20.4	30	29.2	26.9	26.3	25.9	25.6	24.3	22.4	25.9
Baja California	19.7	21	22.1	24.6	27	31.1	33.9	33.9	31.9	28.1	23.3	20.2	25.4
Baja California Sur	23.8	25	26.5	28.6	20.8	32.4	34.6	34.8	34	31.6	27.8	24.7	29.5
Campeche	29.6	30.9	33.3	25.1	35.9	34.3	33.6	33.6	33	31.9	30.9	29.9	32.8
Coahuila	19.5	21.8	26	29.5	32.4	34.2	34.1	33.7	31.6	26.3	24.1	19.9	27.9
Colima	31.3	31.9	32.4	33.3	33.9	33.5	32.9	32.6	32.1	32.4	32.3	31.4	32.5
Chiapas	27.9	28.9	31.3	32.4	32.9	31.1	30.5	38.6	30.1	29.3	28.6	27.9	30.1
Chihuahua	17.3	10.5	22.8	26.4	30.1	33.2	31.7	30.4	20.6	25.9	21.4	10.1	25.4
Distrito Federal	20.3	21.5	24	24.8	24.8	23.1	21.7	21.8	21.3	21.4	20.8	20.1	22.1
Durango	21.1	22	26.4	20.2	30.6	31.4	20.2	20.6	27.6	26.6	24.2	21.6	26.4
Guanajuato	22.4	24	26.7	28.9	30	28.1	25.1	25.1	25.4	24.9	24.2	22.8	25.8
Guerrero	30.6	31.5	32.8	33.9	34	32	30.8	30.7	30.2	30.7	30.9	30.6	31.6
Hidalgo	21.3	22.9	26.1	27.7	29.1	26.3	25.1	25.3	24.5	23.6	22.8	21.7	24.6
Jalisco	26.1	27.5	29.7	31.7	32.8	31.3	28.8	28.8	28.5	28.6	27.6	26.3	29
Estado de México	20.9	22	24.1	25.5	26.5	22.5	22.1	22.3	21.9	22.1	21.9	21.1	22.7
Michoacán	27.7	26.9	30.9	32.6	33	30.0	29.0	26.7	26.4	26.0	26.7	27.9	29.6
Morelos	26.6	20.1	30.4	31.9	31.7	20.2	27.3	27.4	26.9	27.1	27.2	26.7	20.4
Nayarit	28.2	29.4	31	32.8	34	33.8	32.2	31.9	31.7	31.8	30.9	28.5	31.4
Nuevo León	20.4	22.7	26.6	20.5	31.9	33	33.5	33.3	30.9	27.9	24.3	21.1	27.9
Oaxaca	27.2	28	30	31.3	31.4	29.5	26.7	26.7	26.2	26.1	27.7	27.2	26.8
Puebla	23.5	24.9	27.3	28.8	29.1	27.3	26	26.3	25.6	25.5	24.7	23.7	26.1
Queretaro	23	24.6	27.7	29.6	30.3	28.4	26.8	27	26.1	25.4	24.4	23.4	26.1
Quintana Roo	29.2	29.8	31.5	32.7	33.7	33.1	33.1	33.1	32.6	31.7	30.5	29.3	31.7
San Luis Potosí	22.1	24.2	27.5	29.9	31.1	30.3	29.9	29.1	27.9	26.5	24.9	22.9	27.1
Sinaloa	27.2	28.8	30.2	32.4	34.3	35.4	34.7	34	33.6	33.4	30.7	28.1	31.9
Sonora	21.7	23.6	25.4	29.1	32.9	36.9	36.6	35.9	34.9	31.2	25.9	21.9	29.7
Tabasco	27.6	28.9	32.1	34.1	35.5	34	33.5	33.6	32.8	31.1	29.7	28.1	31.6
Tamaulipas	21.9	24.5	20.4	31.4	32.9	34	34.2	34.4	32.4	20.6	26.3	23.2	20.4
Tlaxcala	20.6	31.9	24	24.9	24.8	23.2	22.1	22.2	21.8	22.1	21.8	21.1	22.5
Veracruz	24.5	25.7	20	31.3	32.9	31.9	30.7	30.6	30.2	20.7	26.9	25.1	29
Yucatán	27.7	30.6	32.9	34.7	35.5	34.4	33.9	34	33.3	32.1	31	30	32.7
Zacatecas	21	23	25.7	26.2	30.3	29.9	27.7	27.3	26.4	25.7	24.1	21.7	25.9
Nacional	23.1	24.7	27.3	29.8	31.8	32.4	31.7	31.3	30.2	28.5	25.9	23.6	28.3

En la tabla 2, se muestran los diferentes datos que obtuvimos de nuestro experto humano. Esta gráfica es sobre la temperatura media de las principales ciudades del país (período 1980-2004); solo se capturaron los datos que son importantes para la base de datos, en este caso el estado de Colima.

Asimismo, en la tabla 3, se muestran los diferentes datos que obtuvimos de nuestro experto humano. En ella se muestra la temperatura mínima de las principales

ciudades del país (período 1980-2004); Solo se capturaron los datos que son importantes para la base de datos, en este caso el estado de Colima, México.

Tabla 2. La temperatura media (Período 1980-2004)

Temperatura media promedio estatal												
Período 1980-2004												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Aguascalientes	12.4	13.6	16.3	19.6	20.7	21.2	19.9	19.6	19.9	17.5	15.1	13.3
Baja California	12.3	13.5	14.5	16.5	18.8	22.4	25.7	26	23.9	19.9	15.5	12.8
Baja California Sur	16.2	17	19.2	20.1	21.4	24.1	27	27.5	26.8	23.8	20	17.1
Campeche	22.7	23.5	25.5	27.4	29.4	27.7	27.1	27.1	29.8	25.8	24.2	23.2
Coahuila	11.6	13.5	17.1	20.7	24.1	26.2	20.5	26.3	24.2	20.5	15.8	12.2
Colima	23	23.2	23.6	24.7	26.2	27.2	26.9	28.7	26.4	26.2	25.2	23.9
Chiapas	21.6	22.3	24.2	25.5	26.3	25.5	25	25	24.8	24.1	23	21.9
Chihuahua	9.4	10.1	13	16.7	20.4	24.1	24.1	23.1	21.1	17	12.1	9
Distrito Federal	12.4	13.5	15.8	17	17.5	16.9	15.9	16	15.8	15.1	13.7	17.7
Durango	12	13.2	15.4	19.3	20.9	22.9	22	21.5	20.6	19.2	14.9	12.6
Guanajuato	13.9	15.1	17.5	19.8	21.3	20.8	19.6	19.5	18.9	17.5	15.9	14.5
Guerrero	23.1	23.8	25	26.3	27	26.1	25.2	25.1	24.8	24.8	24.2	23.4
Hidalgo	13.6	14.7	17.6	19.5	20.5	19.8	19	19.1	19.5	17.1	15.5	14.4
Jalisco	17.1	18	19.8	21.9	23.6	23.9	22.7	22.6	22.3	21.4	19.4	17.8
Estado de México	12.4	13.3	15.1	16.9	17.5	16.9	16.1	16.1	15.8	15.1	13.8	12.9
Michoacán	19.4	20.2	21.6	23.6	24.8	24.3	23	22.9	22.6	22.3	21.1	19.9
Morelos	19.2	19.4	21.4	23.3	23.8	22.7	21.3	21.3	21	20.4	19.5	19.5
Nayarit	20.4	20.8	22	23.8	25.5	27.1	20.4	20.3	20.2	25.5	23.4	21.1
Nuevo León	13	15	19.5	21.6	24.4	25	26.3	26.1	24.2	21	17.1	13.9
Oaxaca	20.2	20.8	22.5	24	24.5	23.7	23.1	23	22.8	22.3	21.4	20.5
Puebla	15.4	16.5	19.8	20.5	21.4	20.6	19.6	19.4	19.5	17.1	15.9	
Querétaro	14.7	15.9	18.5	20.9	22.1	21.2	20.3	20.3	19.5	18.3	16.7	15.4
Quintana Roo	23.2	23.5	25	26.4	27.5	27.6	27.4	27.4	27.1	26.2	24.6	23.6
San Luis Potosí	14.4	15.8	19.6	21.1	22.9	23	22.1	22.1	21.3	19.4	17.1	15.2
Sinaloa	16.9	19.8	20.9	22.9	25.2	28.1	28.5	29	27.8	26.1	22.5	19.9
Sonora	13.3	14.7	16.3	19.4	23	17.5	29.2	29.7	27.1	22.5	17	13.5
Tabasco	23	23.5	26.1	27.9	29.2	28.4	28	28	27.7	26.5	25	23.3
Tamaulipas	15.4	17.5	21.2	24.4	26.6	27.8	27.9	29	26.4	29.5	20	19.9
Tlaxcala	11.3	12.4	14.3	15.5	15.2	15.9	15	15	14.8	14.1	12.9	11.9
Veracruz	19.4	20.2	23	25.3	26.3	26.9	26.5	25.7	25.7	25.3	23	20.2
Yucatán	22.9	23.4	25.4	27.1	28.2	28	27.5	27.5	27.2	26.1	24.6	23.5
Zacatecas	12	13.5	15.9	19.4	20.9	21.5	20.3	20	19.2	17.4	14.9	12.9
Nacional	15.2	16.5	16.7	21.3	23.5	24.9	24.8	24.6	23.6	21.3	19.5	15.9

Tabla 3. La temperatura mínima (Período 1980-2004)

Temperatura mínima promedio estatal													
Período 1980-2004													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Aguascalientes	3.2	4.1	6.2	8.8	11.3	13	12.6	12	12	9.3	5.3	4.1	8.5
Baja California	5	5.9	6.9	9.4	10.6	13	17.5	19.1	15	11.7	7.6	6.3	10.6
Baja California Sur	8.5	9	9.9	11.5	13.1	15.8	19.4	20.3	19.6	16.2	12.1	9.6	13.7
Campeche	16.9	16.2	17	19.6	20	21.1	20.6	20.6	20.7	19.7	17.9	16.6	10
Coahuila	3.7	5.1	9.3	12	15.7	19.2	19	19.9	16.9	12.6	7.6	4.5	11.9
Colima	14.8	14.6	14.8	16.2	18.2	21.1	21.1	20.8	20.7	20.1	18.1	16.3	18.1
Chiapas	16.3	15.9	17.1	19.8	19	19.9	19.4	19.4	19.6	19.9	17.4	16	19.1
Chihuahua	-0.6	0.7	3.4	7	10.7	15	16.5	15.7	13.6	8.3	2.8	-0.1	7.8
Distrito Federal	4.5	5.4	7.7	9.3	10.3	10.7	10.1	10	10.2	9.9	6.5	6.4	0.3
Durango	2.8	3.5	5.5	8.3	11.3	14.3	14.8	14.5	13.6	9.9	5.6	3.5	9
Guanajuato	5.3	6.2	9.2	10.7	12.7	13.5	13.1	12	12.4	10.2	7.7	6.2	9.9
Guerrero	15.7	16.1	17.2	18.7	20	20.2	19.6	19.5	14.4	18.9	17.5	16.3	18.3
Hidalgo	5.9	8.6	9	11.3	12	13.3	12.9	12	12.5	10.7	8.3	7	10.3
Jalisco	8.2	8.5	9.9	12.1	14.5	16.6	16.5	16.3	16.1	14.2	10.9	9.2	12.7
Estado de México	3.9	4.6	9.1	9	9.5	10.3	10	9.9	9.9	8.1	5.9	4.9	7.9
Michoacán	11.9	11.4	12.8	14.7	16.7	17.8	17.2	17	16.9	15.7	13.6	11.9	14.7
Morelos	9.9	10.6	12.4	14.7	15.9	16.2	15.3	15.1	15.2	13.6	11.7	10.3	13.4
Nayarit	12.6	12.3	12.1	14.9	17.2	20.4	20.8	20.9	20.7	19.2	15	19.7	16.8
Nuevo León	5.7	7.3	10.4	13.7	17	18.7	19	18.9	17.5	14.1	9.9	6.8	13.3
Oaxaca	12.2	12.8	15	16.7	17.9	17.9	17.5	17.4	17.4	16.4	15	13.9	16
Puebla	7.3	8.2	10.2	12.1	13.6	13.9	13.2	13	13.1	11.6	9.5	8.1	11.2
Querétaro	6.5	7.1	9.5	12.1	12	12.9	12	12.6	13	11.2	9.9	7.5	10.9
Quintana Roo	17.1	17.2	28.6	20.1	21.4	22.1	21.8	21.8	21.7	20.8	19.2	17.8	20
San Luis Potosí	6.6	7.5	9.8	12.4	14.9	15.6	15.9	15.2	14.6	12.3	9.4	7.6	11.9
Sinaloa	10.5	10.8	11.7	13.4	16.2	20.8	22.2	22	21.8	18.8	14.2	11.7	15.2
Sonora	4.9	5.9	7.2	9.7	13.1	19.1	21.7	21.5	19.4	13.7	0.2	6.1	12.4
Tabasco	18.1	18.2	20.1	21.7	22.8	22.8	22.4	22.5	22.6	21.8	20.2	18.5	21
Tamaulipas	9.9	10.6	14	17.3	20.2	21.6	21.7	21.6	20.5	17.3	13.6	10.6	19.5
Tlaxcala	1.9	2.9	4.6	6.2	7.5	8.5	7.9	7.7	7.9	6.1	3.9	2.8	5.7
Veracruz	14.3	14.9	17	19.2	21	21.2	20.7	20.6	20.4	19.9	19.9	15.3	19.4
Yucatán	18	16.2	18	19.5	20.9	21.5	21.1	21	21.1	23	19.2	16.9	19.2
Zacatecas	3.1	4	6.1	9.9	11.4	13.2	13	12.7	11.9	9.2	5.7	4.1	9.9
Nacional	7.5	9.3	10.2	12.7	15.2	17.4	18.2	17.9	17	14.2	10.4	8.2	13.1

7.1 Metodología de desarrollo

Para este propósito se utilizó la metodología en cascada para el ciclo de vida. Esta es una metodología de programación que se utiliza mucho en el diseño de sistemas expertos. Contempla varias etapas las cuales van desde la especificación de requerimientos hasta el aseguramiento de la calidad, es de hacer notar que el desarrollo del *software* es acorde con la norma Moprosoft, la cual se ha implementado en México como un esfuerzo del gobierno federal para la generación de *software* de calidad. La figura 2 describe la categoría de proceso Operación, dentro de esta categoría el proceso Desarrollo y Mantenimiento de *Software*, establece y realiza las actividades correspondientes al ciclo de vida del *software* para dar cumplimiento a los objetivos de los proyectos y requerimientos especificados [18].

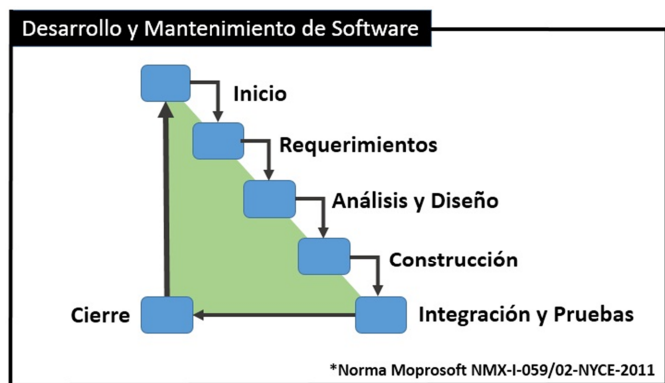


Figura 2. Etapas del modelo de desarrollo según Moprosoft.

Es de hacer notar que a diferencia de un sistema *software* tradicional, en la etapa de análisis y diseño se debe tomar en cuenta el aspecto del análisis del conocimiento y dentro de ella la parte de extracción de conocimiento el cual se obtiene de entrevistas con especialistas en el área hacia la cual está enfocado en sistema y las rejillas de repertorio para la adquisición automática de conocimiento y posteriormente dicho conocimiento será clasificado e integrado a la base de conocimientos del sistema [19].

Para la etapa de codificación se utilizó el lenguaje Visual Prolog 7.2, el cual es el lenguaje más recomendable para la elaboración de Sistemas Expertos, ya que maneja programación lógica y la estructura del *software* está basada en reglas.

En la figura 3 se muestra el diagrama de casos de uso que es la manera gráfica de representar el funcionamiento del sistema, y como interactúa con los usuarios.

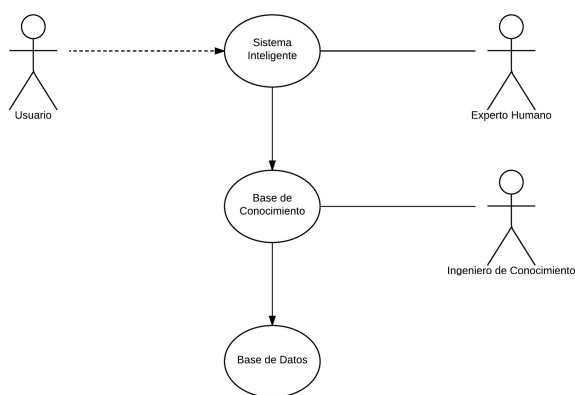


Figura 3. Diagrama de casos de uso del sistema experto.

Después de una extensa investigación y algunas entrevistas con un experto humano especialista en la predicción del clima en Colima se generó una primera versión, el cual es un sistema experto que se presentará a continuación y que en una segunda etapa se migrará a un sistema multiagente utilizando la estación meteorológica del Centro Universitario de Investigaciones en Ciencias del Ambiente de la Universidad de Colima, México.

7.2 La base de conocimientos

La base de conocimientos funciona como un objeto pasivo que almacena reglas a partir de las cuales se determina las causas de un mal funcionamiento del clima si este tiene como resultado algo que no coincide con la base de datos en la cual se encuentran los registros del monitoreo de los últimos 30 años para el caso de estudio del estado de Colima, México.

La representación de la base de conocimientos se da mediante el motor de inferencia que interactúa a partir de reglas causa-efecto con la base de datos y la base de conocimientos.

El proceso de razonamiento se da a partir de un encadenamiento hacia delante, en el cual las premisas de las reglas que están en la base de conocimientos y se comparan con la memoria de trabajo. En ese sentido existe una serie de hechos (condiciones) para la que se deben de encontrar sus conclusiones (pronósticos) que se derivan de ellas como se muestra en la figura 4.

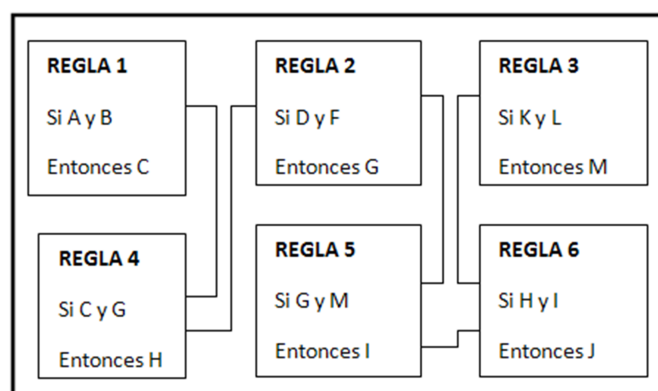


Figura 4. Estructura de la base de conocimiento.

En sistemas cuyo propósito es el diagnóstico, es justificable utilizar un encadenamiento hacia delante, el cual se puede visualizar como un árbol de decisión con un recorrido en anchura de abajo hacia arriba, también

se le denomina de razonamiento de abajo hacia arriba, porque se razona a partir de los hechos de un nivel más abajo a las conclusiones, las cuales se encuentran en el nivel más alto del árbol.

7.3 Reglas de producción

Como forma fundamental de representación del conocimiento se utilizaron reglas de producción que representan la heurística del sistema, como ejemplo muestra a continuación el pseudocódigo de dos módulos:

Módulo situación de error obtener_pronostico
Temperatura actual

Valor.legal [$>"45"$ La temperatura es alta, humedad relativa superior a lo normal, con cielo soleado]:
Diagnostico

“No coincide con el rango de temperatura perteneciente a los datos”

Módulo obtener_pronostico
Temperatura actual

Valor.legal [$<"45"$ La temperatura es alta, humedad relativa normal, con cielo soleado]: Diagnostico
“Coincide con el rango de temperatura perteneciente a los datos”

If obtener_pronostico es $>"23"$ or $>"45"$
Then

Hipótesis=Calculo de Pronostico, "El Pronostico del Clima es: 38.1°C, con el día despejado"

Para probar que una sola regla es una conclusión verdadera de varias reglas se utiliza el método de resolución con refutación.

Lo anterior permite generar un conjunto de reglas a partir de indicadores conocidos como puede ser la temperatura actual, que aunque puede asumir cualquier valor, al compararlos con la tabla de datos, algunos de los valores indicados por el usuario se podrían asumir como no válidos como por ejemplo que el valor sea “nevando” pues aunque en la región del volcán de Colima hay nevadas varios días el año, en la ciudad de Colima nunca ha nevado.

7.4 Interface gráfica de usuario

Para empezar, se visualiza el inicio del programa. En la figura 5 que se muestra a continuación se ve la pantalla de inicio al ejecutar el programa. El menú tiene la pestaña clima la cual contiene tres opciones:

- Datos: Datos meteorológicos del estado de Colima, México en los últimos 30 años.

- Salir: Salir del programa.
- Pronóstico: comenzar el programa principal.

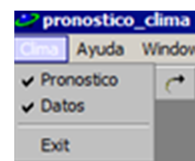


Figura 5. Pantalla de Inicio.

La siguiente pantalla es el Sistema Experto y tiene tres secciones para interactuar (véase en la figura 6):

El usuario selecciona el mes que desea usar para el pronóstico o bien si así lo desea también puede ver el pronóstico anual para el estado de Colima, posteriormente selecciona el tipo de pronóstico ya sea temperatura máxima o mínima. Finalmente, oprime la opción Incluir Día de Hoy e ingresa la temperatura en el cuadro de texto.

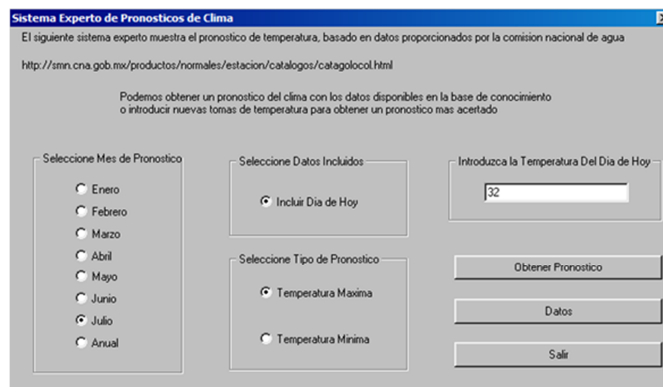


Figura 6. Sistema experto.

Al presionar el botón Obtener Pronóstico el motor de inferencia realiza las búsquedas y los cálculos necesarios y en un cuadro de diálogo devuelve el pronóstico, como se ve en la figura 7.

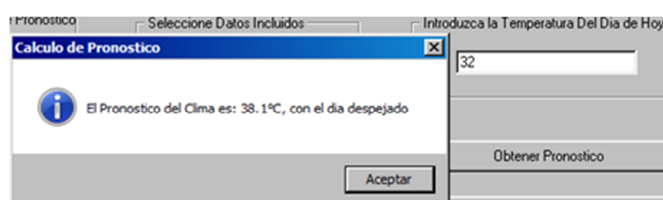


Figura 7. Resultado del pronóstico para temperatura máxima.

Para hacer otro pronóstico, simplemente, se elige aceptar y nos regresa a la pantalla del sistema pronosticador.

El programa está protegido para que no acepte temperaturas que no sean posibles en el estado de Colima. Al ingresar una temperatura incorrecta, el programa en un cuadro de diálogo devuelve el mensaje de error y sugiere consultar la hoja de datos meteorológicos del estado de Colima, México como se muestra en la figura 8 en donde se incluyó una temperatura de -3 grados Celsius la cual es improbable.

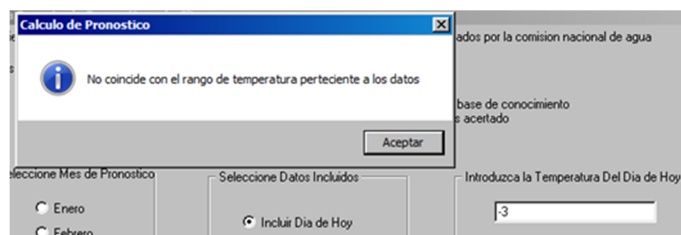


Figura 8. Rango no aceptado de temperaturas.

Para consultar la hoja de datos meteorológicos de Colima se pulsa el botón ver datos o la opción menú clima -> datos. La figura 9 a continuación muestra la consulta de los datos.

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL													
NORMALES CLIMATOLÓGICAS													
ESTADO DE: COLIMA													
ESTACION: 00006040 COLIMA (DGE)													
LATITUD: 19°13'00" N.													
LONGITUD: 103°42'47" W.													
ALTURA: 500.0 MSNM.													
PERIODO: 1951-2010													
ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURA MAXIMA													
NORMAL	31.3	31.9	32.9	34.0	34.4	33.6	32.4	32.4	31.5	32.1	32.4	31.6	32.5
MAXIMA MENSUAL	35.6	36.0	36.4	37.8	39.4	37.7	36.2	36.7	35.5	35.5	34.9	36.7	
AÑO DE MAXIMA	1954	1997	1995	1995	1997	1998	1994	1997	1994	1995	1997	1954	
MAXIMA DIARIA	38.2	39.2	39.8	42.5	42.0	41.0	40.4	39.0	39.5	41.0	38.9	40.5	
FECHA MAXIMA DIARIA	20/1959	22/2009	04/1954	17/1997	15/1998	19/1994	03/2006	08/1997	02/1990	02/1970	29/1954	02/1954	
AÑOS CON DATOS	55	55	52	52	56	54	55	56	56	56	53	54	
TEMPERATURA MEDIA													
NORMAL	23.4	23.6	24.3	25.5	26.8	27.5	26.8	26.6	26.2	26.1	25.2	23.9	25.5
AÑOS CON DATOS	55	55	52	52	56	54	55	56	56	56	53	54	
TEMPERATURA MINIMA													
NORMAL	15.5	15.4	15.7	17.1	19.3	21.4	21.1	20.9	20.9	20.1	18.1	16.2	18.5
MINIMA MENSUAL	12.9	12.5	12.5	13.9	15.1	18.7	17.9	18.2	19.2	18.2	16.1	13.7	
AÑO DE MINIMA	1998	1992	1986	1957	1993	1988	1956	1956	1985	1984	1992	1970	
MINIMA DIARIA	7.5	8.0	3.0	7.0	10.0	14.0	0.7	15.0	13.0	13.0	11.5	9.0	
FECHA MINIMA DIARIA	12/1997	06/1992	28/1988	27/1988	03/1981	13/1957	16/2005	03/1956	28/1994	26/1986	25/1970	31/1975	
AÑOS CON DATOS	55	55	52	52	56	54	55	56	56	56	53	54	
PRECIPITACION													
NORMAL	24.2	6.2	4.3	2.1	10.9	128.3	205.6	191.9	191.0	92.0	17.6	11.3	885.4
MAXIMA MENSUAL	438.4	197.5	169.2	92.0	196.6	274.5	553.1	352.8	376.7	439.6	181.1	81.1	
AÑO DE MAXIMA	1992	2010	1968	1959	1956	2003	1970	1962	1998	1959	1976	1963	
MAXIMA DIARIA	136.4	84.8	110.4	51.7	130.1	128.5	139.0	115.0	239.0	255.0	93.7	60.9	
FECHA MAXIMA DIARIA	12/1967	02/2010	04/1968	17/1959	27/1956	24/2003	11/1976	24/1995	05/1999	03/1969	24/1972	15/1963	
AÑOS CON DATOS	59	59	56	55	60	59	60	60	60	60	58	58	
EVAPORACION TOTAL													
NORMAL	145.5	159.7	206.0	221.4	228.5	178.9	155.1	148.0	131.9	139.1	137.9	133.8	1,985.8
AÑOS CON DATOS	46	45	44	45	47	45	46	49	49	49	44	45	
NUMERO DE DIAS CON LLUVIA													
NORMAL	1.4	0.6	0.3	0.2	1.1	11.2	18.1	17.6	16.7	7.1	1.5	1.1	76.9
AÑOS CON DATOS	59	59	56	55	60	59	60	60	60	60	58	58	

Figura 9. Hoja de datos.

Esta hoja de datos fue la base para asignar los datos de pronóstico de clima al *software* desarrollado y en ella se muestra un extracto de los datos de los últimos 30 años en el estado de Colima que es nuestro caso de estudio.

8. Conclusiones y trabajos futuros

Este proyecto ha sido una gran experiencia para la formación de estudiantes de ingeniería. Les ha permitido conocer un aspecto práctico de la inteligencia artificial pues se han vinculado desde la parte inicial relacionada con el conocimiento del estado del arte, las etapas del desarrollo de un sistema inteligente y su uso en un aspecto social que impacta en la economía de una región; los estudiantes vinculados al proyecto han conocido cada una de las etapas del sistema inteligente, como está conformado y que tipo de información debe ser depurada. Se utilizó como plataforma de desarrollo el lenguaje Visual Prolog ver. 7.2 el cual fue muy importante en la etapa de codificación, ya es un lenguaje de programación declarativo, con un enfoque que utiliza la lógica silogística siendo fundamental en el diseño del sistema de pronóstico del clima.

Su ambiente de programación es el más funcional y el que mejor se adapta a las necesidades del proyecto.

Las interfaces del sistema tienen un entorno gráfico fáciles para su lectura y uso, los usuarios del sector agrícola que utilicen el sistema se verán beneficiados ya que el clima no será obstáculo para obtener mayor productividad, y les permitirá planificar y tomar decisiones, respecto a qué cultivos conviene sembrar y en qué período sería más favorable.

En una segunda etapa del proyecto se trabaja en el módulo de sensorica y de circuitería electrónica lo cual está fuera del alcance del presente documento y se pretende presentar en una siguiente entrega, pues se trabaja en la calibración y prueba de instrumental y los resultados aún no son concluyentes, pero se han estado incorporando al módulo de *software* de aplicación descrito en este trabajo como módulos adicionales que conformarán un sistema multiagente es de hacer notar que en fecha reciente se consiguió el aval de la Agencia Espacial Mexicana para concluir el proyecto y trabajar con datos más completos y en tiempo real los cuales se integrarán durante el año 2017.

9. Referencias

- [1] FAO, "Tercera Conferencia Mundial sobre el Clima," [En línea]. Available: <http://www.fao.org/news/story/es/item/29648/icode/>. [Último acceso: 22 Abril 2016].
- [2] M. Lezaun, "Predicciones del tiempo y matemáticas," Sociedad Española de Matemáticas Aplicadas, vol. 1, n° 22, pp. 61-100, 2002.
- [3] OMM, "Agricultural Meteorology Programme (AgMP)," [En línea]. Available: Agricultural Meteorology Programme (AgMP) . [Último acceso: 23 Abril 2016].
- [4] ONU, "Organización Meteorológica Mundial," [En línea]. Available: <http://www2.medioambiente.gov.ar/acuerdos/organismos/onu/onuomm.htm>. [Último acceso: 23 Abril 2016].
- [5] Bautista, F.; Bautista-Hernandez, D.A.; Alvarez, O.; Anaya-Romero, M.; De la Rosa, D., "Software para identificar las tendencias de cambio climático a nivel local: un estudio de caso en Yucatán, México," Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente, vol. 19, n° 1, pp. 81-90, 2013.
- [6] Cohen, S.I.; Ojeda, B.; Villanueva, D.J.; Díaz, P.G.; Velazquez, V.M.A.; Muñoz, V.J.A., "CLIMA Y DISPONIBILIDAD DE AGUA: ANÁLISIS DEL PASADO PARA PREVER EL FUTURO," Revista Chapingo Serie Zonas Áridas, vol. 6, n° 1, pp. 169-176, 2007.
- [7] J. Amador, "Predicción agrometeorológica y agricultura en Boyacá," Cultura Científica, Fundación Universitaria Juan De Castellanos, vol. 5, n° 1, pp. 21-23, 2007.
- [8] A. Mileo, "ANÁLOGOS CLIMÁTICOS: INVESTIGANDO EL CAMBIO CLIMÁTICO," [En línea]. Available: <http://www.sustentator.com/blog-es/2015/07/analogos-climaticos-investigando-el-cambio-climatico/>. [Último acceso: 26 Abril 2016].
- [9] B. Nyenzi, "Desafíos de la predicción climática y su aplicación en el sector agrícola," de Servicios de Información y Predicción del Clima y Aplicaciones Agrometeorológicas para los Países Andinos, Guayaquil, Ecuador, 2004.
- [10] OMM, "Anexo al Plan de ejecución del Marco Mundial para los Servicios Climáticos - Componente del Sistema de información de servicios climáticos," [En línea]. Available: http://www.gfscclimate.org/sites/default/files/Components/Climate%20Services%20Information%20System/GFCS-ANNEXES-CSIS-VERSION-11-OCT-2013%20-14204_es_0.pdf. [Último acceso: 6 Junio 2016].
- [11] Landa, R.; Magaña, V.; Neri, C., "Variabilidad del clima y uso de la información climática," de Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático, México, D.F., Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2008, pp. 15-16.
- [12] Landa, R.; Magaña, V.; Neri, C., "Relaciones clima-agricultura de temporal en Querétaro y Guanajuato," de Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático, México, D.F., Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2008, pp. 39-43.
- [13] CIAT, "Investigación sobre el Cambio Climático," Centro Internacional de Agricultura Tropical, [En línea]. Available: <https://ciat.cgiar.org/es/investigacion-sobre-el-cambio-climatico>. [Último acceso: 24 Abril 2016].
- [14] CONAGUA, "Comisión Nacional del Agua de México," [En línea]. Available: <http://smn.cna.gob.mx>. [Último acceso: 24 Abril 2016].
- [15] Castro, L.M.; Carvajal, E.Y., "ANÁLISIS DE TENDENCIA Y HOMOGENEIDAD DE SERIES CLIMATOLÓGICAS," Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, vol. 1, n° 9, pp. 15-25, 2010.
- [16] N. Dieter, Sistemas Expertos, Experiencia de la Práctica, Barcelona, España: Marcombo, 1991.
- [17] Russell, S.; Norvig, P., Inteligencia Artificial, un enfoque moderno, México, D.F.: PRENTICE HALL/PEARSON, 2011.
- [18] NYSE, "Moprosoft," [En línea]. Available: <https://www.nyce.org.mx/moprosoft-nyce/>. [Último acceso: 12 Abril 2016].
- [19] Giarratano, J.; Riley, G., Sistemas Expertos, Principios y Programación, México, D.F.: Thompson, 2004.