

4. INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA



4.1. Generalidades

La hidrología y la gestión de los recursos hídricos de un país dependen, en gran medida, del conocimiento de las cuencas hidrológicas existentes, del potencial de estas y de la manera de gestionar adecuadamente los excedentes hídricos. En base al estudio de una cuenca es posible desarrollar un manejo hidrológico adecuado, siendo necesario registrar información a partir de estaciones de modo que se logren medidas consistentes de las variables hidrológicas. Actualmente existe una gran disponibilidad de sensores que registran información hidrológica con niveles de error aceptables.

El desarrollo tecnológico actual y de las últimas décadas nos lleva a usar los productos de los sensores remotos (satélite y radar) en la hidrología, por ejemplo, en la administración y planeamiento de las actividades de previsión y control de las crecidas e inundaciones. Asimismo, basado en la complejidad que tienen los sistemas naturales para su estudio, el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT) cada vez se hace más frecuente; puesto que en la mayoría de casos debemos realizar monitoreo, toma de muestras, etc. Estos procedimientos son muy complicados o de alto riesgo, por tanto, el uso de los VANT queda plenamente justificado.

4.2. Tecnología Satelital

4.2.1. Antecedentes Históricos

El Sputnik-1 fue lanzado desde Kazajistán —antes parte de la URSS— y su nombre, en ruso, significa “compañero de viaje”. Este hecho resultó un golpe para el gobierno estadounidense que se quedó absolutamente consternado, un país considerado por ellos tecnológicamente inferior los había superado. Era la primera vez que un artefacto construido por el ser humano se ponía en órbita alrededor de la Tierra. Lo que definieron los medios como “carrera espacial” daba su partida con esta hazaña soviética publicada en todos los periódicos del mundo el 4 de octubre de 1957. Los americanos respondieron ante este nuevo reto anunciando un refuerzo de su programa de investigación espacial (Fernández, 2005).

El artífice del primer satélite artificial lanzado al espacio fue el ingeniero aeronáutico Serguéi Korolev, un brillante científico soviético, varias veces condecorado por sus servicios. Sin él, se cree que la URSS no habría logrado tomar la delantera en los primeros años de la carrera espacial. El Sputnik-1 era una esfera de algo más de medio metro de diámetro con cuatro largas antenas telescópicas que superaban los dos metros de longitud. Tenía una masa en órbita de poco más de 80 kilos y contaba con dos transmisores de radio en sendas frecuencias. Entre sus objetivos estaban medir la densidad de electrones en la ionosfera terrestre y enviar otros datos como la temperatura vía telemetría a su centro de control ubicado en Moscú (Fernández, 2005).

Un mes más tarde, en noviembre, lanzaron el Sputnik-2 en el que viajaba la perra Laika, con alimento, agua y aire para varios días, e instrumentos para registrar sus reacciones biológicas. La opinión pública estadounidense no salía de su asombro y se preguntaba: “¿qué será lo próximo?”. Tendrían que transcurrir unos años más para que el programa estadounidense comenzara a dar frutos hasta llegar al primer puesto de privilegio, que en los cincuenta se encontraba en manos de la Unión Soviética, cuyo gobierno no perdió oportunidad y sacó partido a sus triunfos propagandísticos en el cosmos.

En diciembre de 1957, Estados Unidos contraatacó mediante el lanzamiento del cohete Vanguard con un satélite en el que llevaban trabajando desde 1955, cuando el presidente Eisenhower había seleccionado el proyecto Vanguard de la armada para la investigación espacial. Sin embargo, el artefacto estadounidense explotó en la rampa de lanzamiento. Un mes después se lanzó con éxito el satélite Explorer 1 utilizando un cohete que había diseñado Von Braun. Sus instrumentos científicos hicieron un gran descubrimiento: dos franjas de radiación sobre la atmósfera terrestre, los cinturones Van Allen.

En julio de 1958, el presidente Eisenhower estableció la National Aeronautics and Space Agency (Agencia Espacial y Aeronáutica Nacional, NASA) que reclutó a siete astronautas y contrató a Von Braun como ingeniero jefe. Cuando Moscú puso en órbita al primer hombre en 1961 —Yuri Gagarin—, ambos países habían sacrificado a muchos animales y la carrera espacial se había convertido en una obsesión nacional.

4.2.2. Sensores y Satélites

En hidrología los satélites se usan para determinar la precipitación, número de días sin lluvia, estimación de lluvia en los modelos hidrológicos, estimación de la humedad del suelo por satélite. Una serie de misiones de observación de la Tierra realizada por la ESA (European Space Agency) proporcionan gran cantidad de datos. Lanzado en 2009, el satélite SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity satellite) ha estado monitoreando la humedad del suelo y la salinidad de los océanos: dos variables claves del ciclo del agua de la Tierra. Mientras tanto, CryoSat, cuyo principal instrumento era SIRAL (SAR/Interferometric Radar Altimeter), tenía el objetivo de medir el espesor del hielo marino polar y vigilar los cambios en las capas de hielo en el manto de Groenlandia y la Antártida, proporcionando también información vital sobre los cambios en el nivel del mar. Los datos de gravedad del satélite GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) —que volvió a entrar en la atmósfera de la Tierra en 2013— hoy actúan como referencia y están siendo utilizados para hacer avances en nuestra comprensión de las corrientes oceánicas (ESA, 2016). Además, las misiones Sentinel (proyecto multi-satélite) para el programa Copernicus de la ESA están proporcionando información diaria sobre el hielo, masas de agua y la atmósfera. La Iniciativa del Cambio Climático de la ESA ayuda a abordar cuestiones relacionadas con el clima a través de la explotación de más de 30 años de datos de satélites, y sus proyectos se centran en diferentes variables climáticas, tales como gases de efecto invernadero, glaciares, hielo marino y la humedad del suelo.

ESA ejecuta una serie de proyectos centrados en el agua: la iniciativa TIGER entrena a las administraciones hidráulicas e investigadores africanos en la explotación de los datos de satélite y tecnología de observación de la Tierra para la gestión sostenible de los recursos hídricos; mientras que GlobWetland apoya la construcción de inventarios de humedales, así como el seguimiento y la evaluación de los ecosistemas de humedales con los datos de satélite. Con la colaboración de las organizaciones internacionales y la comunidad de usuarios, los jefes de las agencias espaciales acordaron continuar con el suministro de datos de espacio para la hidrología, y propondrán nuevas misiones para mejorar y complementar las medidas actuales en otros ámbitos relacionados con el medio ambiente y, específicamente, sobre el cambio climático.

Satélites de la NASA para el monitoreo de recursos hídricos («Landsat Missions Timeline», s. f.): Landsat: 07/1972 al presente; Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM): 11/1997 al 04/2015; Global Precipitation Measurements (GPM): 02/2014 al presente; Terra: 12/1999 al presente; Aqua: 05/2002 al presente; Soil Moisture Active Passive (SMAP): 01/2015 al presente; Gravity Recovery and Climate; Experiment (GRACE): 03/2002 al presente. Cada satélite lleva uno o más sensores/instrumentos con canales espectrales específicos para observar cantidades geofísicas (Figura 4.1).



Figura 4.1. Landsat- Satélites y sensores

En el campo de la hidrología, la misión Global Precipitation Measurement (GPM) es una red internacional de satélites que proporciona las observaciones globales de lluvia y nieve de la próxima generación. Sobre la base del éxito de la Misión de Medición de Lluvia Tropical (TRMM), el concepto de GPM se centra en el despliegue de un satélite "Core" que lleva un radar / radiómetro avanzado, el cual consiste en un sistema que mide la precipitación desde el espacio y sirve como un estándar de referencia para unificar las mediciones de precipitación de una constelación de satélites operacionales y de investigación (NASA, 2018a). A través de mediciones mejoradas de precipitación a nivel mundial, la misión de GPM está ayudando a comprender más el ciclo de agua y energía de la Tierra, mejorar el pronóstico de eventos extremos que causan desastres naturales y ampliar las capacidades actuales a fin de utilizar información precisa y oportuna de precipitación para beneficiar directamente a la sociedad.

Con respecto a GPM, iniciado por la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) como sucesor global de TRMM, éste comprende un consorcio de agencias espaciales internacionales, incluido el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES), la

Organización de Investigación Espacial de la India (ISRO), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT) y otros. El GPM Core Observatory se lanzó el 27 de febrero de 2014 a las 1:37 p.m. EST del Centro Espacial Tanegashima, Japón. (Figura 4.2).



Figura 4.2. GPM Constellation Status

4.2.3. Estaciones Terrestres

Las estaciones terrestres de los Estados Unidos en Dakota del Sur y Alaska, así también las que se encuentran en Noruega, Alemania y Australia, sirven como instalaciones primarias de captura de datos y telemetría, seguimiento y control (TT & C) para las misiones satelitales USGS Landsat (USGS, 2018). La estación terrestre Landsat (LGS) se encuentra en el Centro de Observación y Ciencia de los Recursos Terrestres (USGS) del Servicio Geológico de los EE. UU. (USGS) en Sioux Falls, Dakota del Sur. LGS es compatible con las misiones Landsat 7 y Landsat 8. La estación terrestre de Svalbard (SGS) se encuentra en las instalaciones de SvalSat en Svalbard, Noruega. SGS es compatible con las misiones Landsat 7 y Landsat 8. La estación terrestre de Alice Springs (ASN) se ubica en las instalaciones de Geoscience Australia en Alice Springs, Australia. ASN es compatible con las misiones Landsat 7 y Landsat 8. La estación terrestre del Polo Norte (NPA) se localiza en la estación de satélite del Polo Norte en Alaska. NPA apoya la misión Landsat 7. La estación terrestre de Neustrelitz (NSN) se halla en las instalaciones del Segmento Nacional de Tierra en Neustrelitz, Alemania,

y apoya la misión Landsat 8. La estación terrestre de Gilmore Creek (GLC) se encuentra en la instalación de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) cerca de Fairbanks, Alaska. GLC es compatible con la misión Landsat 8. (Figura 4.3).



Figura 4.3. Estaciones de la red terrestre de Landsat

4.2.4. Modelos de Sistemas Terrestres

Los modelos del sistema terrestre brindan información de valor añadido, basada en la fórmula que incluye: Percepción remota + Observaciones en la superficie + Modelos numéricos. (Figura 4.4) (NASA, 2018b).



Figura 4.4. Modelos de sistemas terrestres

Los modelos de la NASA que son útiles para la gestión de recursos hídricos (modelos atmósfera-océano-tierra) son:

- GEOS-5: The Goddard Earth Observing System Version 5 – Sistema Goddard de observación terrestre, versión 5.
- MERRA: Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Application – Análisis retrospectivo en la era moderna para investigación y aplicación.
- GLDAS: Global Land Data Assimilation System – Sistema de asimilación de datos terrestres globales.

El Global & North American Land Data Assimilation Systems, entre sus principales características tiene:

- (a) Integra observaciones terrestres y satelitales dentro de modelos numéricos sofisticados para producir campos físicamente consistentes de alta resolución de estados y flujos de la superficie terrestre.
- (b) Usa datos de MODIS, TRMM, GEOS.
- (c) El GLDAS y una versión del NLDAS usan el LIS (Land Information System) con diferentes fuentes de insumos; Análisis meteorológico; Radiación solar superficial; Precipitación; Textura del suelo; Clasificación de vegetación e índice de área de follaje y Topografía.
- (d) Rendimiento integrado para recursos hídricos, en cuanto a Humedad del suelo, Evapotranspiración, Escorrentía superficial/subterránea y Equivalente en agua de la nieve.

Los satélites tienen diferentes aplicaciones, por ejemplo, miden lo siguiente: Cantidad de lluvia (TRMM, GPM); Manto de nieve (Terra y Aqua MODIS); Humedad del suelo (SMAP, GLDAS); Evapotranspiración (Terra y Aqua MODIS, Landsat, GLDAS); Escorrentía/Flujo torrencial (TRMM, GPM, GLDAS).

4.2.5. Aplicaciones de Datos Satelitales

Las aplicaciones de los datos satelitales en la gestión del uso del agua son diversas, entre ellas tenemos: Asignación de agua, vía presupuesto hídrico; Gestión agrícola y de irrigación, con datos de precipitación, humedad del suelo y evapotranspiración; Gestión de inundaciones/ sequía, usando datos de precipitación, escorrentía/flujo

torrencial, humedad del suelo, evapotranspiración y aguas subterráneas; Gestión de reservorios/represas, con datos de altura de embalses, precipitación, esorrentía/ flujo torrencial.

Algunos de los casos representativos de las aplicaciones de datos satelitales son:

- (a) El monitoreo del equilibrio hidrológico en la cuenca del Nilo, usando las capacidades de las observaciones y los sistemas de modelado de la NASA (Figura 4.5) (Zaitchik, 2018).

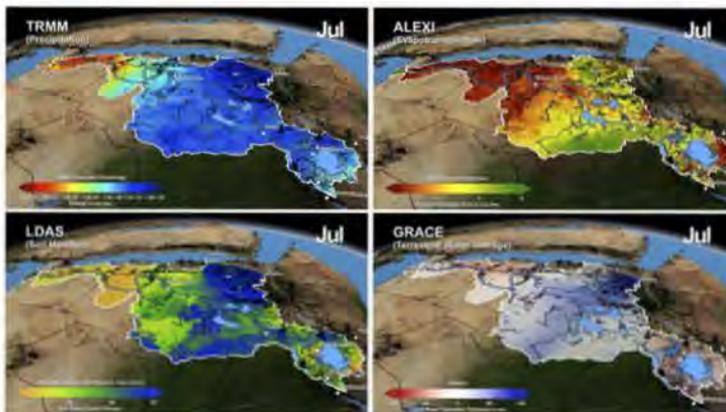


Figura 4.5. Monitoreo de la cuenca del río Nilo

- (b) Equilibrio hidrológico en escala en la cuenca del Nilo, basado en TRMM, ALEXI, LDAS y GRACE (Figura 4.6) (Zaitchik, 2013).

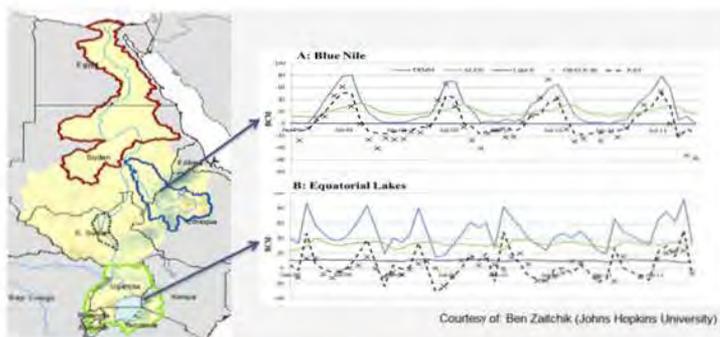


Figura 4.6. Equilibrio hidrológico en la cuenca del Nilo

- (c) Gestión de la irrigación usando la ET satelital, basada en el sistema "Terrestrial Observation and Prediction System" (TOPS) (Figura 4.7).



Figura 4.7. Sistema de administración de riego

- (d) Una herramienta de apoyo para decisiones de monitoreo de sequía en la nación Navajo, basada en TRMM y GPM. La nación Navajo ha sido impactada por sequías severas, falta de infraestructura hídrica doméstica, insuficiencia de recursos económicos. Aproximadamente $\frac{1}{3}$ de la población carece de acceso a agua potable en casa. Se creó una base de "geodatos" de información climática histórica específica para esta área. Se combina mediciones de GRACE del almacenamiento del agua con datos meteorológicos y se generó mapas de porcentaje de aguas subterráneas y de la humedad del suelo desde el año 1948 hasta el presente (Figura 4.8).

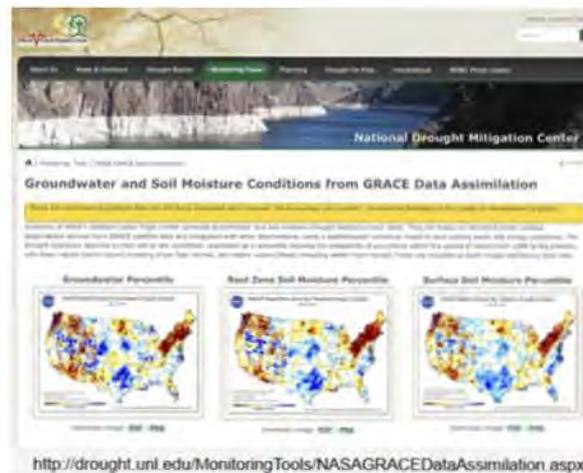


Figura 4.8. Mapas de sequías en Navajo

- (e) Detección de lluvia extrema, humedad relativa del suelo e inundaciones. Se logró determinar información relevante sobre las Inundaciones en Carolina del Sur (EE.UU.) de 2015, basada en GPM y Global Flood Monitoring System (GFMS) (Figura 4.9).

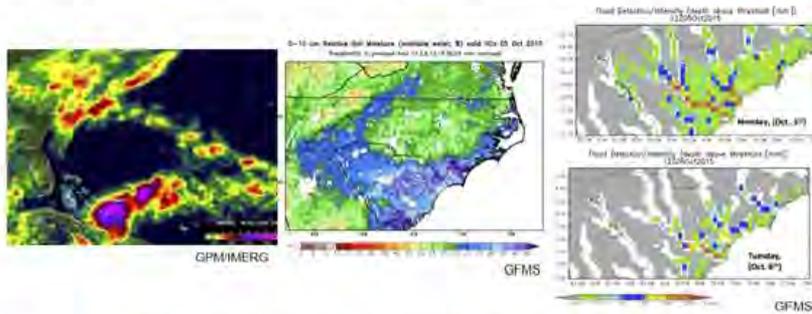


Figura 4.9. Mapa inundaciones en Carolina del Sur (EEUU)

- (f) Amazonas: satélites de la NASA captan la gravedad de las sequías. Un estudio financiado por la NASA, a partir de información satelital, mostró una importante reducción en el verdor de la cuenca del Amazonas, producida por la sequía récord de 2010 (Clarín.com, 2010). La sensibilidad de la selva amazónica a la sequía es un tema que preocupa a los científicos. Un equipo de profesionales estadounidenses y brasileños, liderado por el doctor Liang Xu, de la Universidad de Boston (EE.UU.), recoge en su trabajo conclusiones que señalan que, ante un mayor estrés de humedad derivado del calentamiento global, los bosques tropicales podrían ser reemplazados por sabanas.

4.3. Vehículos No Tripulados

4.3.1. Antecedentes Históricos

No despertamos ayer en este nuevo mundo presa de los drones o aeronaves pilotadas de forma remota. Hay una serie de hechos históricos y figuras relevantes que poco a poco fueron dando forma a lo que hoy conocemos como una nueva manera letal de matar a distancia y que además ha originado el crecimiento del drone o unidades no tripuladas como una tecnología potente a desarrollar también en el sector civil (eldrone,2016).

La idea del avión no tripulado es antigua. Aunque a menudo asociamos los drones con los robots militares de hoy, de una forma u otra, los aviones no tripulados se han utilizado durante décadas. Uno de los primeros usos registrados corresponde a los austriacos en julio de 1849, después de que se pusieran en marcha alrededor de doscientos globos aerostáticos no tripulados montados con bombas en la ciudad de Venecia (Figura 4.10). Menos de dos décadas después de la Guerra Civil en EE.UU, fuerzas de la Confederación y de la Unión volaban globos para misiones de reconocimiento. En 1896 Samuel P. Langley desarrolló una serie de aeronaves a vapor, aviones sin piloto que consiguieron trasladarse con éxito a lo largo del río Potomac, cerca de Washington DC (eldrone, 2016). La práctica de la vigilancia aérea más tarde surgió en la guerra hispanoamericana de 1898, cuando los militares de EE.UU. equiparon una cámara a una cometa, dando lugar a una de las primeras fotografías de reconocimiento aéreo.



Figura 4.10. Globos aerostáticos no tripulados

Las aeronaves no tripuladas nunca hubieran sido posibles sin grandes avances tecnológicos como la radio. Nikola Tesla demostró por primera vez el mando a distancia o radio control de un vehículo, al final del siglo XIX. En un estanque en el Madison Square Garden de Nueva York en 1898, el inventor y showman controlaba a distancia un barco con una señal de radio. En 1916, la idea de las armas guiadas de forma remota despertó el interés del capitán Archibald M. Low, de la Royal Flying Corps en el Reino Unido que supervisó la construcción de una serie de aviones dirigidos por control remoto que fueron equipados con explosivos.

Durante la Primera Guerra Mundial el inventor del giroscopio, Elmer Ambrose Sperry, desarrolló una plataforma de aeronaves sin piloto con un dispositivo para lanzar torpedos con una catapulta. Una publicación del New York Times de 1926 apunta a que estas aeronaves eran guiadas con gran precisión y que después de una distancia predeterminada giraban y volaban hacia abajo en vertical, con una carga tal de TNT capaces de volar una población entera (Figura 4.11).



Figura 4.11. El avión automático Hewitt-Sperry

A lo largo de los años veinte, se utilizaron varios buques controlados a distancia para la formación de unidades de artillería. La década de 1930 vivió una oleada de interés militar en vehículos a control remoto, entre los cuales surgió la segunda generación "Bug".

Durante la Segunda Guerra Mundial el asunto se trató de forma diferente, a mediados de la década de 1940 se registró el desarrollo del GB-1 Glide: sistema de bombardeo aéreo ideado para eludir las defensas aéreas alemanas (Figura 4.12). A finales de 1946 un programa de la Fuerza Aérea de EE.UU. fue aprobado para desarrollar tres tipos de aviones no tripulados para su uso como objetivos de formación (Figura 4.13).



Figura 4.12. Avión bomba GB-1 Glide



Figura 4.13. El famoso Firebee de la compañía Ryan

En mayo de 1964, EE.UU. comenzó a considerar el envío de aviones no tripulados para reemplazar sus U-2 en misiones de espionaje (Figura 4.14). En 1970 se decidió que era el momento oportuno de los vehículos teledirigidos (RPVs). La Fuerza Aérea puso en marcha un programa que aumentara las capacidades de alcance y de vigilancia electrónica de las RPV. El programa consistió en la financiación de las compañías Boeing y Ryan para desarrollar aviones no tripulados resistentes que volaran a gran altitud (Figura 4.15).



Figura 4.14. Aeronave icónica en la guerra de Vietnam



Figura 4.15. Modelo Aquila RPV-drone

Únicamente con el profundo desarrollo en computación y sistemas de control electrónico durante los años 80 y 90, los drones del presente fueron tomando forma. Y no sería hasta finales de los 90 cuando las fuerzas aéreas americanas comenzaron a tratar los aspectos técnicos que llevaron a dotar a estos de drones de misiles (Figura 4.16).



Figura 4.16. F-4 Phantom

La CIA había empezado a volar drones en Afganistán desde el año 2000, pero fue solo a partir de los atentados del 11 setiembre que empezarían los vuelos de drones armados. Algunos se usaron a finales de 2001 contra los talibanes, y desde el año 2002 su empleo se dio sin que resultase un apoyo explícito al ejército (Figura 4.17).



Figura 4.17. MQ 9 Reaper Drone

4.3.2. Tipos de Vehículos No Tripulados

El uso de los vehículos aéreos no tripulados (VANT), también conocidos como "drones", tiene el propósito de realizar mediciones en hidrología, implementando y adaptando la tecnología que ya existe. Así, al sobrevolar un río con el VANT instrumentado con distintos sensores, se pueden generar condiciones de contorno y solución inicial para modelos numéricos de flujo superficial, cuyo resultado final sería diversas mediciones como el caudal, pendiente hidráulica o la rugosidad del cauce. Esto permitirá generar información hidrológica en tiempo real, o en pos proceso (MILENIO, 2017). El término "dron", palabra adoptada en español como sinónimo del término inglés "drone" o zángano, se

empezó a utilizarse en el mercado militar para designar vehículos aéreos no tripulados; hoy en día la generalización del término engloba todo tipo de vehículos no tripulados y con el paso del tiempo estas plataformas han dado un enorme salto y se han empezado a extender en todo tipo de aplicaciones civiles (Dpto. Comunicación, 2015).

Los VANT denominados drones pueden ser aéreos, terrestres o acuáticos; en cualquiera de sus diversificaciones, estos equipos se encuentran en constante evolución y su aplicación se ha extendido a los diferentes campos del conocimiento, especialmente en las ciencias e ingenierías. En el caso específico de la hidrología —tema que abordamos en este libro— su uso es muy difundido y en nuestros días tienen múltiples aplicaciones. En definitiva, los avances en la electrónica, la robótica y otros campos son la base fundamental para el desarrollo de los VANT. Las aplicaciones se definen en función a la complejidad de los medios naturales que se quiere estudiar. Es importante señalar que estos equipos pueden usarse para monitoreo, detección de elementos, etc. (Figura 4.18), (Figura 4.19), (Figura 4.20)



Figura 4.18. Drones terrestres



Figura 4.19. Drones acuáticos



Figura 4.20. Drones híbridos

4.3.3. Clasificación de los drones

Los drones se pueden clasificar desde diferentes perspectivas: por el uso, por el tipo de control o por su forma.

En cuanto al uso, podemos encontrar (a) Drones militares: Suelen ir armados y con capacidad de bombardeo, aunque en algunas ocasiones se utilicen exclusivamente para espionaje. (b) Drones civiles: Son aquellos que no tienen uso militar y a su vez pueden dividirse en drones de uso comercial, para la venta de servicios como la fotogrametría, multimedia, etc.; drones para aficionados que los emplean como hobby; drones de uso gubernamental, para las fuerzas del Estado, bomberos, rescate, etc.

Por el tipo de control que utilizan, pueden ser: (a) Autónomo: El cual no necesita de un piloto humano que lo controle desde tierra, pues se guía por sus propios sistemas y sensores integrados. (b) Monitorizado: En este caso sí requiere de un técnico humano, cuya labor es controlar el feedback del dron e proporcionar información; el dron dirige su propio plan de vuelo, sin embargo, el técnico, a pesar de no poder controlar los mandos directamente, sí puede decidir qué acción llevará a cabo. Este sistema es habitual en labores de agricultura de precisión y fotogrametría. (c) Supervisado: Un operador lo pilota, aunque este puede realizar algunas tareas autónomamente. (d) Preprogramado, sigue un plan de vuelo diseñado previamente y no tiene medios de cambiarlo para adaptarse a posibles cambios. (e) Controlado remotamente (R/C), es pilotado de modo directo por un técnico mediante una consola.

En cuanto a su forma, tenemos (a) Multirrotores (Figura 4.21), los más extendidos actualmente. Se componen de varios motores

independientes situados en los extremos del aparato, y, según el número de motores suelen clasificarse en tricópteros, cuadricópteros, hexacópteros y octocópteros. El uso de estos drones es mayor debido a su gran estabilidad, así como a la facilidad y cantidad de maniobras que consiguen realizar, además de poder volar estáticamente en el lugar que le indiquemos. No obstante, su desventaja es el gran consumo de energía que necesita para mantener el vuelo y su breve autonomía, la cual acostumbra durar entre los 15 y los 30 minutos. Estos drones son ideales en el sector audiovisual y en la inspección industrial.



Figura 4.21. Drone tipo multirrotor hexacóptero

(b) Helicópteros (Figura 4.22), su forma es la de un helicóptero convencional, pero de tamaño pequeño. Está compuesto de un solo motor principal, lo que le otorga gran capacidad de carga y autonomía. Existen modelos de combustión interna que pueden volar durante 1 hora sin necesidad de repostar combustible. No obstante, su complejidad tanto a nivel mecánico como de control los ha hecho menos accesibles y en razón a ello son los menos utilizados. Resultan ideales para fotogrametría, vigilancia o agricultura de precisión.



Figura 4.22. Drone Tipo Helicóptero

(c) Ala fija (Figura 4.23), son aquellos cuya fisonomía es similar a la de un aeroplano, está estructurado en base a un cuerpo principal unido a dos alas que le permiten planear y un rotor en cola, cuya propulsión puede ser eléctrica o de combustión. Sin duda es el más eficiente, aerodinámicamente hablando, y el que mayor autonomía de vuelo tiene. Por otro lado, existe el inconveniente de que son quienes menor carga pueden llevar, además, tienen menos agilidad de maniobras ya que no pueden permanecer inmóviles y necesitan una gran superficie para despegar o aterrizar. Sin embargo, su gran autonomía también lo convierte en un candidato ideal para las labores de fotogrametría y agricultura de precisión.



Figura 4.23. Dron Tipo Ala Fija

4.3.4. Drones en la Hidrología

Esta tecnología, desarrollada originalmente para actividades bélicas, ahora es utilizada en aplicaciones civiles y de apoyo a la gestión de los recursos hídricos. Los llamados drones, o vehículos aéreos no tripulados, han llegado a ser muy rentables en el suministro de información útil y actualizada sobre los recursos hídricos y su infraestructura.

Las imágenes de satélite se vienen utilizando en la gestión del agua durante décadas a fin de realizar una variedad de tareas, tales como los inventarios de uso de la tierra o la cartografía de daños después de inundaciones. En la actualidad, los gestores del agua utilizan esta información espacial para prevenir o cuantificar todo tipo de parámetros relacionados con el uso del agua, las sequías, las inundaciones, etc. Para muchas de estas aplicaciones, la teledetección satelital no resulta del todo óptima, pues a menudo se ve obstaculizada por las nubes, unas resoluciones espaciales reducidas y una escasa frecuencia de paso. Hoy

en día, la adquisición de los datos de campo está igualmente restringida por limitaciones de acceso, el elevado coste de las campañas o el instrumental de campo. Esto convierte a los pequeños aviones no tripulados que pueden volar de forma autónoma —conocidos como drones— en una herramienta muy útil, cuya facilidad para capturar datos de imagen permite que las operaciones se planifiquen de manera más flexible y rápida, lo cual garantiza que los productos de imagen estén disponibles en un tiempo relativamente prudente. Gracias a su baja altitud de vuelo, los drones pueden volar incluso bajo las nubes pesadas (iAgua, 2015); y, equipados con una cámara de alta resolución u otro tipo de sensores, cierran la brecha entre los laboriosos estudios de campo y la teledetección satelital. Su creciente éxito radica en el hecho de que las soluciones aportadas por la industria del sector se están convirtiendo en rentables. Además, la tecnología ha llegado a una etapa que posibilita que los usuarios puedan centrarse en las aplicaciones directas y en la extracción de información útil a partir de las imágenes.

En estos últimos años, los drones se usan para la inspección de diques en los Países Bajos; pues se sabe que, en países con superficie significativa por debajo del nivel del mar, pueden supervisar sus estructuras de control con inspección visual en intervalos regulares. Asimismo, en la agricultura de precisión es habitual el uso de drones con la finalidad de obtener información sobre oportunidad adecuada de riego, siembra, fertilización y cosecha. Se usan sensores para tomar datos espectrales y convertir información semiautomática en útil para el desarrollo de la agricultura. Así también, pueden promover una gestión óptima de las reservas naturales. Otra importante aplicación de los drones es el monitoreo de glaciares que juegan un papel crucial en la conservación de los recursos hídricos en el espacio y tiempo.

En términos generales, los drones pueden ser utilizados en los estudios del agua, detección y caracterización de contaminantes oceánicos y continentales, estudio de sedimentos en lagos y pantanos como en zonas costeras y oceánicas, estudios de corrientes marinas.

Es importante señalar las ventajas que tienen los drones respecto a los aparatos tripulados, siendo estas: (a) Reducción del riesgo en trabajos dentro de ecosistemas peligrosos. (b) Reducción tiempo-respuesta para acudir a lugares en emergencia. (c) Reducción de costos, puesto que usa energía renovable o recargable. (d) Contaminación nula o casi nula, dependiendo del tipo de energía que utilice el dron. (e) Facilidad de

acceso a lugares antes inaccesibles. (f) Capacidad de ofrecer a los expertos un panorama más amplio del lugar de emergencia.

4.4. Modelación de Sistemas Hidrológicos

4.4.1. Antecedentes Históricos

La historia de la modelización de los sistemas hidrológicos está vinculada a la aparición y evolución de las computadoras, a los sistemas operativos de fácil utilización, a los programas informáticos de aplicación y a las técnicas de adquisición de datos. La generalización del uso de computadoras y el desarrollo de métodos numéricos para fines informáticos han permitido a los hidrólogos realizar cálculos complejos y repetitivos con grandes cantidades de datos (Beven, 1989). La mayoría de las aplicaciones actuales de los modelos basados en la física los utilizan como modelos conceptuales concentrados en la escala de la grilla. Los documentos recientes sobre dichos modelos han malentendido y tergiversado estas limitaciones. Hay problemas hidrológicos prácticos que requieren predicciones basadas en la física.

La modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el estudio de avenidas que se ha extendido por todo el mundo, fundamentalmente en países desarrollados. En la actualidad, con el empleo de estos modelos, se realiza el análisis y la prevención de las inundaciones; además, es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la ordenación del territorio en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia. Incluso, alertar a los servicios de protección civil y establecer protocolos de actuación ante posibles situaciones de peligro por intensas lluvias (Estrada et al., 2012).

Al pasar de los años se han utilizado los modelos globales o agregados que consideran la cuenca como una sola entidad, se asume una única entrada de lluvia (lluvia promedio), donde el caudal de salida se reproduce a partir de una dinámica global del sistema. Existen multitud de modelos globales, generalmente basados en el concepto del hidrograma unitario HU, el cual se puede integrar dentro de la teoría de sistemas que define a la cuenca como un sistema lineal, casuístico e invariante en el tiempo, donde solo una parte de lluvia efectiva produce

escorrentía, afectada por los procesos de evaporación, retención e infiltración que se recogen dentro de la función de pérdidas o función de producción (Corral, s. f.).

Esta forma de modelar tiene base física insuficiente, obvia el hecho de que parte de la escorrentía superficial puede infiltrarse al pasar por un cauce permeable, y subestima el componente subsuperficial del caudal. Además, la identificación del HU no es sencilla.

En los años 60, aparecieron unos modelos que podríamos denominar modelos agregados con base física. Estos consisten en una sucesión de elementos conceptuales interconectados que representan la respuesta de diferentes subsistemas del ciclo hidrológico (evaporación, escorrentía en medio saturado, escorrentía superficial en canal). No obstante, aun cuando el número de parámetros involucrados era muy grande, la descripción todavía resultaba demasiado elemental haciendo que no existiese mucha diferencia entre este tipo de modelos y los modelos conceptuales agregados (Beven, 1989).

A partir de los años 70, surgió un tipo de modelos con un planteamiento totalmente diferente a los de base física. Estos extraen la información que hay entre las entradas y las salidas del sistema, y la estructura del modelo se adapta a dichos datos. De ahí que se denominasen modelos de caja negra. Los primeros en aparecer fueron los modelos autorregresivos basados en el análisis de series temporales («Modelos Hidrológicos aplicados a la previsión y alerta de crecidas», s. f.). Actualmente existe una línea de trabajo sustentada en los modelos de redes neuronales artificiales, con la posibilidad de aprendizaje conforme haya un mayor número de datos que permitan la introducción de múltiples entradas (lluvia, temperatura, humedad, datos históricos de caudal). Si bien es cierto que han existido casos con buenos resultados, todavía queda un largo camino que nos revele toda la capacidad de este tipo de modelos.

Aún no resultan claros los criterios en que se puede basar la construcción de la estructura del modelo, lo cual dificulta su utilización en otras cuencas sin datos y la regionalización de los parámetros (Gómez & Rodríguez, 2012). Ahora bien, la tecnología actual permite conocer exhaustivamente ciertas variables con una buena resolución espacial, teniendo la posibilidad de tratar mucha información en un tiempo reducido y de manera operativa. Eso hace pensar que un modelo de este

tipo podrá ofrecer mejores resultados. Los denominados modelos distribuidos incorporan mejor aproximación de la distribución espacial de las diferentes variables y reproducen con mayor fidelidad los procesos que tienen lugar dentro de la cuenca. Los modelos distribuidos con base física describen con gran detalle los procesos hidrológicos de la cuenca, proponiendo la descripción de los fenómenos a escala fina (100-500m), donde se plantean las ecuaciones características de los diversos procesos e integran las salidas de los diferentes procesos de cada celda con las vecinas. Así derivan en modelos muy complejos que requieren una gran cantidad de información y, por lo menos hasta el momento, la calibración de un número enorme de parámetros en caso de no poder estimar todas las variables a partir de medidas de campo.

Las posibilidades actuales ofrecen una línea a medio camino entre los dos extremos. Los denominados modelos de parámetros distribuidos se caracterizan por la división de la cuenca en subunidades menores más homogéneas, donde se aplica un modelo global. La respuesta global de la cuenca se compone a partir de las contribuciones de las diferentes subunidades (Corral, s. f.). Una primera clasificación, en este tipo de modelos, podría darse por la manera de hacer la división en subunidades (Figura 4.24). Esta puede ser en subcuencas o en subunidades artificiales, siguiendo algún criterio establecido.



Figura 4.24. División de una cuenca y conceptualización de la red de drenaje en subcuencas (izquierda) y en subunidades artificiales (derecha).

4.4.2. Tipos de Modelos

Se puede clasificar los modelos hidrológicos desde distintos puntos de vista. De acuerdo con la conceptualización de los procesos básicos

tenemos empíricos, conceptuales o basados en procesos; de acuerdo con la naturaleza de los algoritmos básicos pueden ser determinísticos o estocásticos; y, finalmente, de acuerdo con su representación espacial se clasifican en agrupados o distribuidos. Las aplicaciones de las herramientas de modelado cubren una amplia gama de áreas relacionadas con el agua tales como control de inundaciones, pronóstico de inundaciones, riego y drenaje, morfología de ríos, transporte de salinidad y sedimentos, hidráulica costera, gestión de puertos, costas y estuarios, evaluación de impacto ambiental, puente hidráulico e infraestructura relacionada («Institute of Water Modelling», 2018). En estos tres grupos es posible encontrar la gran cantidad de modelos que se usan en hidrología.

- (a) Los modelos por conceptualización de procesos básicos
- Si el modelo funciona como una relación calibrada entre entradas y salidas, recibe el nombre de modelo "de caja negra", empírico o de regresión. El cual se basa en relaciones entrada-salida, sin ningún intento de describir el comportamiento causado por procesos individuales. Dentro de este tipo podemos mencionar al método Kostiaikov y Green Ampt (para estimación de infiltración), método racional y método de la curva número (generación de caudales), y, especialmente, los modelos estocásticos de series de tiempo.

 - En el extremo opuesto se encuentran los modelos "de caja blanca" (también llamados "de base física" o "teóricos"), en los que se conocen todos los procesos involucrados en la transformación. Estos modelos se apoyan en ecuaciones físicas que representan todos los procesos involucrados en el fenómeno a simular, haciendo innecesario el proceso de calibración; sin embargo, la falta de suficiente información relativa a los procesos que se desarrollan en el suelo, en el subsuelo y en la vegetación (entre otros), genera incertidumbre y la calibración se vuelve necesaria («Watershed Modelling», 2018). Asimismo, suele hablarse de modelos "conceptuales" o "de caja gris" cuando se trabaja con aquellos en los cuales se conocen algunos de los procesos internos del modelo. En general, los modelos conceptuales consideran leyes físicas en forma simplificada. (Figura 4.25)

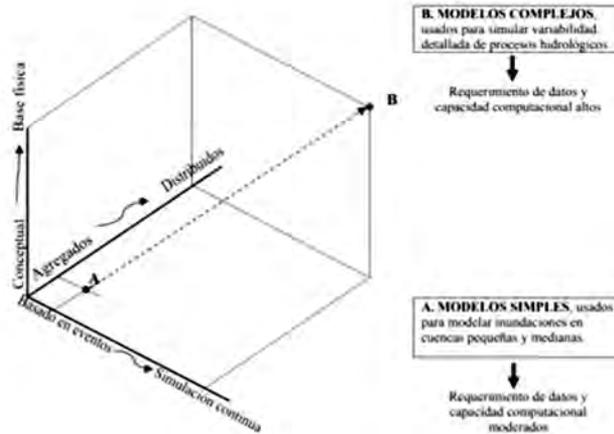


Figura 4.25. Relación entre las características espacio-temporales de modelos hidrológicos y su conceptualización de procesos básicos

- (b) De acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos
- Un modelo formal puede escribirse como una expresión simbólica en términos lógicos de una situación idealizada, compartiendo las propiedades estructurales del sistema original (Chong-Yu Xu, Kitterod & Ejigu Eregno, 2013). Estos expresan el comportamiento del sistema por un conjunto de ecuaciones. Si alguna de las variables es considerada como variable aleatoria (con una distribución de probabilidad), entonces el modelo es llamado "estocástico"; dicho término enfatiza la dependencia temporal de las variables hidrológicas relacionadas por el modelo. Si todas las variables se consideran libres de la variación aleatoria, de modo tal que ninguna tiene una distribución probabilística, entonces el modelo es considerado como determinístico. (Figura 4.26).

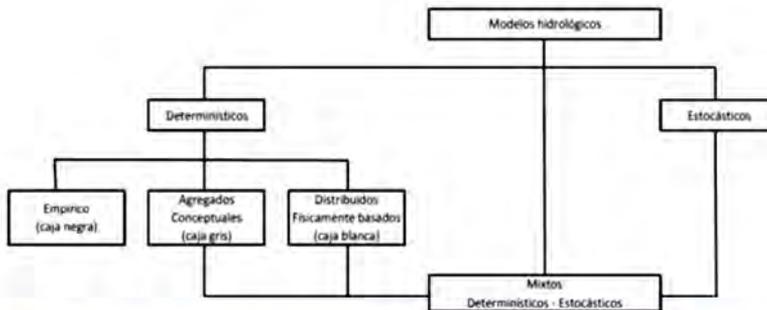


Figura 4.26. Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza de los algoritmos

- (c) De acuerdo a su representación espacial
- Una de las principales limitaciones en la modelación de cuencas es el desconocimiento de las propiedades del suelo y de los procesos involucrados en los flujos sub superficial y subterráneo. Esta limitación es superada si se asume que la cuenca es homogénea, tanto en sus procesos superficiales, como en los sub superficiales y subterráneos; afirmación que es válida para cuencas muy pequeñas. Siendo la cuenca homogénea, se puede representarla como un único elemento de características constantes, dando lugar a los llamados "modelos agregados" o "agrupados".
 - A medida que el tamaño de la cuenca se incrementa, existe mayor probabilidad de que los tipos de suelo y sus características varíen a lo largo y ancho de la cuenca y el uso de este tipo de modelo vaya perdiendo representatividad. Es así como a mayores áreas, se puede discriminar zonas de similar comportamiento hidrológico (HRU) y analizar cada una de ellas de forma independiente para luego combinar y/o superponer sus efectos. Estos son los llamados modelos "semi distribuidos" (Chong-yu Xu, 1999).
 - A pesar que los modelos semi distribuidos representan mejor las posibles variaciones de las características del suelo, efectos de pendiente, entre otros, aun así, representa una simplificación. Con el fin de alcanzar la mayor representatividad, la cuenca se divide en elementos mucho más pequeños, de geometría usualmente uniforme, llamados "grillas". Estos modelos son denominados "modelos distribuidos" y realizan un balance hídrico en cada grilla, transmitiendo su efecto a las grillas adyacentes (Chávez-Jiménez et al, 2018).



Figura 4.27. Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a su representación espacial.
a) Modelo agregado. b) Modelo Semidistribuido. c) Modelo Distribuido