

Evaluación de volcamientos de arbolado urbano en la ciudad de Bogotá.

Pilar Velandia Díaz, Diego F. Álzate Velázquez, Eliana Torres Lemus, Diana Lara Ballesteros , Manuel Rodríguez-Rocha, Richard Gutiérrez Ladino , Jeimy Martínez Rubiano , German Tovar, Claudia Suarez¹

Resumen

El manejo del arbolado urbano, enfocado a la prevención del riesgo de volcamiento de árboles en la ciudad, puede convertirse en una herramienta de prevención única. En este sentido se desarrolló la presente investigación, que proyecta la generación de un modelo biometeorológico de volcamiento de árboles en Bogotá, a partir de la consolidación de la información de la base de datos de volcamientos y de las variables climáticas que incurrir en este fenómeno (precipitación y velocidad del viento) desde el año 2011 hasta el año 2018. La producción de dicho modelo se realizó mediante la correlación entre el fenómeno de volcamiento y los factores que lo explican, mediante el método estadístico de redes neuronales, teniendo en cuenta la probabilidad de volcamiento por factores climáticos, las variables dasométricas de las especies y el tipo de emplazamiento de estas. Generando así la zonificación del riesgo de volcamiento en Bogotá, la determinación de las especies con mayor susceptibilidad de volcamiento y finalmente, un acercamiento a los factores que se precisan para constituir un sistema de alerta de riesgo por volcamiento de árboles en la ciudad.

1. Introducción

Para la ciudad el arbolado urbano es un elemento primordial, debido a los grandes beneficios que cumple dentro de esta, tales como la creación y protección de espacios recreativos y de esparcimiento, valoración de la propiedad, reducción de la erosión, la temperatura y los contaminantes, aislamiento acústico, alimento y refugio a especies de fauna, entre otros, que favorecen en gran medida la calidad de vida de la población (Tovar, 2006).

No obstante el deterioro del arbolado urbano, hace que algunos de los individuos arbóreos representen un potencial peligro, bien sea por factores asociados a la selección de las especies,

¹ Ingeniero Forestal diego.alzate@ambientebogota.gov.co

¹ Ingeniero Forestal. Correo: rosaura.velandia@ambientebogota.gov.co

¹ Ingeniera Forestal. Correo: diana.lara@ambientebogota.gov.co

¹ Biólogo. Correo: manuel.rodriguez@ambientebogota.gov.co

¹ Ingeniero Catastral. Correo: richard.gutierrez@ambientebogota.gov.co

¹ Ingeniera Forestal. Correo: eliana.torres@ambientebogota.gov.co

¹ Ingeniera Forestal. Correo: jeimy.martinez@ambientebogota.gov.co

Secretaría Distrital de Ambiente, Subdirección de Silvicultura Flora y Fauna Silvestre, Grupo de Investigación, Bogotá, Colombia,

deficientes condiciones de siembra y escasa investigación científica, (Guevara, 2014) o por factores vinculados a su estado fitosanitario, factores externos como fuertes precipitaciones, grandes corrientes de viento y condiciones que limitan el desarrollo de su sistema radicular, que suelen desencadenar en distintos accidentes debido a la caída de ramas y el volcamiento total de las estructuras del árbol (Rivas, 2005). Por lo que se hace necesario que la gestión de los espacios públicos con arbolado contenga un programa de prevención de riesgos.

Las características de los vientos (velocidad y dirección) y las fuertes precipitaciones se convierten igualmente en uno de los factores que más inciden en el fenómeno de volcamiento de los árboles. Cuando el viento actúa sobre un árbol, se disminuye la capacidad y resistencia del sistema radicular en forma proporcional a la duración e intensidad del viento, por lo cual se generan potenciales zonas de falla, lo que lleva a la pérdida de anclaje por la falta de tracción de las raíces más pequeñas (Cendoya & Muñoz, 2002), lo que genera a su vez la inclinación del árbol y trae como consecuencia un aumento en la probabilidad de caída de este (Coutts, 1983).

Por su parte, la precipitación intensa y prolongada, sumada a fuertes vientos, ocasiona efectos fisiológicos y morfológicos que producen situaciones de estrés en las plantas, lo que puede acrecentarse dependiendo de las condiciones del suelo y el tipo de emplazamiento (Moreno, Useche, & Balaguera, 2019), ocasionando la disminución en el metabolismo de la raíz, dañando así el sistema radicular del árbol (Thompson & Troeh, 1988), haciéndolo más susceptible a efectos adversos que pueden desencadenar en el volcamiento de su estructura.

Esta investigación tiene como objeto establecer el riesgo que existe por volcamiento de árboles en la ciudad de Bogotá generando un modelo biometeorológico que comprenda las variables dasométricas de los individuos y las variables meteorológicas. Correlacionándolas mediante un modelo de redes neuronales, que permite conocer el peso de cada variable dentro del fenómeno de volcamiento, para de esta manera establecer los umbrales de precipitación y velocidad del viento en los cuáles se presenta mayor riesgo.

2. Métodos

2.1. Área de estudio. La investigación se encuentra enmarcada por la jurisdicción de la Secretaría Distrital de Ambiente reglamentada mediante la resolución 228 del año 2015 (figura 1).

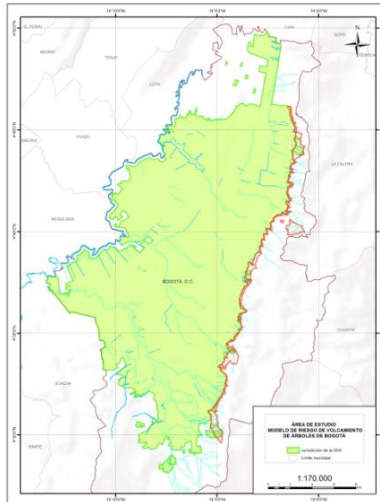


Figura 1. Área de estudio. Jurisdicción de la Secretaría Distrital de Ambiente.

2.2. Metodología. Los pasos metodológicos empleados para cumplir con los objetivos planteados se encuentran descritos en la figura 2.

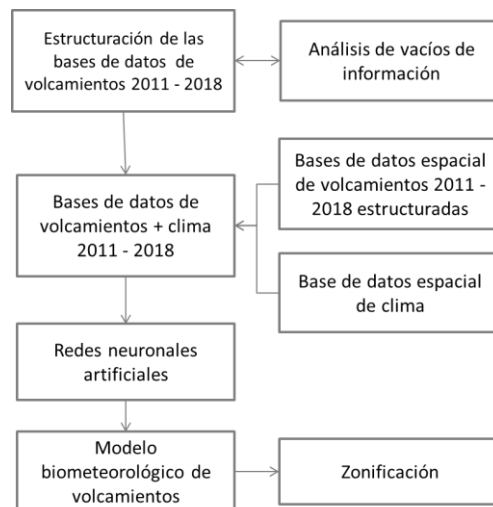


Figura 2. Esquema metodológico empleado en la investigación.

Inicialmente se estructuró la base de datos de volcamientos desde el año 2011 al año 2018 a partir de la información proporcionada por el sistema de emergencias de la Secretaría Distrital de Ambiente, esto se realizó mediante la geocodificación de los individuos volcados a través del software ArcGIS y plataformas como, google earth y google maps; posteriormente se determinó para cada evento de

volcamiento sus valores de precipitación y velocidad del viento, y de esta manera se obtuvo una base de datos con la información de las variables propias de los individuos y sus variables climáticas.

El modelo biometereológico de volcamientos se obtuvo por el método de aprendizaje de maquina (maching learning) de redes neuronales a través del software R y el paquete Neuralnet. Para esto, se utilizó información proveniente de la base de datos de volcamientos generada (740 individuos) y de la base de datos del SIGAU (2260 individuos); 70% del total se utilizó para el entrenamiento y el 30% restante para probar el modelo. Como variables explicativas del fenómeno se tuvieron en cuenta: el diámetro a la altura del pecho (DAP), diámetro de copa (DC), altura (H), altura de copa (AC), ángulo de inclinación del fuste (AI), especie (SP), emplazamiento (EM), precipitación del día del volcamiento (R) y máxima velocidad del viento el día del volcamiento (WS).

Finalmente, con el modelo biometeorológico y la información de la base de datos de volcamientos se generó la zonificación del fenómeno de volcamientos a partir de su probabilidad de ocurrencia. Para generar las categorías de riesgo se consideraron las probabilidades por especie y emplazamiento, y para los niveles alto y medio se utilizaron además, las variables correspondientes a altura y DAP por especie. La selección de las variables se realizó de acuerdo a la disposición de información en la base de datos del SIGAU y debido a su influencia en la predicción de la probabilidad de volcamiento.

La zonificación se realizó mediante un modelo creado en "Model builder" del software ArcGIS en donde se incluyeron los criterios por cada categoría de riesgo para cada individuo de la ciudad. Con el fin de generar zonas de riesgo se definieron áreas de influencia para los emplazamientos más representativos, de la siguiente manera: en parques de barrio se emplearon los polígonos correspondientes a parques de bolsillo con áreas menores a 1000 m², en franjas de control ambiental se crearon áreas de influencia a partir de la red vial con un ancho de 5 metros a cada lado de la vía y para Andén con zona verde angosta se generaron polígonos de 3 metros. Lo anterior teniendo en cuenta que en parques de barrio, franja de control ambiental y andén con zona verde angosta se presentan más del 50% de los volcamientos en la ciudad.

3. Resultados. Los resultados obtenidos mediante la investigación son, 1) base de datos de volcamientos desde el año 2011 al año 2018 incluidas las variables climáticas, 2) modelo biometeorológico de volcamientos para la ciudad de Bogotá y, 3) zonificación del riesgo de volcamiento.

Base de datos de volcamientos desde el año 2011 al año 2018 incluidas las variables climáticas. En la figura 3 se puede apreciar el resultado de la base de datos consolidada, allí se encuentran todos los eventos ocurridos desde 2011 a 2018, en total se registraron 1961 individuos volcados. Esta información se encuentra en formato csv y shapefile.

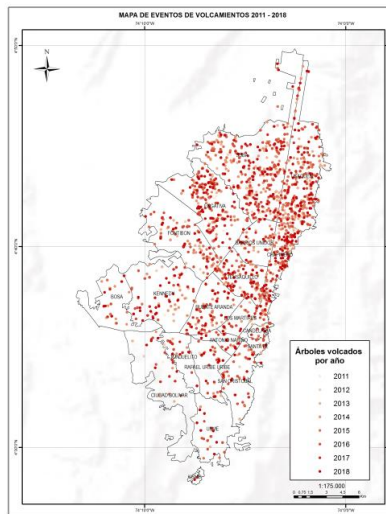


Figura 3. Eventos de volcamientos discriminados desde el año 2011 al año 2018

A partir de esta base de datos se puede deducir que el patrón de volcamientos desciende desde el norte hacia el sur de la ciudad, siendo Suba y Usaquén las localidades en las que se presentan los mayores eventos de caída de árboles. La zona sur conformada por localidades como Bosa, Ciudad Bolívar, Usme, Tunjuelito, Rafael Uribe Uribe, Antonio Nariño, Mártires y Candelaria son las que presentan el menor promedio de volcamientos anual con valores que oscilan entre 2 y 15 árboles (figura 4).

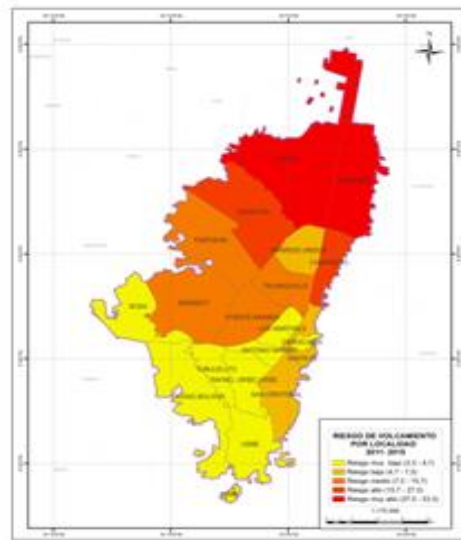


Figura 4. Riesgo de volcamiento promedio anual por localidades.

La caída de árboles fue más frecuente en parques de barrio presentándose al año hasta 52,1 volcamientos; emplazamientos como andén sin zona verde y franja de control ambiental presentaron también cifras significativas con un promedio anual que oscila entre 32 y 25 árboles volcados en promedio al año respectivamente.

Las especies *Acacia decurrens*, *Acacia melanoxylon* y *Acacia baileyana* se caracterizaron por presentar los mayores eventos de volcamiento, con promedios que oscilan entre 31 y 22 árboles volcados al año. Dentro de las diez especies más susceptibles al volcamiento se encuentran también *Paraserianthes lophanta* (Willd.) I.C.Nielsen, *Ficus soatensis* var. bogotensis Dugand, *Sambucus nigra* L., *Cupressus lusitánica* Mill., *Eucalyptus globulus* Labill., *Ficus elástica* Roxb. ex Hornem, *Tecoma stans* (L.) Juss. ex Kunth y *Eugenia neomyrtifolia* Sobral (figura 5).

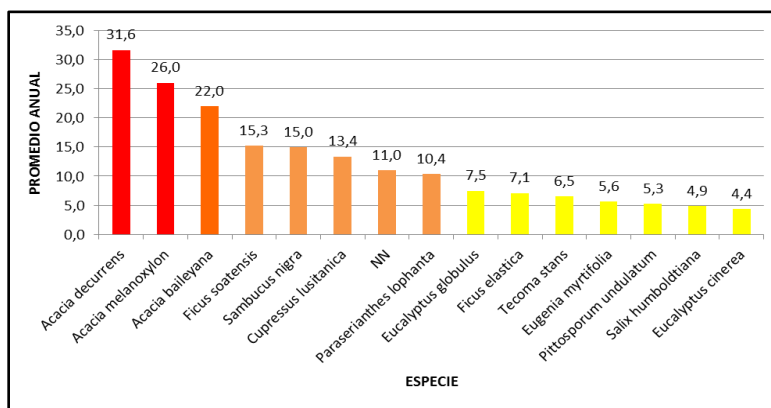


Figura 5. Histograma del Riesgo de volcamiento promedio anual por especie.

Modelo biometeorológico de volcamientos para la ciudad de Bogotá. Como resultado se obtuvo un error de predicción de 11,86% utilizando los datos de entrenamiento, y 13,83% con los datos de prueba. Esto quiere decir, que la capacidad del modelo de predecir un evento de volcamiento es de aproximadamente 86%. Dentro de las variables con mayor importancia relativa dentro del modelo se encuentran, el ángulo de inclinación, la altura total del árbol y el emplazamiento. A partir del modelo se creó un aplicativo mediante el software R, denominado “calculadora de riesgo de volcamiento de árboles en Bogotá” (Ver https://investigacion-ssffs.shinyapps.io/Calculadora_Riesgo_Volcamiento/), en donde se puede consultar la probabilidad de volcamiento de los árboles de acuerdo a sus variables dasométricas y meteorológicas.

Zonificación del riesgo de volcamiento. En la figura 6 se puede apreciar la zonificación obtenida mediante tres categorías a saber, riesgo alto, medio y bajo. La categoría de riesgo alto se presenta en emplazamientos de parques de barrio y anden con zona verde, representando el 2,3% del área de la jurisdicción, seguido del 6% en riesgo medio, y 91% con riesgo bajo.

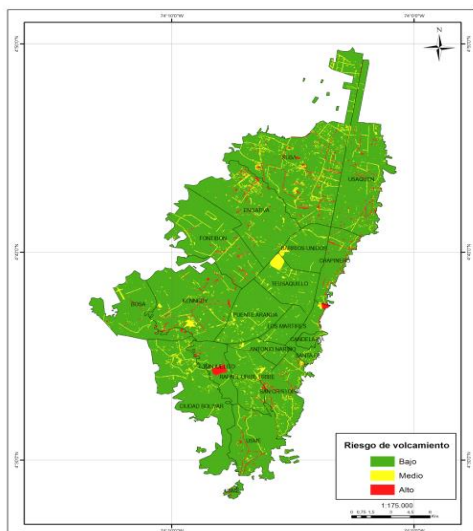


Figura 6. Zonificación del riesgo de volcamiento de árboles.

Umbrales de alerta. Los umbrales de alerta definidos de acuerdo con los datos meteorológicos diarios registrados en la base de volcamientos ajustada para las variables de velocidad del viento y precipitación se pueden apreciar en la tabla 1. Estos valores son considerados como detonantes en el fenómeno de volcamiento de árboles en la ciudad.

Tabla 1. Umbrales de alerta de acuerdo a datos meteorológicos diarios registrados en la base de volcamientos.

Categoría de Riesgo	Velocidad del viento (km/h)	Precipitación (mm)
Bajo	5,98	2,45
Medio	15,63	24
Alto	31,21	58

4. Discusión

Al analizar la base de datos de volcamientos generada se evidencia un patrón claramente establecido, en donde la mayor concentración de árboles caídos se presenta en la zona norte de la ciudad y disminuye gradualmente hacia el sur. Localidades como Suba y Usaquén presentan el mayor número de volcamientos promedio al año alcanzando hasta 52,1 eventos reportados.

El emplazamiento de parque de barrio en la ciudad es el que presenta la mayor susceptibilidad de volcamiento de árboles representando el 21,2% del total de eventos ocurridos desde el año 2011 a 2018, esto está directamente relacionado con las especies que se plantan en estos lugares, el tipo de suelo y factores meteorológicos como la precipitación y la velocidad del viento en un momento dado. Los parques de barrio, franjas de control ambiental, andenes con zona verde ancha y parques zonales son emplazamientos predominantemente permeables y cuando se encuentran expuestos a lluvias alcanzan su nivel de saturación rápidamente, lo cual ocasiona encharcamiento de las raíces, pudrición, proliferación de hongos y finalmente la desestabilización del árbol. Especies como *A. decurrens*, *C. lusitánica* y *T. stans* requieren de suelos con buen drenaje tal como lo señala Trujillo (2009) ya que son susceptibles a la pudrición de las raíces debido a hongos como *Armillaria sp.*

Caso contrario ocurre cuando los emplazamientos son predominantemente impermeables, allí el proceso de evaporación es interrumpido por las diversas estructuras que se encuentran alrededor de los árboles, esto ocasiona que la humedad se concentre en la parte superior del emplazamiento generando de esta manera un desplazamiento de las raíces a estas zonas ricas en agua. De acuerdo con Beltrán (1979) las raíces se extienden y extraen en un menor tiempo la mayor cantidad posible de agua lo que conlleva a la desecación y contracción del suelo. Lo que trae como consecuencia el colapso del emplazamiento y la caída de los individuos.

El modelo biometereológico, la calculadora y la zonificación de riesgo de volcamientos de árboles generada para la ciudad de Bogotá se convierten en herramientas invaluable para conocer las probabilidades de riesgo de caída de los individuos arbóreos que se encuentran en la ciudad a partir de las diferentes variables dasométricas, el emplazamiento, la especie y las variables climáticas como precipitación y velocidad del viento.

5. Conclusiones y recomendaciones

Las especies más susceptibles al volcamiento en la ciudad son, *A. decurrens*, *A. melanoxyton*, *A. baileyana*, *F. soatensis*, *S. nigra*, *C. lusitanica*, *P. Lophanta*, *E. globulus*, *F. elastica* y *T. stans*, representan el 63% del total de especies volcadas durante los años 2011 al año 2018.

El mayor número de árboles caídos se presenta en las localidades de Usaquén y Suba con un promedio anual de 53 y 41 respectivamente. Le siguen localidades como Engativá, Chapinero, Teusaquillo, Fontibón, Kennedy y Puente Aranda con promedios anuales que oscilan entre 27 y 11 árboles volcados.

El modelo biometeorológico entrenado a través de la técnica de redes neuronales artificiales permitió evaluar el riesgo de volcamiento de árboles para un dataset de entrenamiento compuesto por 2082 con una precisión del 88.14% y del 86.17% para un dataset de prueba compuesto por 918 árboles.

Las variables más importantes para explicar el riesgo de volcamiento de acuerdo al modelo biometeorológico son: ángulo de inclinación - AI (27%), Altura del árbol - H (22%) y Emplazamiento - EM (15%). Le siguen las variables de Altura de Copa - AC (12%), Especie - SP (9%) y Diámetro a la altura del pecho - DAP (7.5%). Las variables con menor influencia en el resultado del modelo son Diámetro de copa - DC (3.5%), Precipitación - R (2%) y Velocidad del viento - WS (1%).

Es necesario determinar los parámetros técnicos que favorezcan las condiciones vitales para el crecimiento y desarrollo adecuado de las especies, con el objetivo de evitar las malformaciones físicas de las mismas, así como el deterioro sanitario, que terminan desencadenando el volcamiento de sus estructuras o del individuo mismo, resultado directo de una inadecuada selección de emplazamientos o de especies con relación a los factores climáticos específicos de la zona de siembra al momento de realizar las plantaciones.

6. Referencias

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2010). Arbolado Urbano de Bogotá: Identificación, descripción y bases para su manejo. Bogotá: Scripto Gómez y Rosales Asociados Compañía LTDA.

Alexandersson H (1986) A homogeneity test applied to precipitation data. J Climatol 6(6):661–675. <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>

Alzate-Velásquez, D.F. (2017). RegRAIN: Method RegRAIN (MLR, Spline and IDW) for spatial interpolation of daily rainfall and air temperature data from climate stations. R package version 0.1.0.

Alzate-Velásquez, D.F., Araujo-Carrillo, G.A., Rojas-Barbosa, E.O., Gómez-Latorre, D.A., Martínez-Maldonado, F.E. (2018). Interpolación Regnie para lluvia y temperatura en las regiones Andina, Caribe y Pacífica de Colombia. Colombia Forestal 21: 102-118.

Beltran M., L. (1979). Evaluación de daños producidos por arboles ornamentales en pavimentos de la zona norte de Bogotá. Tercer simposio Colombiano sobre ingeniería de pavimentos. Cartagena.

Cendoya, P., & Muñoz, F. (2002). Modelamiento del efecto del viento sobre árboles jóvenes de Pinus radiata D. Don. Bosque (Valdivia), 23(2), 51-56.

Conceição, I., Samolão, R. & Santana, A. (2017). Proposal for a system of trees fall potential risk assessment in urban parks. Revista Árvore. 41(4)

Coutts, M. P. (1983). Root architecture and tree stability. Plant and Soil 71: 171-188.

Cubillos, A. (2017). Estimación de las variables de árboles de riesgo en un modelo de valoración económica del arbolado urbano de Bogotá (*tesis de posgrado*). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D. C., Colombia.

ESRI (2011). ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

Google. (s.f.). Mapa de Bogotá, Colombia en Google maps. Recuperado el 5 de Junio, 2019, de: <https://www.google.com/maps/place/Bogot%C3%A1/@4.6486259,-74.2478966,11z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x8e3f9bfd2da6cb29:0x239d635520a33914!8m2!3d4.7109886!4d-74.072092>

Guevara, M. (2014). Estudio para la identificación de individuos arbóreos con susceptibilidad al volcamiento en la ciudad de Bogotá (Bachelor's thesis, Universidad Militar Nueva Granada). Recuperado de <http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/11688>

Guijarro, J. A. (2011). User's guide to Climatol V2.0. An R contributed package for homogenization of climatological series (and functions for drawing wind-rose and Walter&Lieth diagrams), <http://webs.ono.com/climatol/climatol.html>, 2011.

Hall, Charles A.; Meyer, Weston W. (1976). "Optimal Error Bounds for Cubic Spline Interpolation". *Journal of Approximation Theory*. 16 (2): 105–122. doi:10.1016/0021-9045(76)90040-X

IDEAM, 2019. Promedios 1971-2000. IDEAM. Consultado el 18 de octubre de 2019.

Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2008, Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from <http://srtm.csi.cgiar.org>.

Moreno, D., Useche, D., & Balaguera, H. (2019). Respuesta fisiológica de especies arbóreas al anegamiento. Nuevo conocimiento sobre especies de interés en el arbolado urbano de Bogotá. *Colombia Forestal*, 22(1), 51-67.

Paulhus, J. Y Kohler, M. (1952). Interpolation of missing precipitation records. *Month. Weath. Rev.*, 80, 129-133.

Rauthe, M., Steiner, H., U., Riediger, A., Mazurkiewicz, A., & Gratzki, A. (2013). A Central European precipitation climatology—Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift*, 22(3), 235-256. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0436>

Refaeilzadeh P., Tang L., Liu H. (2009) Validación cruzada. En: LIU L., ÖZSU M.T. (eds) Enciclopedia de sistemas de bases de datos. Springer, Boston, MA.

Rivas, D. (2005). Planeación, espacios verdes y sustentabilidad en el distrito federal (Tesis de doctorado, Universidad Autónoma Metropolitana, México, DF)

Rivas & Mazón. (2018). *Redes neuronales artificiales aplicadas al reconocimiento de patrones*. Machala, Ecuador: UTMACH.

RStudio Team (2015). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.

Schindler, Bauhus, & Mayer. (2012). Wind effects on trees. *European Journal of Forest Research*. 131, 159-163.

Shepard, Donald (1968). "A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data". *Proceedings of the 1968 ACM National Conference*. pp. 517–524. doi:10.1145/800186.810616.

Thompson, L., & Troeh, F. (1988). *Los suelos y su fertilidad*. Barcelona, España: Reverté S.A.

Tovar, G. (2006). Manejo del arbolado urbano en Bogotá. *Colombia Forestal*, 9(19), 187-205.

Tovar, G. (2013). Aproximación a la silvicultura urbana en Colombia. *Revista Bitácora Urbano Territorial*, 22(1), 119-136.

Trujillo, Enrique. (2009). *Guía de reforestación*. Segunda edición. Bogotá: DAYBER.