

Tipo de artículo: Artículo original

Evaluación de técnicas de Inteligencia Artificial para el pronóstico de inundaciones costeras por penetración del mar

Evaluation of techniques of Artificial Intelligence for the forecast of coastal floodings for penetration of the sea

Hugo Arnaldo Martínez Noriega ^{1*} , <https://orcid.org/0000-0003-4303-5185>

¹ Departamento de Inteligencia Computacional. Facultad de Ciencias y Tecnologías Computacionales. Universidad de las Ciencias Informáticas, Carretera a San Antonio Km 2 ½, Torrens, La Lisa, La Habana, Cuba. CP: 19370. hugomn@uci.cu

* Autor para correspondencia: hugomn@uci.cu

Resumen

La meteorología enfrenta el reto de adquirir, analizar y aplicar conocimientos para resolver problemas climatológicos complejos. En la actualidad existen innumerables adelantos que involucran el uso intensivo de la tecnología en el pronóstico del tiempo. El proceso de pronóstico de inundaciones costeras por penetración del mar es complejo y requiere que se evalúen diferentes métodos de previsión para asistir la toma de decisiones de los especialistas y directivos antes situaciones reales. Las técnicas de Inteligencia Artificial han demostrado ser eficaces para gestionar los riesgos de inundación y tomar medidas para mitigarlos. La presente investigación está relacionada con el empleo de la tecnología en el pronóstico de las inundaciones costeras por penetración del mar, por ser uno de los fenómenos más peligrosos de la naturaleza que ocasionan grandes pérdidas en vidas humanas, recursos naturales y materiales. En el estudio se propone emplear las redes neuronales artificiales como técnica de Inteligencia Artificial para realizar el pronóstico de las inundaciones costeras por penetración del mar. Se eligen las redes neuronales artificiales por ser útiles para realizar predicciones en diferentes situaciones y pronosticar si ocurrirá o no una inundación costera por penetración del mar, en función de los datos que aportan las situaciones sinópticas anteriores a la ocurrencia de dicho fenómeno meteorológico.

Palabras clave: Inundaciones Costeras; Pronóstico; Inteligencia Artificial; Toma de Decisiones.

Abstract

Meteorology faces the challenge of acquiring, analyzing and applying knowledge to solve complex weather problems. Currently there are many advances that involve the intensive use of technology in weather forecasting. The forecasting process for coastal flooding due to penetration of the sea is complex and requires evaluating different forecasting methods to assist specialists and managers in decision-making before real situations. Artificial Intelligence techniques have proven to be effective in managing flood risks and taking measures to mitigate them. This research is related to the use of technology in the forecast of coastal flooding due to penetration of the sea, as it is one of the most dangerous phenomena in nature that causes great losses in human lives, natural resources and materials. The study proposes to use artificial neural networks as an Artificial Intelligence technique to forecast coastal floods due to penetration of the sea. Artificial neural networks are chosen because they are useful for making predictions in different situations and forecasting whether or not a coastal flood will occur due to penetration of the sea, based on the data provided by the synoptic situations prior to the occurrence of said meteorological phenomenon.

Keywords: Coastal floods; Forecast; Artificial Intelligence; Decision Making.

Recibido: 12/04/2021



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

Aceptado: 15/08/2021

Introducción

En la actualidad, se ha demostrado que el aumento global del nivel del mar se debe al impacto del cambio climático. Los cambios probables en el aumento del nivel del mar deben evaluarse para poder implementar estrategias de adaptación adecuadas (Goharnejad, Shamsai, & Hosseini, 2013). Los desastres naturales que ocurren en todo el mundo se han vuelto cada vez más frecuentes en las últimas décadas. Las inundaciones a menudo son inevitables e inesperadas; sin embargo, se pueden tomar medidas apropiadas que permitan minimizar las pérdidas y los daños que ocasionan (Wang et al., 2015). La inundación es un fenómeno natural de demolición, cuyo pronóstico es de gran importancia para reducir su impacto (Supriya, Krishnaveni, & Subbulakshmi, 2015).

Solo por citar, en (UCLouvain, CRED, & USAID, 2018) las inundaciones fueron responsables de la muerte de más de 2800 personas en todo el mundo, ocasionando daños económicos por valor de 19 700 millones de dólares.

Las técnicas de Inteligencia Artificial (IA) han demostrado efectividad en el área de la hidrología, en (Dwarakish & Nithyapriya, 2016) se realiza una revisión de estudios de vulnerabilidades costeras apoyados en técnicas de IA, las cuales se han empleado para apoyar la toma de decisiones y extraer conocimiento desde los datos. Según los referidos autores, entre los estudios más destacados, apoyados en técnicas de IA, se encuentran los que emplean las redes neuronales artificiales, máquinas de soporte vectorial, árboles de decisión, modelos de lógica difusa, algoritmo genético, bosques aleatorios y reglas de decisión, técnicas que han brindado resultados favorables en los métodos de pronóstico y tratamiento de situaciones de emergencia hidrometeorológicas.

El creciente desarrollo tecnológico actual ha permitido que se almacenen grandes volúmenes de datos, posibilitando con ello que se desarrollen técnicas escalables que permitan simular situaciones reales, clasificar adecuadamente un pronóstico, facilitar el análisis e interpretación de los resultados y proporcionar más evidencia para la toma de decisiones, basadas en el procesamiento de los datos (Agudelo-Otálora, Moscoso-Barrera, Paipa-Galeano, & Mesa-Sciarrotta, 2018).

En la actualidad la hidrología utiliza los avances de la ciencia y la tecnología con la finalidad de simular los fenómenos que ocurren en la realidad, involucrando el uso de sistemas computarizados de alta tecnología, como los sensores remotos, sistemas de información geográfica, monitoreo de costas con imágenes satelitales de alta resolución y la robótica, entre otros, principalmente aquellos que aprovechan los datos disponibles y la experiencia del grupo multidisciplinario que realiza el pronóstico.



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

El pronóstico de inundaciones costeras es un proceso complejo que implica poseer por partes de los especialistas experiencia, poder reconocer patrones, habilidades informáticas para trabajar con destreza en diferentes sistemas informáticos y una constante actualización en temas de análisis meteorológicos, entre otros aspectos de interés para complementar su formación.

Las técnicas de Inteligencia Artificial aplicadas al pronóstico de inundaciones costeras han sido empleadas en problemas reales de alta complejidad, logrando un aceptado grado de precisión en los resultados obtenidos para la predicción de la ocurrencia de inundaciones. El empleo de las técnicas de IA ha resultado provechoso, debido a la implementación de Sistemas de Alerta Temprana (SAT) los cuales son capaces de aprender de los datos y mejorar los procesos de clasificación y pronóstico de inundaciones costeras (Winter et al., 2020).

En la IA convergen diferentes técnicas, cuyo objetivo es efectuar tareas de pronósticos de inundaciones, entre las técnicas que han demostrado efectividad se encuentran:

- a) Las máquinas de soporte vectorial (SVM, según sus siglas en inglés).
- b) Árboles de decisión.
- c) Redes bayesianas.
- d) Redes neuronales artificiales (RNA).

Las SVM están conformadas por un conjunto de algoritmos de aprendizaje supervisado. Estos métodos están propiamente relacionados con los problemas de clasificación y regresión. Las SVM ofrecen una buena precisión y funcionan bien en espacios de elevada dimensionalidad; sin embargo, no funcionan correctamente cuando las clases a clasificar se encuentran superpuestas y son sensibles al tipo de núcleo o kernel que se utilice en la resolución de un determinado problema (Noble, 2006).

Los árboles de decisión son un modelo predictivo que dividen el espacio de los predictores agrupando observaciones con valores similares para la variable respuesta, son métodos simples de entender y de interpretar, capaces de trabajar con variables en una escala de medición cuantitativa y cualitativa. Dichos modelos tienden al sobreentrenamiento en especial en espacios de características de alta dimensionalidad, no existe garantía alguna de que el árbol generado sea óptimo, si el árbol de decisión es excesivamente grande no se podrá visualizar y se recomienda balancear los datos antes de entrenar a un aprendiz (Rokach & Maimon, 2015).

Las redes bayesianas son un modelo de grafo probabilístico en el cual cada nodo representa una variable y cada arco una dependencia probabilística, especificándose la probabilidad condicional de cada variable dados sus padres. Son métodos capaces de calcular la probabilidad de que un caso en específico pertenezca a una categoría; sin embargo,



para su mejor desempeño es de suma importancia que aprendan a través del usuario que las pone en funcionamiento (Koski & Noble, 2009).

Las redes neuronales artificiales se pueden considerar como un conjunto estructurado de elementos de procesamiento simples y adaptables, los cuales, a través de un proceso de entrenamiento mediante ejemplos, almacenan conocimiento de tipo experiencial y lo hacen disponible para su uso (Braspenning, Thuijsman, & Weijters, 1995).

En función de las características que describen las técnicas de IA que con frecuencia se emplean para el pronóstico de inundaciones y de los datos que se tienen almacenados con respecto a las inundaciones costeras que con frecuencia afectan a un área en cuestión, se realizará una comparación de dichas técnicas para seleccionar la que mejor se adapte al pronóstico de inundaciones costeras.

La experiencia de los especialistas en pronóstico y la Teoría de Decisión Multicriterio constituyen la base teórica del presente estudio para guiar la elección de la propuesta. La investigación ayuda a que se comprenda la factibilidad del uso de las técnicas de Inteligencia Artificial para anticipar la ocurrencia de inundación, avisar a la población y tomar las medidas de protección necesarias para evitar elevadas pérdidas humanas y materiales.

Materiales y métodos

Con el objetivo de seleccionar la técnica de IA que mejor cumpla los criterios previstos para ejecutar el pronóstico de inundaciones costeras por penetraciones del mar, se analizan las técnicas de IA que con mayor frecuencia se emplean para la predicción de inundaciones costeras. La Teoría de Decisión Multicriterio Discreta (DMD) es una metodología útil para el apoyo a la toma de decisiones, es un marco natural de trabajo de las técnicas innovadoras de toma de decisiones y se ha aplicado con éxito en la solución de diferentes problemas en las más diversas ramas, en los cuales se tiene como característica común la elección de una alternativa entre las múltiples existentes, teniendo en cuenta distintos criterios (Barberis & Ródenas, 2011).

En (Barba-Romero, 1994) se muestra que los métodos de decisión multicriterio posibilitan la obtención de soluciones eficientes del problema que se esté abordando, pero no se garantiza que las soluciones sean óptimas, por lo que se hace necesario que intervengan consideraciones de tipo subjetivo para manejar y descartar soluciones. En otras palabras, las consideraciones subjetivas se basan en tener en cuenta las preferencias del decisor y los objetivos predefinidos.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, para que los métodos multicriterios funcionen correctamente, se deben considerar los siguientes aspectos:

1. Elegir la(s) mejor(es) alternativa(s).



2. Aceptar alternativas buenas y rechazar las alternativas malas.
3. Generar una ordenación en forma descendente de las alternativas consideradas.

Para satisfacer los aspectos antes mencionados, existen diferentes métodos, como los siguientes:

1. Ponderación Lineal (Scoring).
2. Utilidad Multiatributo (MUAT).
3. Relaciones de superación y procesos de Análisis Jerárquico (AHP, proceso analítico jerárquico).

Para contrastar los resultados se emplearon pruebas de aceptación con el objetivo de medir la satisfacción a partir de criterios evaluados por los usuarios. Las pruebas se basaron en la realización de una encuesta a 12 especialistas en meteorología pertenecientes a las instituciones de dicha especialidad en Cuba, los cuales cuentan con una experiencia de más de 8 años en la actividad de pronóstico de fenómenos meteorológicos. Los especialistas fueron escogidos mediante un muestreo por conveniencia tomando como premisa la estabilidad de los mismos en la actividad de pronóstico. Se utilizó la escala de Osgood para etiquetar los criterios evaluados por los especialistas.

Las escalas utilizadas son parte de los instrumentos de recolección de datos y las mismas se basan en una lista de ítems, de tal forma que constituyen un criterio válido para medir cuantitativamente alguna característica de un fenómeno. En la investigación, se evalúan las opiniones de los especialistas con respecto a la validez de los resultados de la técnica de IA que mejor se adapta al pronóstico de inundaciones costeras.

Se selecciona el método de ponderación lineal (Scoring), para la realización del estudio comparativo de las técnicas de IA que mejor se adaptan a la realización del pronóstico de inundaciones costeras, se escogió este método debido a que el decisor juega un papel determinante en función de cada uno de los objetivos, con el fin de poder definir una estructura de preferencia entre las alternativas identificadas. Lo anteriormente expuesto se corresponde con la manera en la que se realiza el pronóstico de inundaciones costeras en Cuba, ya que los decisores, en cada análisis que desarrollan, tienen en cuenta un grupo de objetivos y un grupo de alternativas de solución con un orden de prioridad, para su puesta en marcha según la situación meteorológica que se presente.

El esquema básico del método de ponderación lineal consiste en construir una función de valor para cada alternativa, de acuerdo a como se plantea en la expresión (1).

Modelo para calcular la puntuación (score):

$$S_j = \sum_i w_i r_{ij} \quad (1)$$

Donde:

w_i : es el peso o la ponderación de cada criterio i , r_{ij} : es la evaluación de la alternativa j en función del criterio i , y

S_j : es la puntuación (score) para la alternativa j .



Para validar el resultado de la investigación, se emplea la siguiente escala para que los especialistas aporten sus criterios. A los especialistas en meteorología se les explicó que evaluarán de la siguiente forma:

- 5 = Muy satisfactorio.
- 4 = Satisfactorio.
- 3 = Neutro.
- 2 = Poco satisfactorio.
- 1 = Insatisfactorio.

Al obtenerse los resultados a través de la escala de Osgood, se debe calcular un diferencial semántico con el objetivo de evaluar la aceptación de la técnica de IA que mejor se ajusta para la ejecución del pronóstico de inundaciones costeras. Se debe escoger para cada uno de estos adjetivos otro adjetivo con un significado semánticamente opuesto y 5 alternativas de selección teniendo en cuenta el siguiente ítem.

Ítem a evaluar: las redes neuronales artificiales como técnica de IA para el pronóstico de inundaciones costeras presentan una mayor precisión.

Espacio semántico: 1, 2, 3, 4, 5.

Buena-----Mala → Los 12 especialistas en meteorología señalaron la primera opción.

Adecuada-----Inadecuada → Los 12 especialistas en meteorología señalaron la primera opción.

Aplicable-----Inaplicable → Los 12 especialistas en meteorología señalaron la primera opción.

Innovadora-----Obsoleta → Los 12 especialistas en meteorología señalaron la primera opción.

Completa-----Incompleta → Los 12 especialistas en meteorología señalaron la primera opción.

Resultados y discusión

La información aportada por el análisis documental que se realiza en la investigación, se empleará para seleccionar la técnica más apropiada para llevar a cabo el pronóstico de inundaciones costeras. En la tabla 1 se muestran los criterios y las ponderaciones de las técnicas de IA que con mayor frecuencia se han utilizado para dicho pronóstico.

Tabla 1. Criterios y ponderación de las técnicas de Inteligencia Artificial a utilizar para el pronóstico de inundaciones costeras.

Fuente: Elaboración propia.

Criterios	Peso por criterio (w_i)
-----------	-----------------------------



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

1. Utilización de un mecanismo de aprendizaje	5
2. Trabajo con datos que presentan incertidumbre	1
3. Posibilidad de combinar conocimiento y datos	3
4. Obtención de conocimiento verificable	5
5. Obtención de resultados de forma rápida y precisa	5
6. Grado de organización de la información	4
7. Utilización de analogías	3
8. Información excesiva o redundante	1
9. Flexibilidad	4

El resultado de la aplicación de la teoría de DMD aplicada a las técnicas de IA más apropiadas para el pronóstico de inundaciones costeras por penetración del mar se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la Ponderación Lineal de cada criterio para la selección de la técnica de IA para el pronóstico de inundaciones costeras. Fuente: Elaboración propia.

Crterios	Pesos (w_i)	Máquinas de soporte vectorial (r_{i1})	Árboles de decisión (r_{i2})	Redes bayesianas (r_{i3})	Redes neuronales artificiales (r_{i4})
1	5	8	5	9	9
2	1	7	4	9	8
3	3	6	8	9	7
4	5	6	8	8	6
5	5	9	8	7	9
6	4	7	8	7	5
7	3	5	7	3	5
8	1	8	7	3	8
9	4	8	7	8	9
Scoring S_j		223	224	225	228

Como resultado del análisis realizado se constató que, de las técnicas de IA estudiadas, las RNA se pueden considerar como la más apropiada para ejecutar el pronóstico de inundaciones costeras por penetración del mar.



Al finalizar la investigación se realizó un análisis de los criterios emitidos por los especialistas a través de la escala de Osgood, para obtener una valoración de los resultados alcanzados en la investigación, ver la tabla 3.

Tabla 3. Resumen de las valoraciones de escala aportadas por los especialistas en meteorología con respecto a los resultados de la investigación realizada. Fuente: Elaboración propia.

Ítem a evaluar	1	2	3	4	5
El enfoque con que se abordan los pronósticos de las inundaciones costeras en general, utilizando técnicas de IA.	0	0	0	2	10
Lo beneficioso de utilizar las TIC en el desarrollo de los pronósticos de inundaciones costeras por penetración del mar.	0	0	1	2	9
Importancia de las acciones planificadas para utilizar técnicas de IA en el pronóstico de inundaciones costeras.	0	0	2	3	7
La concepción general de las técnicas de IA para el pronóstico de inundaciones costeras.	0	0	0	4	8
Impacto de las técnicas de IA en el pronóstico de las inundaciones costeras, con un mayor grado de precisión.	0	0	0	1	11
Opinión sobre las indicaciones metodológicas para técnicas de IA en el pronóstico de inundaciones costeras .	0	0	0	5	7
Resultados visibles con la aplicación de las técnicas de IA en el pronóstico de inundaciones costeras en áreas de la meteorología.	0	0	0	3	9
Suma total de la valoración	0	0	3	20	61

La información que se recoge en la tabla 3 evidencia que los resultados de la investigación se pueden considerar como buenos, lo cual se refleja gráficamente en la figura 1.

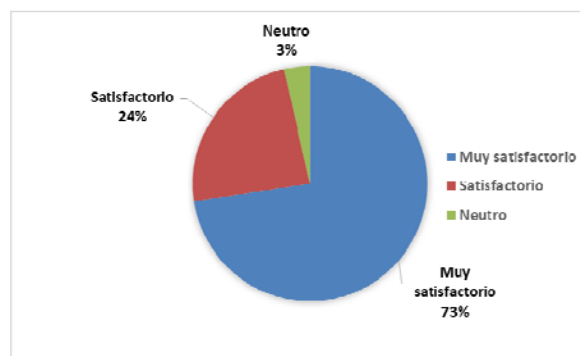


Figura 1. Respuestas de la escala de Osgood. Fuente: Elaboración propia.

En base a los resultados obtenidos se aprecia que las técnicas de IA serán de utilidad para el pronóstico de inundaciones costeras provocadas por penetración del mar.



En el área del conocimiento de la meteorología en sentido general, los entornos en los que se presentan los problemas se caracterizan por ser cambiantes, por lo que el conocimiento que se tiene de un determinado evento meteorológico puede ser incompleto. En situaciones reales los especialistas no cuentan con el tiempo necesario para encontrar una solución óptima debido a la gran cantidad de recursos que se necesitan, siendo estos prácticamente imposibles de obtener, por lo que es preferible la obtención de una solución aceptable. Las RNA pueden brindar buenas soluciones para tales clases de problemas, pues parten de un conjunto de datos de entrada a partir de los cuales se entrena a la red para que aprenda y el diseño que se elija de la red implica la selección del modelo, las variables a incorporar y el preprocesamiento de la información.

Las RNA poseen algunas ventajas frente a las técnicas de IA abordadas en el presente estudio, para ejecutar el pronóstico de inundaciones costeras por penetración del mar, entre estas se encuentran: la habilidad de aprender mediante ejemplos, son adaptables ya que cuentan con la capacidad de autoajuste de las neuronas y dinámicas debido a que son capaces de adaptarse a nuevos datos. Las RNA tienen la habilidad de generalizar, pues son capaces de asociar entradas similares con salidas similares. Son robustas ante fallos, ya que están conformadas por un gran número de unidades, de modo que si algunas de ellas fallan, el efecto en el resultado total del sistema no es apreciable. Las RNA son tolerantes a fallos respecto a los datos, pues cuentan con la capacidad de reconocer patrones con ruido, distorsionados o incompletos. Las RNA tienen facilidades de representación del conocimiento y son apropiadas para abordar problemas de clasificación como el pronóstico de inundaciones costeras por penetración del mar.

Entre las desventajas más importantes destaca que resulta difícil de interpretar el funcionamiento de una RNA, después de entrenadas. A este comportamiento se le denomina caja negra y en muchas aplicaciones reales al usuario final le gustaría saber qué hace la red neuronal en cada paso, para sentirse seguro de su aplicación. Por otra parte, si la cantidad de patrones a clasificar es muy grande, se requerirá de un mayor tiempo de aprendizaje para que pueda realizar clasificaciones precisas, evitando un sobre ajuste y mal funcionamiento ante futuros patrones. Además, se necesita contar con un potente hardware para el procesamiento de la información en paralelo.

Las RNA debido a su inmensa popularidad y aplicación en diferentes contextos reales, han evidenciado ser uno de los métodos de Aprendizaje Automático de mayor utilidad para las predicciones de las inundaciones en sentido general, mostrando una clara aceptación en la comunidad de hidrólogos y meteorólogos ante la previsión de los desastres que puede causar un fenómeno meteorológico como la inundación, ver (Tanty & Desmukh, 2015) y (Mosavi, Ozturk, & Chau, 2018) .

Basado en el análisis de las cuatro técnicas de IA abordadas para la realización del pronóstico de inundaciones costeras por penetración del mar, se recomienda que se utilicen primeramente las RNA, en segundo lugar las Redes Bayesianas, en tercer lugar los Árboles de Decisión y por último las Máquinas de Soporte Vectorial para reconocer los patrones asociados a la posible ocurrencia de inundaciones costeras por penetración del mar.



La aplicación de la escala de Osgood proporcionó una valoración sobre los resultados de la investigación realizada, mostrando la posibilidad de utilizar técnicas de IA para el pronóstico de inundaciones costeras desde los datos.

Conclusiones

En este estudio, basado en la comparación de técnicas de IA para su posterior empleo en el pronóstico de inundaciones costeras por penetración del mar, se propuso un orden para seleccionar la técnica de IA en base a las analizadas, que más apropiada fuera para ejecutar dicho pronóstico. En el análisis resultó que la técnica más adecuada son las RNA. Al analizar las ventajas y desventajas del empleo de las RNA con respecto a las otras técnicas de IA incluidas en el estudio, se concluye que las RNA resultan útiles para la realización del pronóstico en tiempo real de una posible inundación por penetración del mar. Los resultados obtenidos evidencian que las RNA son una herramienta viable para el apoyo a la toma de decisiones de directivos y especialistas en meteorología, ante la posibilidad de una inundación costera provocada por la penetración del mar.

Conflictos de intereses

El autor declara que no poseen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

1. Conceptualización: Hugo Arnaldo Martínez Noriega.
2. Curación de datos: Hugo Arnaldo Martínez Noriega.
3. Análisis formal: Hugo Arnaldo Martínez Noriega.
4. Investigación: Hugo Arnaldo Martínez Noriega.
5. Metodología: Hugo Arnaldo Martínez Noriega.
6. Recursos: Hugo Arnaldo Martínez Noriega.
7. Software: Hugo Arnaldo Martínez Noriega.
8. Supervisión: Hugo Arnaldo Martínez Noriega.
9. Validación: Hugo Arnaldo Martínez Noriega.
10. Visualización: Hugo Arnaldo Martínez Noriega.
11. Redacción – borrador original: Hugo Arnaldo Martínez Noriega.
12. Redacción – revisión y edición: Hugo Arnaldo Martínez Noriega.



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo **Atribución 4.0 Internacional** (CC BY 4.0)

Financiamiento

La investigación no requirió fuente de financiamiento externa.

Referencias

- Agudelo-Otálora, L. M., Moscoso-Barrera, W. D., Paipa-Galeano, L. A., & Mesa-Sciarrotta, C. (2018). Comparación de modelos físicos y de inteligencia artificial para predicción de niveles de inundación. *Tecnológica Ciencia del Agua*, 9(4), 209-236. <https://doi.org/0.24850/j-tyca-2018-04-09>
- Barba-Romero, S. (1994). Evaluación multicriterio de proyectos (Vol. Ciencia, Tecnología y Desarrollo: Interrelaciones Teóricas y Metodológicas, Ed. Nueva Sociedad, pp. 455-507). Caracas: Nueva Sociedad.
- Barberis, G. F., & Ródenas, M. C. E. (2011). La Ayuda a la Decisión Multicriterio: Orígenes, evolución y situación actual. Presentado en VI Congreso Internacional de Historia de la Estadística y de la Probabilidad, Valencia.
- Braspenning, P. J., Thuijsman, F., & Weijters, A. J. M. M. (1995). *Artificial Neural Networks: An Introduction to ANN Theory and Practice* (1.a ed). Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Dwarakish, G. S., & Nithyapriya, B. (2016). Application of soft computing techniques in coastal study – A review. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 1(4), 247-255. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2016.06.004>
- Goharnejad, Shamsai, & Hosseini. (2013). Vulnerability assessment of southern coastal areas of Iran to sea level rise: Evaluation of climate change impact. *OCEANOLOGIA*, 55(3), 611–637. <https://doi.org/10.5697/oc.55-3.611>
- Koski, T., & Noble, J. M. (2009). *Bayesian Networks An Introduction* (Wiley Classics Library). Chennai, India: A John Wiley and Sons, Ltd., Publication. Recuperado de www.wiley.com
- Mosavi, A., Ozturk, P., & Chau, K. (2018). Flood Prediction Using Machine Learning Models: Literature Review. *Water*, 10(1536), 1-40. <https://doi.org/10.3390/w10111536>
- Noble, W. S. (2006). What is a support vector machine? *Computational Biologic*, 24(12), 1565-1567. <https://doi.org/10.1038/nbt1206-1565>
- Rokach, L., & Maimon, O. (2015). *Data Mining with Decision Trees. Theory and Applications* (2nd ed, Vol. 81). Singapore 596224: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Supriya, P., Krishnaveni, M., & Subbulakshmi, M. (2015). Regression Analysis of Annual Maximum Daily Rainfall and Stream Flow for Flood Forecasting in Vellar River Basin (Vol. 4, pp. 957 – 963). Presentado en INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER RESOURCES, COASTAL AND OCEAN ENGINEERING (ICWRCOE 2015). <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.120>



- Tanty, R., & Desmukh, T. S. (2015). Application of Artificial Neural Network in Hydrology- A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4(06), 1-6. <https://doi.org/10.17577/IJERTV4IS060247>
- UCLouvain, CRED, & USAID. (2018). *Natural disasters 2018: An opportunity to prepare* (pp. 1-8). Brussels, Belgium. Recuperado de www.emdat.be
- Wang, Z., Lai, C., Chen, X., Yang, B., Zhao, S., & Bai, X. (2015). Flood hazard risk assessment model based on random forest. *Journal of Hydrology*, 527, 1130-1141. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.008>
- Winter, G., Storlazzi, C., Vitousek, S., Dongeren, A. van, McCall, R., Hoeke, R., ... Wandres, M. (2020). Steps to Develop Early Warning Systems and Future Scenarios of Storm Wave-Driven Flooding Along Coral Reef-Lined Coasts. *Frontiers in Marine Science*, 7(199), 1-8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00199>

