

Redes bayesianas aplicadas a un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional para las condiciones climáticas al interior de un invernadero

Guillermo Alfonso De la Torre-Gea^{1,2} y Enrique Rico-García²

Universidad Tecnológica de Corregidora, Querétaro, México.

gtorre.utcorregidora@gmail.com

Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

ricog@uaq.mx

Paper received on 14/06/12, Accepted on 03/09/12.

Resumen. En los últimos años se han realizado estudios para determinar las condiciones del clima al interior de invernaderos empleando la Dinámica de Fluidos Computacional, con lo cual se ha podido aumentar el grado de exactitud y realismo. A pesar de que dichos modelos proporciona una solución numérica del balance energético que permite un estudio eficaz del clima dentro del invernadero, esta técnica toma en cuenta los valores de las variables independientes como incógnitas. Las Redes Bayesianas son técnicas heurísticas que puede ser de ayuda para describir las relaciones entre las variables que definen las condiciones de ventilación. El presente trabajo consistió en desarrollar un modelo de Red bayesiana a partir de datos de radiación solar, velocidad del flujo de aire y temperatura, obtenidos de un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional al interior de un invernadero, que nos permitió obtener las probabilidades condicionales de cada una de las relaciones con dichas variables. La red bayesiana mostró que la velocidad del flujo de aire influye más que la radiación solar sobre la temperatura del invernadero.

Palabras clave: Probabilidad, invernaderos, predicción, minería de datos, K2.

1 Introducción.

La ventilación es considerada como uno de los principales procesos para determinar el microclima de un invernadero [2,21]. La ventilación natural es el resultado de la acción de dos fuerzas naturales: la dinámica debida al viento y la térmica o de flotación [4]. La ventilación dinámica se incrementa con el aumento en la velocidad del viento y superficie de ventanas; mientras que la ventilación por efecto de flotabilidad se incrementa con el aumento de las diferencias entre la temperatura del aire interno y externo al invernadero [13]. Una de las ventajas de utilizar la ventilación natural como método de enfriamiento es la reducción del costo de operación de un invernadero [1]. Esto determina que se convierta en uno de los métodos de control del clima más adecuado bajo las condiciones de producción hortícola de bajos recursos.

© J. C. Hernández Hernández, J. F. Ramírez Cruz,
A. Cortés Fernández, J. H. Sossa Azuela. (Eds.)
Advances in Intelligent and Information Technologies.
Research in Computing Science 60, 2012, pp. 87 -96.



El incremento de la temperatura externa en invernaderos con ventilación natural ocasiona que la temperatura interna del mismo supere significativamente su valor óptimo, haciendo esencial la entrada de aire para prevenir daños al cultivo [19]. La ventilación en los invernaderos, influye principalmente en las variables: temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂, lo cual afecta directamente el desarrollo y crecimiento de los cultivos [4]. Un deficiente movimiento de aire provoca zonas con diferencias de temperatura y humedad, lo cual impacta en el rendimiento del cultivo.

En los últimos cinco años se han realizado estudios para determinar las condiciones del clima al interior de invernaderos empleando la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), con lo cual se ha podido aumentar el grado de realismo incorporando modelos 3D, mallas anti insectos y la simulación del cultivo mediante su incorporación como medio poroso, entre otros. Los resultados obtenidos han podido contribuir al mejor entendimiento del fenómeno de la ventilación del invernadero [17].

A pesar de que los modelos CFD proporciona una solución numérica de un balance energético en un volumen controlado, que en comparación con otros métodos y tecnologías costosas permite un estudio eficaz del clima dentro del invernadero, las técnicas de CFD toman en cuenta los valores de las variables independientes como incógnitas principales en un número finito de lugares dentro del dominio, por lo que se hace necesario determinar si existe relación entre los valores de las variables calculadas mediante este método.

Determinar las relaciones entre las variables climáticas al interior de un invernadero con ventilación natural es difícil, debido a la naturaleza inherente estocástica del flujo de aire. Las Redes Bayesianas (RB) son técnicas numéricas de incertidumbre que hacen uso de la inferencia bayesiana como método heurístico que puede ser de ayuda para describir las relaciones entre las variables que definen las condiciones de ventilación.

El objetivo de este estudio es demostrar que las RB pueden ser empleadas para encontrar un modelo que mejor describa las relaciones entre la radiación solar, la temperatura y la velocidad del flujo de aire al interior de un invernadero, mediante datos obtenidos de un modelo CFD, con lo cual realizar el pronóstico de las condiciones internas, calculando las probabilidades condicionales de cada una de las relaciones con dichas variables.

2 Comportamiento del clima al interior del invernadero.

Al interior del invernadero se lleva a cabo una interrelación de variables que definen el microclima, las cuales forman un sistema de dependencias complejo, dichas variables son: Radiación solar, Temperatura, Humedad relativa y CO₂ [3].

2.1 Radiación solar.

La radiación natural producida por el sol es la más importante fuente de energía, la cual varía con la estación y hora del día. Los tres métodos de intercambio de ca-

lor, conducción, convección y radiación contribuyen a las propiedades térmicas del invernadero. La conducción ocurre a través de la cubierta y el piso de invernadero. La convección es generada por diferencias de temperatura entre el aire, el suelo, la cubierta, las plantas así como el exterior del invernadero. La convección es el mecanismo más difícil de cuantificar con precisión ya que los intercambios de calor por convección se basan siempre en relaciones empíricas [6].

En los países con clima cálido e inviernos benignos, el principal problema del uso del invernadero se presenta en el verano, cuando existe una insolación muy alta que provoca elevaciones excesivas en la temperatura, las cuales afectan el desarrollo de los cultivos [19]. La radiación solar influye en el desarrollo de las plantas, ya que es un factor imprescindible en el proceso de fotosíntesis, por lo que su métrica se establece con el término de Radiación Fotosintética Activa (PAR). En períodos de elevada intensidad luminosa acompañada de altas temperaturas produce un activo crecimiento vegetativo. Cuanto mayor sea la luminosidad dentro del invernadero, mayores deben ser las temperaturas y la cantidad de CO₂ para que la PAR sea máxima.

2.2 Temperatura.

La temperatura al interior del invernadero constituye la variable de mayor peso, ya que interviene de manera directa con el crecimiento y desarrollo de las plantas. Aunque cada cultivo tiene un rango de temperatura óptima para su desarrollo, podemos definir que en su mayoría se encuentran entre 10 a 25°C; dicho rango se encuentra establecido de acuerdo a los siguientes parámetros: [16].

- a) Temperatura mínima letal, que indica daños irreversibles en los cultivos.
- b) Temperaturas máxima y mínima biológicas, dentro de las cuales los cultivos pueden desarrollar sus etapas o fases vegetativas.
- c) Temperaturas nocturna y diurna que indican el rango óptimo para el desarrollo de cada fase de los cultivos.

2.3 Estudios previos sobre la radiación solar y temperatura.

Se han realizado estudios utilizando modelos de radiación solar y transpiración basados en el balance de calor y humedad de los cultivos, para investigar la distribución de temperatura y humedad del aire así como las interacciones con los procesos fisiológicos del cultivo, además de la distribución del flujo de aire. El factor de protección solar juega un papel crucial en el mantenimiento estable de las condiciones térmicas en el interior, incluso si la temperatura exterior es mayor. La temperatura de la cubierta del invernadero es un parámetro esencial necesario para cualquier análisis de la transferencia de energía en el invernadero. De acuerdo con De la Torre-Gea [7], en la Figura 1 se muestra la proporción de variables estudiadas mediante modelos CFD en los últimos años.

El efecto de la radiación solar y térmica a menudo se toma en cuenta mediante el establecimiento de flujos de calor en los límites físicos del invernadero. La transfe-

rencia de radiación dentro del espacio del cultivo son de mayor interés, ya que determinan los dos principales procesos fisiológicos de los cultivos: la transpiración y la fotosíntesis. Por lo que es probable que reciba más atención en los próximos años.

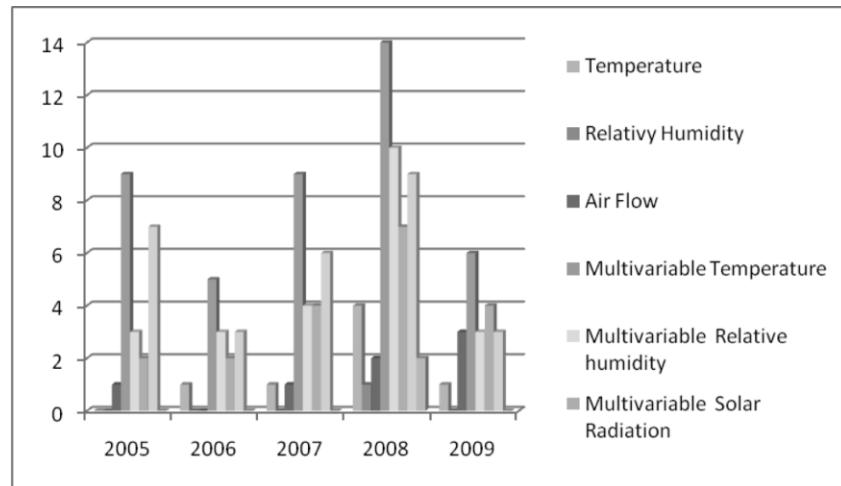


Figura 1. Proporción de las variables estudiadas en modelos CFD.

3 Teoría de las RB.

Las RB son representaciones del conocimiento desarrollados en el campo de la inteligencia artificial para el razonamiento aproximado [20, 18 y 5]. Una RB es un gráfico acíclico cuyos nodos corresponden a conceptos o variables, y cuyos enlaces definen las relaciones o funciones entre dichas variables [3]. Las variables se definen en un dominio discreto o cualitativo, y las relaciones funcionales describen las inferencias causales expresadas en términos de probabilidades condicionales, como se muestra en la ecuación 1.

$$P(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | \text{padres}(x_i)) \quad (1)$$

Las RB pueden ser usadas para identificar las relaciones entre las variables anteriormente indeterminadas o para describir y cuantificar estas relaciones, incluso con un conjunto de datos incompletos [13] y [21]. Los algoritmos de solución de las RB permiten el cálculo de la distribución de probabilidad esperada de las variables de salida. El resultado de este cálculo es dependiente de la distribución de probabilidad de las variables de entrada. A nivel mundial, las RB puede ser percibida como una distribución de probabilidades conjunta de una colección de variables aleatorias discretas [9].

La probabilidad a priori $P(c_j)$ es la probabilidad de que una muestra x_i pertenezca a la clase C_j , definida sin ninguna información sobre sus valores característicos,

como se muestra en la Ecuación 2.

$$P(c_j / x_i) = P(x_i / c_j)P(c_j) / \sum P(x_i / c_k)P(c_k) \quad (2)$$

Las máquinas de aprendizaje, en la inteligencia artificial, está estrechamente relacionado con la minería de datos, métodos de clasificación o agrupamiento en estadística, razonamiento inductivo y reconocimiento de patrones. Métodos estadísticos de aprendizaje automático se pueden aplicar al marco de la estadística bayesiana, sin embargo, la máquina de aprendizaje pueden emplear una variedad de técnicas de clasificación para producir otros modelos de RB [19] y [22]. El objetivo del aprendizaje mediante RB es encontrar el arreglo que mejor describa a los datos observados. El número de posibles estructuras de grafos acíclicos directos para la búsqueda es exponencial al número de variables en el dominio, el cual se encuentra definido por la Ecuación 3:

$$f(n) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} C^n 2_i^{(n-i)} f(n-i) \quad (3)$$

El algoritmo K2 constituye el método más representativo entre las aproximaciones de “búsqueda y resultado”. El algoritmo comienza asignando a cada variable sin padres. A continuación, agrega de manera incremental los padres a la variable actual que aumenta su puntuación en la estructura resultante. Cuando cualquier adición de una madre soltera no puede aumentar la cuenta, deja de agregar padres a la variable. Desde un pedido de las variables conocido de antemano, el espacio de búsqueda bajo esta restricción es mucho menor que el espacio tomando la estructura entera, y no hay necesidad de comprobar los ciclos en el proceso de aprendizaje. Si el orden de las variables es desconocida, se puede realizar la búsqueda en los ordenamientos [10].

4 Materiales y métodos.

4.1 Delimitación y caracterización de la zona de estudio.

El proyecto se desarrolló en el invernadero experimental Ie-1 (Figura 2) ubicado en el Campus Amazcala, perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, este se encuentra ubicado en la comunidad que lleva el mismo nombre, el cual pertenece al municipio del Marqués cuyas coordenadas geográficas son: latitud norte 20° 42', longitud oeste de 100° 16' y altitud de 1920 msnm.

Geomorfológicamente esta rodeados de sierras, mesetas y lomeríos que impiden el paso de los vientos húmedos del Golfo y la Mesa del Centro, que en sus laderas boreales retiene la humedad de los vientos que viajan de norte a sur. La disposición de esas áreas origina un índice de precipitación bajo en la zona y provoca una oscilación térmica de 7 a 34°C, que determina el carácter extremoso de estos climas.

La temperatura media anual varía de 18° a 19°C, la precipitación total anual fluctúa entre 450 y 630 mm. Las áreas donde rige esta variante están situadas en los

alrededores de la ciudad de Querétaro, Villa Corregidora, El Marqués, Santa Rosa de Jáuregui, la localidad Paso de Cuadros y en la colindancia del municipio de Peñamiller con el estado de Guanajuato.

4.2 Infraestructura Disponible.

Invernadero tipo Gótico de 432 m^2 en 2 naves, cada nave de $9 \times 24 \text{ m}$, 4.20 m a canaleta, 6.70 m a la cumbre (2.50 m de cumbre), sin ventanas cenitales sólo laterales de tipo enrollable, de $3 \times 9 \text{ m}$ a la cara frontal y posterior y de $3 \times 16 \text{ m}$ a los costados (Figura 2). La orientación es de norte-sur.

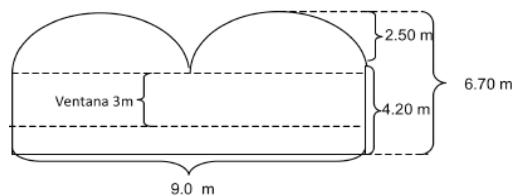


Figura 2. Dimensiones de invernadero experimental Ie-1.



Figura 3. Invernadero experimental Ie-1 ubicado en Amazcala, Querétaro.

4.3 Desarrollo del modelo CFD.

Se realizó el desarrollo y simulación numérica del modelo CFD con el software ANSYS v.12.1 el cual fue ejecutado sobre una máquina de 32 bits bajo el sistema operativo Windows Vista, con lo cual se resolvieron las ecuaciones de energía, continuidad y de momentum, bajo 3 valores diferentes de Radiación solar (500 w, 1000 w y 1350 w) y velocidad del flujo de aire (0 m/s, .45 m/s y .9 m/s).

La metodología para desarrollar el modelo CFD se realizó de acuerdo al modelo propuesto por Rico-García [19], del cual corresponden las siguientes etapas:

- 1) Discretización del flujo continuo: las variables de campo se aproximan a un número finito de valores en puntos llamados nodos
- 2) Discretización de las ecuaciones de movimiento en función de los valores de los nodos

- 3) Solución del sistema de ecuaciones algebraicas y obtención de los valores de las variables en todos los nodos.

4.4 Análisis mediante Redes Bayesianas.

En análisis de las relaciones entre las variables se realizó mediante el sistema ELVIRA versión 0.162 en tres etapas descritas por De la torre-Gea [8]:

- a) Pre-procesamiento: Se llevó a cabo mediante el algoritmo de imputación “por promedios” para completar las series de datos parciales. Este algoritmo reemplaza los valores faltantes o desconocidos, por el promedio de los valores para cada variable. Este método no necesita parámetros y consiste en la discretización de los datos masivos mediante el algoritmo, empleando dos intervalos con la misma frecuencia.
- b) Procesamiento: Para los fines de este estudio, la mejor estructura de red bayesiana se obtiene empleando el algoritmo K2 learning con un número máximo de padres igual a 3, con estimación de máxima verosimilitud y sin restricciones.
- c) Post-procesamiento: Se realizó un análisis de dependencias para obtener la estructura topológica de la red, la cual representa a las variables y sus dependencias causales. Después de obtener la red de aprendizaje paramétrico, se realizó el cálculo de las probabilidades condicionales en las variables que muestren relación o dependencia.

5 Resultados y discusión.

5.1 Modelo CFD.

Para proporcionar validez al modelo CFD, los resultados obtenidos de la solución de las ecuaciones calculados mediante el software ANSYS, se compararon con los valores de las variables flujo de aire y temperatura medidos al interior del invernadero.

Una parte importante de esta etapa es la representación gráfica de las variables que gobiernan el flujo, para tener una visión rápida y amena de los resultados obtenidos, como se muestra en la Figura 4.

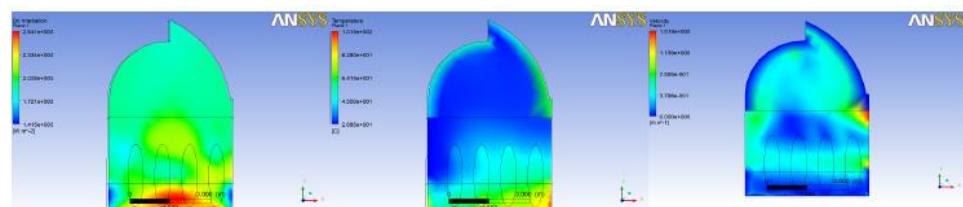


Figura 4. Modelo CFD de la Radiación solar, Temperatura y Velocidad del flujo de aire al interior de un invernadero.

5.2 Modelo de RB.

Se obtuvo un modelo de RB a partir de 4200 registros de datos de temperatura, radiación solar y velocidad del flujo de aire en intervalos de 500 W a 2300 W de radiación solar, 0 a 1.1 m/s de velocidad del flujo de aire y 15°C a 58°C de temperatura, cuyas inferencias se muestra en la Figura 5.

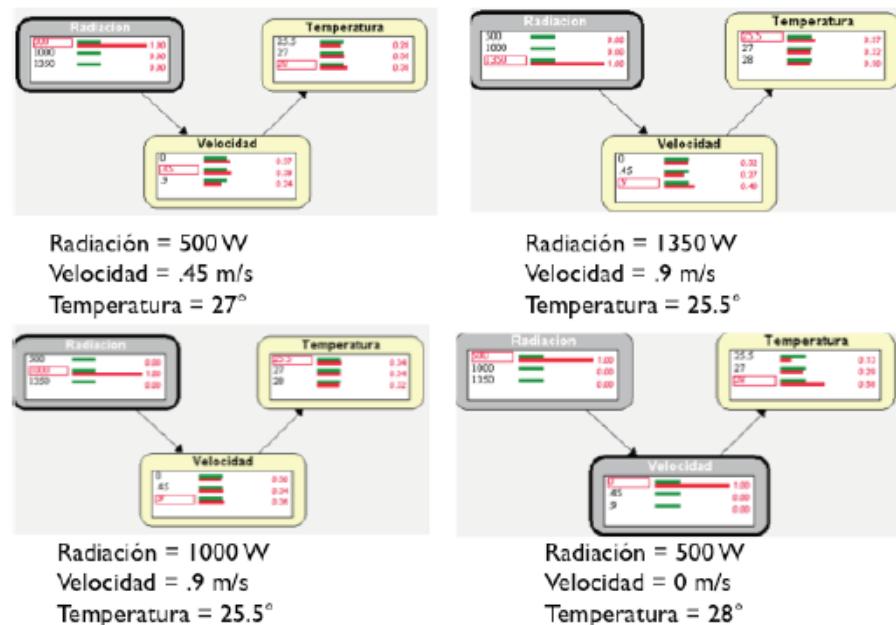


Figura 5. Cálculo de inferencias más importantes sobre el modelo de RB.

En el modelo de RB se muestran las relaciones entre las variables estudiadas, observándose una relación directamente proporcional entre la radiación solar y la velocidad del flujo de aire, así como una relación inversamente proporcional entre la velocidad del flujo de aire y la temperatura. No se observa ninguna relación entre radiación solar y temperatura sugiriendo que la temperatura al interior del invernadero depende sólo del flujo de aire.

Cuando la radiación solar es igual a 500 W, la velocidad del flujo de aire es igual a .45 m/s y la temperatura igual a 28°C con una probabilidad del 36%. Conforme la radiación solar aumenta hasta alcanzar 1350 W, la velocidad del flujo de aire aumenta hasta .9 m/s y la temperatura baja a 25.5°C con probabilidades del 40% y 37% respectivamente. Esto indica que las variaciones en la radiación solar infuyen en la velocidad del flujo de aire y ésta a su vez a la temperatura, sin embargo los valores de probabilidad son bajos, por lo que aunque las relaciones entre variables están presentes, la radición solar no es determinante.

Cuando la velocidad del flujo de aire es igual a cero, la radiación solar es igual a 500 W con una probabilidad del 100% y la temperatura es de 28°C con una probabilidad del 58%. Al incrementar la velocidad del flujo de aire hasta alcanzar .9 m/s, la radiación solar es igual a 1350 W y la temperatura desciende hasta los 15°C con similares valores de probabilidad. Esto indica que la velocidad del flujo de aire es la variable de mayor influencia al interior del invernadero.

Para los alcances de este trabajo se cubierto con el objetivo, sin embargo, es necesario realizar un estudio más detallado tomando en cuenta otros métodos de machine learning que permitan realizar una comparación, así como incorporar otras variables como humedad y concentración de CO₂.

6 Conclusiones.

Utilizando un modelo de RB es posible determinar las relaciones entre las variables radiación solar, temperatura, y velocidad de flujo de aire obtenidas a partir de un modelo CFD validado con mediciones del interior de un invernadero. Las redes bayesianas tienen la capacidad de mostrar las relaciones entre las variables de las condiciones climáticas al interior de un invernadero. Las distribuciones de probabilidad condicionales son una medida cuantitativa de las relaciones entre las variables y muestran el estado más probable de estas variables. El modelo de RB mostró que la variable de mayor influencia es la velocidad del flujo de aire, mientras que la radiación solar no mostró influencia significativa sobre la temperatura al interior del invernadero. Este método puede ser empleado en estudios posteriores para validar modelos de CFD.

Referencias

1. Baptista, F.J.; Bailey, B.J.; Meneses, J.F. 2001. Natural Ventilation Of Greenhouses: Comparison Of Measured And Predicted Ventilation Rates. *Agribuilding*, 136–151.
2. Bouchet, E.R.; Freyre, C.E.; Bouzo, C.A. 2003. Medición Y Predicción De La Tasa De Renovación Del Aire En Un Invernadero Con Ventilación Lateral. Ponencia Oral. *Actas Del Xxvi Congreso Argentino De Horticultura, Paraná, Entre Ríos*. 7 P.
3. Castilla Prados N. 2007. Invernaderos De Plástico. *Tecnología Y Manejo*. (Ed.) Mundiprensa, 2^a Ed.
4. Coelho, M.; Baptista, F.; Fitas Da Cruz, V.; Garcia, J.L. 2006. Comparison Of Four Natural Ventilation Systems In A Mediterranean Greenhouse. *Acta Hort.* 719:157-171.
5. Correa M, Bielza C, Paimés-Teixeira J, Alique JR (2009). Comparison of Bayesian networks and artificial neural networks for quality detection in a machining process. *Expert Syst. Appl.*, 36(3): 7270-7279.
6. Crittent, D.L., Bailey, B.J. 2002. A Review Of Greenhouse Engineering Developments During The 1990s. *Agricultural And Forest Meteorology* 112: 1-22.
7. De la torre-Gea, G., Soto-Zarazúa, G.M., López-Cruz, I., Torres-Pacheco, I., Rico-García, E. (2011b). Computational fluid dynamics in greenhouses: A review. *African Journal of Biotechnology*, 10(77), 17651-17662.
8. De la torre-Gea G., Delfin-Santisteban, O. 2012. Análisis probabilístico mediante redes bayesianas para el cálculo de la probabilidad de lluvia en diferentes localidades. *Research in Computing Science*, 55, 249 – 258.

9. Gámez JA, Mateo JL, Puerta JM (2011). Learning Bayesian networks by hill climbing: efficient methods based on progressive restriction of the neighborhood. *Data Min. Knowl. Discov.*, 22: 106-148.
10. Garrote L, Molina M, Mediero L (2007). Probabilistic Forecasts Using Bayesian Networks Calibrated with Deterministic Rainfall-Runoff Models. In Vasiliev et al. (eds.), *Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security*, Springer, pp. 173-183.
11. Guoliang L (2009). Knowledge Discovery with Bayesian Networks. PhD dissertation, National University of Singapore, Singapore.
12. Hruschka E, Hruschka E, Ebecken NFF (2007). Bayesian networks for imputation in classification Problems. *J. Intell. Inform. Syst.*, 29: 231-252.
13. Katsoulas, N.; Bartzanas, T.; Boulard, T.; Mermier, M.; Kittas, C. 2006. Effect Of Vent Openings And Insect Screens On Greenhouse Ventilation, *Biosystems Engineering*, 93: 427-436.
14. Mediero OL (2007). Probabilistic forecast flood flows Through Bayesian Networks Applied to a Distributed Hydrological Model. PhD dissertation, Polytechnic University of Madrid, Madrid, Spain.
15. Naveed N, Choi MTS, Jaffar A (2011). Malignancy and abnormality detection of mammograms using DWT features and ensembling of classifiers. *Int. J. Phy. Sci.*, 6(8): 2107-2116.
16. Nisen A., Grafiadellis M., Jimenez R., Malfa G. La, Martinez García P.F., Monteiro A., Verloldt H., Villele O. de, Zabeltitz C.H. von, Denis I.Cl. y Baudoin W.O., 1988. Cultures protégées en climat méditerranéen. FAO. N° 90. Roma, 317 pp.
17. Norton, T., Sun, D.W. , Grant, J., Fallon, R., Dodd, V., 2007. Applications of Computational Fluid Dynamics (CFD) in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review. *Bioresource Technology* 98 2386–2414.
18. Reyes P (2010). Bayesian networks for setting genetic algorithm parameters used in problems of geometric constraint satisfaction. *Intell. Artificial.*, 45: 5-8.
19. Rico-García, E. 2008 *Modelación Climática En Invernaderos: Ventilación Natural*. Tesis Doctoral. Facultad De Ingeniería. Universidad Autónoma De Querétaro, Pp 74:97.
20. Subramaniam T, Jalab HA, Taqa AY (2010). Overview of textual antispam filtering techniques. *Int. J. Phys. Sci.*, 5(12): 1869-1882.
21. Teitel, M.; Tanny, J.; Ben-Yakir, D.; Barak, M. 2005. Airflow Patterns Through Roof Openings Of A Naturally Ventilated Greenhouse And Their Effect On Insect Penetration, *Biosystems Engineering* 92:341-353.