

Cálculo de caudales en alcantarillas (parte primera: la lluvia) (*)

Por RAMON VAZQUEZ GARCIA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Sociedad General de Aguas de Barcelona, S.A.

Durante los últimos veinte años ha tenido lugar un desarrollo importante de los conceptos teóricos utilizados en el cálculo de redes de alcantarillado. La ingeniería española ha sido prácticamente impermeable a este flujo de conceptos y métodos, situándonos en este momento en un desfase de magnitud temporal aproximada a la citada. Se ofrece en una serie de tres artículos, que aparecerán consecutivamente en esta revista, una visión fundamental de los elementos que sirven para el diseño y análisis de redes de alcantarillado. El título de las tres partes es: "Lluvia", "Escorrentía" y "Propagación". No se pretende dar reglas prácticas de cálculo, sino hacer una reflexión sobre los fenómenos implicados que puede servir para consolidar criterios ingenieriles. Para aquellos que se asoman por primera vez al mundo de la hidrología urbana, pueden servirle estos artículos como invitación a desarrollar sus conocimientos de ingeniería civil en el dominio del drenaje urbano.

1. LLUVIA

1.1. El agua en la atmósfera

El vapor de agua que escapa como promedio de la superficie de la Tierra hacia la atmósfera supone alrededor de 1.000 mm al año. La velocidad a la que el agua se evapora depende de la disponibilidad de agua en la superficie, de la presión de vapor existente sobre la masa de agua, de la humedad del aire en contacto con ella y de la velocidad con la que el aire se mueve sobre la superficie del agua. Ello hace que los océanos evaporen más agua que las masas continentales y que en el hemisferio Sur se evaporen como promedio unos 120 mm más que en el Norte.

La cantidad de agua presente en la atmósfera depende de un modo ciertamente complejo de la velocidad de evaporación y de los movimientos en la atmósfera. Teóricamente, un kilogramo de aire seco a 1.000 mb de presión puede contener, a una temperatura de 55°C que es prácticamente récord de observación, un total de 117 gramos de vapor de agua. Este es un valor lejano de los valores habituales en el hemisferio Norte que se

sitúan en torno a una décima parte de ese valor en verano y una cincuentaava parte en invierno.

Observaciones troposféricas (la parte de atmósfera inmediata a la superficie terrestre) muestran que la temperatura disminuye a medida que es mayor la distancia a la superficie terrestre, aparentemente de forma exponencial, alcanzando un valor mínimo en la tropopausa. Puesto que la máxima cantidad de vapor de agua que puede contener un volumen determinado de aire decrece con la disminución de temperatura, el contenido de vapor de agua en el aire decrece con la altura

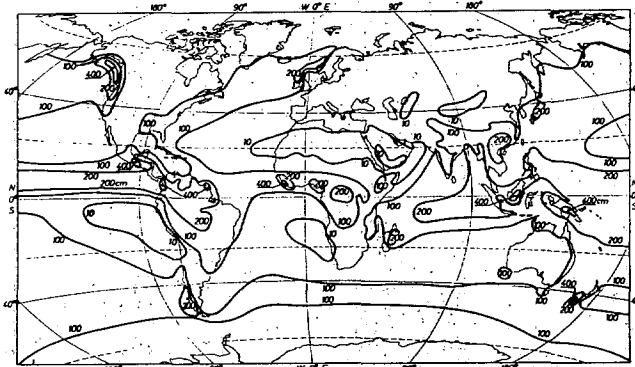


Fig. 1: Distribución global de alturas de precipitación (cm) según Baumgartner y Reichel (1975).

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de junio de 1991.

sobre el terreno. Tanto es así que, aproximadamente, un 90 por 100 del vapor de agua presente en la atmósfera lo está por debajo de la cota 6.000 m. snm.

Puesto que el agua existente en la atmósfera es susceptible de precipitación, y cuando eso sucede alguien tiene que organizar abajo (o desorganizar) el concentrado de aguas en forma de caudales, una pregunta muy ingenieril es: ¿cuál es la cantidad máxima de agua que puede caer? De hecho esa pregunta fue formulada en esta revista como comentario a un anterior artículo corregido por este y otros autores (Curvas IDF Barcelona-Fabra), en el que se mostraban diferentes estadísticas de precipitación y curvas IDF en las cuales siempre se cortaba el gráfico minutos antes de llegar al eje de ordenadas, o bien se limitaba el espectro de variación del periodo de retorno a unas décadas. La respuesta es difícil.

Existen, no obstante, algunas cábalas y artes mágicas (o sea, pitagóricas o ingenieriles) que permiten calcular el agua precipitable en promedio, por ejemplo, en el hemisferio Norte: 23.85 mm. El agua precipitable es un parámetro definido como el calado en mm que alcanzaría el vapor de agua contenido en una columna de aire de altura determinada si se condensase. Pero este es un valor válido instantáneamente o bien es un valor que debe darse promediado pues evoluciona a lo largo del tiempo. Aun haciendo muchas hipótesis del escenario extremo que condujesen a averiguar la cantidad máxima de agua precipitable por una columna de aire, no se habría avanzado mucho puesto que está comprobado que las precipitaciones locales máximas durante lluvias de corta duración superan varias veces el contenido total de agua en las columnas de aire que pasan sobre el área de observación en un determinado momento. La razón está en la elevada recarga de vapor de agua que se produce en dirección horizontal, como estamos acostumbrados a observar en el Mediterráneo y por supuesto en parajes tópicos como la Isla de Reunión donde se han llegado a registrar 1.870 mm de precipitación en 24 horas, siendo 25.49 mm el agua precipitable en promedio en el hemisferio Sur.

La intensidad de lluvia (calado del volumen precipitado por unidad de superficie y tiempo) máxima registrada durante 10 minutos triplica a la correspondiente a 100 minutos y nonuplica la correspondiente a 1.000 minutos. Este matiz es importante para completar la pregunta formulada en párrafos anteriores sobre cuál es la canti-

dad máxima de agua que puede caer: hay que saber también en cuánto tiempo.

1.2. Microfísica de nubes

1.2.1. El agua en las nubes

En el punto anterior se ha estado hablando indistintamente de agua líquida y vapor de agua sin mencionar la existencia de las nubes, con el fin de simplificar el objetivo del discurso que era comentar la existencia de agua en la atmósfera. El vapor de agua es un gas presente en el aire que nos rodea e imperceptible visualmente de ordinario. Existe una transformación mediante la cual el vapor de agua en la atmósfera se convierte en nubes y precipitación. Esta transformación está controlada por numerosos procesos que operan a escalas netamente inferiores a las que operan los procesos dinámicos que generan una nube. Por ello estos procesos se denominan microfísicos.

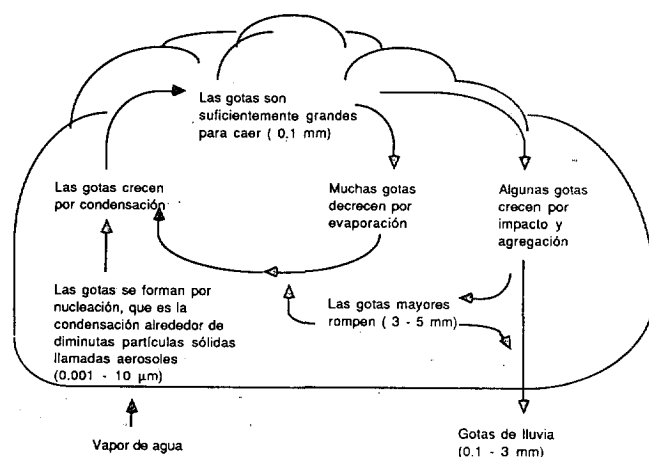


Fig. 2: Ciclos de formación de gotas que constituyen una nube y su precipitación.

La microfísica de nubes, lejos de ser una curiosidad académica, es esencial en la comprensión de las particularidades de la precipitación y de las circunstancias que la rodean que pueden afectarle. Se ha observado que solamente una parte del vapor de agua que entra a través de la base de una nube se convierte en agua de nube (agua que no está en estado gaseoso), mientras que el resto es expelido por la circulación existente dentro y fuera de la nube. También se ha observado que una fracción del agua de nube vuelve al estado gaseoso por evaporación de las gotas existentes

en los lados y la cima de la nube, así como por la evaporación de las gotas a lo largo de sus trayectorias descendentes por el interior de las nubes. Otra parte importante de la precipitación se evapora en el camino desde la nube hasta la tierra.

Tenemos que hacer énfasis en que de las cantidades citadas en el punto anterior de agua precipitable en la atmósfera (definición que debe tomarse *stricto sensu*), en realidad sólo entre 1/30 y 1/20 lo está como agua de nube que es la que deriva en precipitación. Por ello se ha dicho que las nubes no son eficientes en la producción de precipitación, o dicho de un modo muy plástico, que no exprimen de un modo muy eficaz el vapor de agua que hay en la atmósfera (de ser más eficientes, el equilibrio global mudaría probablemente el entorno al que estamos acostumbrados). Esta relación agua de nube/agua precipitable hace que, según diferentes estudios, la vida promedio del agua en estado líquido en la atmósfera sea de unas 10 horas, lo cual implica una frecuencia de precipitación de unas 40 veces por día y una duración media del proceso de precipitación de una media hora. Distintas observaciones realizadas con radar meteorológico muestran que estos valores son razonables pues la vida de una célula de tormenta alcanza generalmente una hora, distribuida en unos 15 minutos de crecimiento, unos 25 minutos de madurez, durante la cual se produce el episodio más importante de precipitación, y unos 20 minutos de disipación.

1.2.2. Núcleos de condensación

En una nube, ese objeto blanco, gris o anaranjado, dependiendo de las leyes de la óptica, coexisten multitud de partículas que no son sólo agua. Las partículas sólidas que están presentes en las nubes se forman a partir del vapor de agua (gas) gracias a los núcleos de condensación de la nube o a los núcleos de hielo, según que resulten gotas de agua o cristales de hielo respectivamente. Estos núcleos son partículas aerosol presentes en la atmósfera, en la cual coexisten casi constantes como el nitrógeno y el oxígeno (tiempos de residencia del orden de miles de años), constituyentes de baja variación (algunos meses o años) como el metano o el dióxido de carbono, y constituyentes de alta variación, entre los que hay gases como el anhídrido sulfuroso o los ácidos sulfhídrico y nítrico y también aeroso-

les, teniendo estos últimos tiempos de residencia del orden de días.

Los aerosoles tienen su origen, bien en reacciones entre diferentes gases atmosféricos, bien en la desintegración química y mecánica de la superficie terrestre. Es frecuente encontrar partículas silíceas en suspensión atmosférica como las arcillas (montmorillonita, caolinita...). También existen partículas de origen biológico como polen, semillas o bacterias. Los procesos industriales son cada vez más una fuente importante de generación de aerosoles, aportando aproximadamente 1/6 del total de aerosoles presentes en la atmósfera. Por último, la superficie de los océanos es también una fuente importante de aerosoles (del orden de 1/6 del total), por evaporación del agua de las múltiples gotitas de agua marina levantadas por el viento y persistencia del residuo sólido en suspensión (básicamente, sales marinas).

PARTICULAS NATURALES	
Residuos de suelo o rocosos	100-500
Incendios forestales o quema de matorrales	3-150
Sal marina	300
Residuos volcánicos	25-150
Conversión de gas a partículas	
de SH_2 en sulfato	130-200
de NH_3 en sales amónicas	80-270
de NO_x en nitrato	60-430
hidrocarburos a partir de exhalación de las plantas	75-200
Subtotal	773-2200
PARTICULAS ANTROPOGENICAS	
Partículas por emisión directa	10-90
Conversión de gas a partículas	
de SO_2 a sulfato	130-200
de NO_x a nitrato	30-35
hidrocarburos	15-90
Subtotal	185-415
Total	958-2615
Extraterrestre	0.5-50

Fig. 3: Velocidad (en 10^9 kg año^{-1}) a la que se producen partículas aerosol de radio inferior a $20 \mu\text{m}$ en la atmósfera o entran en ella (MIT Press, Cambridge, Mass.).

El tamaño de estas partículas oscila entre las menores de $1 \mu\text{m}$, denominadas de Aitken, hasta las que oscilan entre 1 y $20 \mu\text{m}$ denominadas partículas gigantes. Su concentración en el aire es del orden de 1.000 a 100.000 partículas por centímetro cúbico, si bien en las ciudades alcanzan valores diez veces superiores, es decir, un millón de partículas por centímetro cúbico, decreciendo estas concentraciones con la cota sobre la superficie terrestre.

Los aerosoles son retirados de la atmósfera (hemos visto que su tiempo de residencia era de días) por procesos de coagulación denominados de precipitación seca, en los que lo que efectivamente ocurre es que la acumulación de partículas forma coágulos que no pueden proseguir suspen-

didos por su tamaño y caen a tierra, y por lo que se denomina la vía húmeda de precipitación en la que están implicadas las nubes y la lluvia. Las partículas suspendidas o aerosoles quedan fijadas en las gotas de las nubes, en las gotas de lluvia o en las partículas de hielo por diferentes causas físicas (difusión convectiva, termoforesis, captura gravitacional o inercial, efectos eléctricos, etc.).

Estos individuos de la población atmosférica son absolutamente esenciales en la transformación de estado gaseoso a estado líquido del vapor de agua. En laboratorio, para conseguir la condensación del vapor de agua presente en volúmenes de aire perfectamente limpio, es necesario alcanzar humedades relativas de varios cientos por cien, mientras que en las nubes atmosféricas el cambio del agua de fase gaseosa a fase líquida ocurre con humedades relativas en torno al 100 por 100, y la niebla puede formarse con humedades relativas del 80 por 100. Del mismo modo en laboratorio se puede enfriar el agua, si ésta es completamente pura, hasta -35°C aproximadamente, en tanto que la mayoría de las nubes tienen hielo alrededor de los -25°C ; de hecho algunas nubes tienen partículas de hielo a temperaturas incluso de -4°C . El estudio termodinámico del agua demuestra, a nivel teórico, que los procesos de cambio de fase que se producen en la atmósfera no tienen lugar bajo condiciones homogéneas, sino bajo condiciones heterogéneas en las cuales están implicadas los aerosoles.

Una vez que, gracias a la presencia de los núcleos de condensación, se producen pequeñas gotas, aún a pesar de no darse en la atmósfera las condiciones teóricas de laboratorio para este cambio de fase en hipótesis de homogeneidad, existe un proceso de crecimiento de estas gotas que se puede dividir en crecimiento por difusión, y crecimiento por colisión. El crecimiento por difusión es el resultado de la difusión de vapor a la gota de agua, con una liberación de calor latente. La gota también puede consumir calor latente y producirse una evaporación. Así, dependiendo del ritmo al cual la gota libera o absorbe calor, y la velocidad de difusión del vapor de agua, ésta crecerá o decrecerá. Ni que decirse tiene que planteada la fórmula termodinámica adecuada para la representación de este equilibrio dinámico, no menos de veinte variables y constantes aparecen en danza por encima y por debajo de insondables quebrados con llaves paréntesis y corchetes completando lo que cualquier profano, como quien esto escribe, podría creer un bello cuadro surrealista.

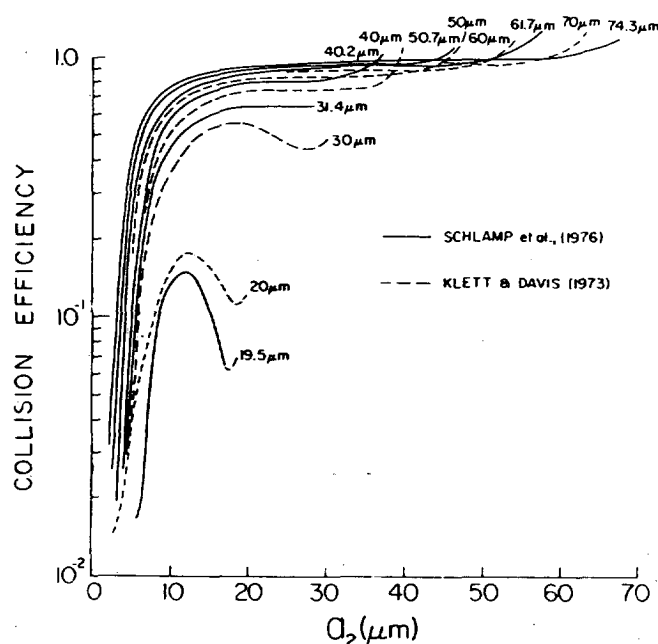


Fig. 4: En ordenadas, eficacia teórica de colisión de gotas esféricas en aire tranquilo, en función del radio menor (abscisas) y el radio mayor indicado para cada rama de curva (Pruppacher y Klett, 1978).

Dentro de la nube existen corrientes de circulación que arrastran arriba y abajo a estas pequeñas gotas formadas por condensación sobre los núcleos citados y en proceso de crecimiento. En estas idas y venidas las gotas colisionan entre sí, siendo éste el segundo motivo de crecimiento del tamaño de las gotas en las nubes, si es que la denominada técnicamente "eficacia de coalescencia", es decir, capacidad de permanecer las gotas unidas después el choque, es elevada, aunque parece que cuando las gotas superan las 100 micras no existen problemas para ello.

Cuando las gotas han alcanzado un tamaño suficiente como para vencer gravitatoriamente las fuerzas ascensionales de las corrientes internas de circulación, las gotas precipitan sobre la superficie terrestre. Hay que tener presente que una corriente de sólo 0.5 cm/s es suficiente para elevar una gota de 10 μm de diámetro. La distribución de los tamaños de las gotas que llegan a tierra es exponencial, y se pueden encontrar diámetros equivalentes tanto de 5 μm como de 5 mm, aunque los tamaños más habituales oscilan entre 0.1 y 3 mm de diámetro equivalente.

1.3. Evaluación de la precipitación

Los hidrometeorólogos han desarrollado a lo largo del tiempo diferentes técnicas para preparar valores de diseño de la precipitación que pudiesen ser usados por los ingenieros para la confección de sus proyectos y estudios.

Estos valores son, bien probabilísticos y derivados de análisis estadísticos o bien determinísticos y derivados del uso de teorías meteorológicas de las cuales se deducen unas cantidades extremas de precipitación. La distinción, muy académica o congresual, no deja de ser peregrina, ya que los valores determinísticos se deducen mediante una estimación que comporta, tácita o explícitamente, la aplicación de determinado criterio estadístico en el que participan, si no los valores de la precipitación misma, otra serie de valores meteorológicos con ella relacionados, como veremos más adelante. Epistemológicamente, ambos valores, los llamados probabilísticos y los llamados determinísticos, provienen de diferentes métodos pero encierran similares cantidades de desinformación, lo que ocurre que en un caso es declarada y en el otro no.

1.3.1. Medición de la precipitación

Cualquier estudio hidrológico para la planificación, el proyecto o la remodelación de redes de alcantarillado, y, como es natural, de cualquier sistema de drenaje de tamaño superior, sea natural o artificial, requiere mediciones de la cantidad de precipitación. Estas mediciones deben aportar información, no sólo sobre la cantidad total precipitada, sino sobre la velocidad de precipitación (intensidad de lluvia) y sobre su distribución sobre el territorio. Ambos aspectos los denominaremos de ahora en adelante "distribución temporal" y "distribución espacial" de la lluvia respectivamente.

Habitualmente se emplean dispositivos de medición denominados pluviógrafos cuando se quiere tener un registro de la distribución temporal de la lluvia en un punto de coordenadas UTM determinadas. Se propone aquí el cambio de la denominación atendiendo a la etimología del vocablo y relegar la denominación de pluviógrafo a los dispositivos que dibujan una gráfica de la evolución de la lluvia, sea por precipitación acumulada, sea por intensidad instantánea, denominando pluviómetro a cualquier tipo de disposi-

tivo que sirva para la medición de la precipitación. Añadiendo un adjetivo podremos especificar si se trata de un registrador digital o analógico según la forma de registro de señal, si es de cazoleta o de flotador, atendiendo al sensor empleado, etcétera. Esta complicación en la descripción es necesaria debido al aumento de la variación en la oferta existente.

La medida de la precipitación está sujeta a varios errores, como los originados por el viento, las turbulencias cerca de la estación de medida, las precisiones de los sensores, etc., y casi siempre tienden a minorar la cantidad real de agua precipitada. También existen errores de transcripción e interpretación de las medidas, dado lo variopinto de los protocolos de registro de la magnitud y las condiciones en que se realiza.

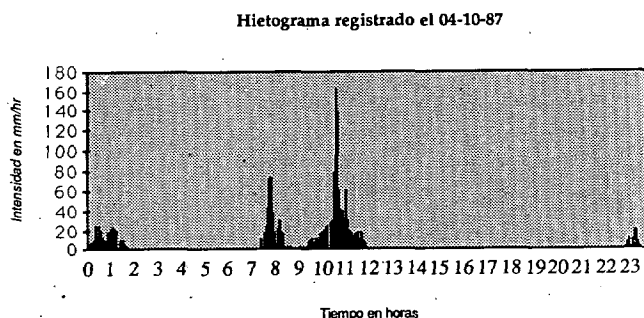


Fig. 5: En hidrología urbana la medición de lluvia debe ser suficientemente precisa como para disponer de información sobre la evolución de la lluvia en intervalos netamente inferiores a la hora (Plan Especial de Alcantarillado de Barcelona).

1.3.2. Redes pluviométricas

Casi con toda generalidad se puede decir que siempre son necesarios datos, no de una estación pluviométrica, sino de varias que constituyen una red, para la mayoría de las aplicaciones ingenieriles. Ello es así debido a la necesidad de conocer la distribución espacial de la lluvia, aunque luego se termine empleando una precipitación media sobre una cuenca determinada y no se saque el máximo partido del contenido de información inherente a la descripción espacial. La densidad de la red pluviométrica dependerá de la escala a la que se esté trabajando en el estudio. Para estudios de hidrología fluvial, probablemente es suficiente una densidad de malla que permita una descripción de tormentas generalizadas (procesos de precipitación alimentados por frontogénesis o desplazamientos de grandes masas de aire), en

tanto que en hidrología urbana, es decir, cálculo de redes de alcantarillado, son necesarias mallas densas que permitan delimitar las células convectivas que puedan existir, y estas células tienen diámetros alrededor de los 10 km, presentando fuertes variaciones de intensidad entre el centro y los bordes. La Organización Meteorológica Mundial recomienda que exista, en zonas de clima mediterráneo, una estación cada 750 km² aproximadamente si el terreno es llano y cada 175 km² si el terreno es montañoso, reduciéndolo a 25 km² si se trata de islas. Nuestra experiencia en el grupo mediterráneo de Hidrología Urbana de la IAHR (International Association for Hydraulics Research), muestra que en zona urbana es necesario disponer mallas entre 2 y 5 km. de paso, dependiendo de la aplicación.

Hay que tener presentes dos cosas en la elección de mallas: por un lado la fractalidad de los fenómenos implicados en la hidrología (vid. Vázquez et. al., Valencia 1990), que por el momento no está bien estudiada matemáticamente y arroja incertidumbres sobre la dimensionalidad de los mismos, y por otro el hecho de que la ganancia de información no es proporcional al número de pluviómetros instalados, sino que esta ganancia se atenúa de un modo que algunos estudios aproximan como exponencial. En ambos casos hay que recurrir a la suma de la experiencia, el olfato ingenieril y el uso de algún computador que permita hacer algunos tanteos sobre el caso estudiado en concreto.

1.3.3. Radar meteorológico

La precipitación también se puede medir de forma indirecta mediante un radar meteorológico: éste mide el número de gotas que atraviesa un rayo generado por un transmisor de energía electromagnética. La forma y tamaño del rayo dependen de la configuración y tamaño de la antena. Lo que se mide es la reflexión de las ondas radar por las nubes o las partículas en precipitación, la cual depende del número de partículas por unidad de volumen, la distribución de tamaños de gota, la fase de las partículas (sólida o líquida), y la forma de las mismas. La reflexión se mide mediante la energía media devuelta. Las mediciones radar deben ser calibradas mediante redes terrestres de medición pluviométrica: pueden incluir muchos errores pero son de una estimable ayuda en el estudio cualitativo y en las tareas de predicción.

1.4. Previsión de la precipitación

A efectos de diseño o a efectos de operación de un sistema de drenaje, lo que se quiere finalmente es una previsión de la precipitación, en ambos casos con distinta antelación y fiabilidad. Hemos empleado el término "previsión" en el sentido de adoptar unos valores de diseño que permitan acotar hasta cierto punto el intervalo de sollicitación de los sistemas hidráulicos. Reservamos el término "predicción" para la actividad consistente en intentar acertar, con más o menos antelación, cómo será un fenómeno concreto en el espacio y en el tiempo. Veamos qué es lo que nos ofrece el mercado hidrometeorológico:

1.4.1. Precipitación Máxima Probable (PMP)

Es, según la OMM, la cantidad teóricamente máxima de precipitación que puede ocurrir sobre una determinada cuenca, para una determinada duración en una estación anual determinada, sin considerar tendencias climáticas (climatic trends), y de acuerdo a los conocimientos actuales sobre el proceso de precipitación. Obviamente, cambios en el conocimiento del proceso o en el clima implicarán cambio en la estimación de esta cota superior de precipitación.

Este sería uno de los procesos denominados previamente como determinísticos para la evaluación de la lluvia que puede caer en una determinada zona. Ahora bien, si tenemos en cuenta que en la estimación de esta cota superior se han realizado cálculos que implican el análisis de superación por parte de la PMP de la máxima tormenta registrada en la zona, la idoneidad de la muestra de tormentas elegidas para el establecimiento de la estimación, el tipo y fiabilidad de los modelos elegidos para simular el proceso o los parámetros meteorológicos usados en los cálculos y, finalmente, la probabilidad de ocurrencia individual de los parámetros meteorológicos usados para desarrollar la estimación, nos encontramos que el ingeniero que usa el método PMP lo que hace es librarse de la responsabilidad de un juicio que otro ha emitido por él, no comportando necesariamente más certidumbre, lo cual plantea un serio problema ético de orden personal al existir la posibilidad de usar directamente métodos denominados probabilísticos. No obstante, estos criterios de PMP son útiles en cuanto que permiten una uniformidad en el diseño y en la seguridad, uniformidad difícil de conseguir

mediante la aplicación de los denominados métodos probabilísticos.

1.4.2. *Análisis frecuencial de la precipitación*

El estudio de las distribuciones frecuenciales de los valores de precipitación sirve para el desarrollo de "lluvias de proyecto" con características estadísticas que permiten la consideración del factor riesgo, es decir, la consideración de márgenes de error en la previsión. Se acepta, hoy día casi con toda generalidad, que la previsión PMP, de tipo determinista y de aplicación a "piñón fijo", es la que debe emplearse en el diseño de grandes estructuras cuyo fallo puede acarrear la pérdida de vidas humanas y grandes pérdidas materiales. Tal sería el caso de las grandes presas. Si la estructura diseñada no exige grandes medidas de seguridad en la previsión, dada la insignificancia del peligro de pérdidas en personas y bienes, se acepta comúnmente el empleo de métodos frecuenciales que permiten la consideración de períodos de retorno y las comparaciones de tipo económico para diferentes niveles de riesgo. Tal es el caso habitual en el diseño de redes de alcantarillado.

Las redes pluviométricas proporcionan los datos necesarios para realizar los análisis frecuenciales de precipitación que permiten la creación de una lluvia de proyecto. Estas redes se reducen en muchos casos a una sola estación de observación. Obviamente, una sola estación no puede experimentar todas las posibles precipitaciones que se producen en toda una región o zona, y las tormentas no van a producirse justo de forma que estén centradas precisamente sobre la estación pluviométrica. La pura realidad es que la lluvia de proyecto es un ente tetradimensional, en el sentido que goza de forma definible a lo largo de tres ejes (latitud -x-, longitud -y-, e intensidad -z-) y a lo largo del tiempo (-t-). Con el registro que nos da una estación, sólo estamos en posición de analizar este ente según un plano de corte, el de ejes intensidad-tiempo. Es necesario, definitivamente, dotarse de redes pluviométricas que permitan una buena descripción espacio-temporal de las lluvias, si se quiere ser mínimamente científico en los estudios hidrológicos.

El hietograma es la evolución de la intensidad de lluvia en un punto de observación. Si disponemos de una muestra de hietogramas corres-

pondientes a una estación meteorológica, podemos realizar distintas estimaciones estadísticas con los valores registrados. Una muy frecuente es la de comprobar para cada hietograma cuál es la máxima intensidad registrada (precipitación/tiempo) para diferentes intervalos temporales, p. ej., 5, 10, 15 minutos, etc., cuya ubicación dentro del hietograma hay que buscarla pues no responderá a ninguna ley conocida. Si agrupamos todos los valores extraídos de cada intervalo, podremos realizar el ajuste a una distribución teórica del conjunto de intensidades medias máximas en 5 minutos, y también lo podremos hacer para 10, 15, etc., minutos. Frecuentemente, en lugar de hacer grupos con todos los valores, se hacen grupos sólo con los valores máximos anuales, de modo que cada grupo tendrá tantos elementos como años de observación, y el estudio frecuencial realizado se denomina estadística de extremos. Si el número de años es suficientemente grande, ambos métodos conducen al mismo tipo de resultados prácticos.

No existe ningún fundamento meteorológico que permita esperar que los valores analizados, ya sea con series completas de valores o sólo con valores extremos, se ajusten a una distribución de probabilidad determinada. La práctica americana ha consagrado, no obstante, dos distribuciones para el estudio de extremos: la de Fisher-Tippet Tipo I, usada principalmente por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), y la distribución Log-Pearson Tipo III recomendada por el Water Resources Council estadounidense.

El ajuste de los valores registrados a estas distribuciones teóricas, permite prever cuál es la probabilidad de que, por ejemplo, en el caso de extremos anuales, un año aparezca una intensidad media máxima en un intervalo de 10 minutos superior a un valor propuesto. Si se puede dar esa probabilidad, se puede dar el tiempo promedio en años que separará los cumplimientos de esas superaciones, o período de retorno. Dicho de otro modo, para cada período de retorno, es decir, para cada frecuencia de aparición, tendremos los valores máximos esperables en cada uno de los intervalos de distinta duración. Esta es la base de las conocidas curvas IDF (intensidad-duración-frecuencia). Dichas curvas son interpolaciones realizadas tomando como puntos base las intensidades medias máximas para distintas duraciones de intervalo de lluvia,

en la hipótesis de distintas frecuencias o períodos de retorno.

Se producen como mínimo dos errores en la derivación de una IDF: el primero responde al nivel de confianza empleado en la estimación del valor máximo para una frecuencia determinada, en base a la distribución teórica elegida y podemos llamarlo "error de extrapolación". Cuando se determina ese valor se hace asumiendo un error que nadie explicita (puede ser una probabilidad de error cualquiera, no siendo extraño un 30 por 100). El segundo error deriva de ajustar una curva de uso práctico a los valores obtenidos para cada intervalo, que podemos denominarlo "error de interpolación". Se declara finalmente la frecuencia de superación de un determinado valor sin explicar cuál es la fiabilidad de esa estimación. Lo cierto es que algunos compañeros no especializados que hayan aplicado IDF pueden preguntar: ¿a qué "jugamos" entonces? Les invito a leer la segunda y tercera parte de este artículo (escorrentía y propagación) y quizás la pregunta pueda reformularse.

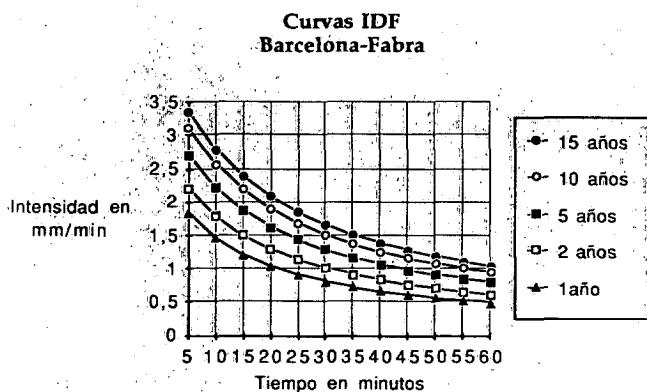


Fig. 6: Curvas IDF de Barcelona a partir de 60 años de datos del pluviógrafo de intensidades de Jardí (Lorente y Redaño, 1990).

Si el estudio frecuencial de precipitaciones en un punto está sometido a diversas vicisitudes, el análisis frecuencial de precipitación sobre un área no puede escapar al estado de la situación. La frecuencia de precipitación promediada sobre un área determinada se puede hacer a partir de similares cálculos estadísticos a los anteriormente descritos, tomando datos de una red de pluviómetros que permiten la asignación a superficies de dimensión creciente un valor de precipitación promedio. También se puede escoger en cada lluvia el registro máximo de toda la red y ver la

atenuación en función de la distancia de los otros registros. Los resultados pueden reordenarse de modo que la frecuencia de precipitación promedio sobre un área dependa de sus dimensiones y de las características frecuenciales de un sólo punto ideal de precipitación (síntesis de todos los observatorios de la red).

1.5. Lluvias de proyecto

Uno de los aspectos que ha sufrido una reevaluación en los últimos años de las metodologías de análisis de redes de alcantarillado, es el concerniente a las funciones de entrada (input): las precipitaciones con sus estadísticos y sus distribuciones espaciales y temporales. Se podría decir que este apartado es el más práctico de esta primera parte del artículo sobre cálculo de caudales en alcantarillado, en el que hemos intentado reflexionar sobre la lluvia. Todas las consideraciones realizadas sirven para, con cierto criterio, poder decidir finalmente cuál es la "solicitud hidráulica" a que sometemos un sistema de drenaje. La lluvia de proyecto tiene su analogía en el campo estructural: las "hipótesis de carga".

La lluvia de proyecto se define habitualmente, no en términos de una función $f(x,y,z,t)=0$, sino por combinación de dos funciones, $f_1(z,t)=0$ y $f_2(x,y,z)=0$. La primera, que describe la evolución de la intensidad de lluvia a lo largo del tiempo en un punto determinado, que suele asumirse como centro de la precipitación, se denomina hietograma. La segunda función, que permite distintas expresiones, puede describir la atenuación espacial de la intensidad a medida que el observador se aleja del centro de la tormenta (uso del factor de reducción por distancia al hietocentro) o, en otras formulaciones, permite describir el decremento de la precipitación media sobre una región a medida que se aumenta el tamaño de esa región (uso del factor de reducción superficial).

Diversas administraciones europeas y americanas, tanto de rango estatal como regional o local, disponen de lluvias de proyecto o de procedimientos para su generación, que son usadas con la misma familiaridad que el ingeniero estructural usa el carro de 60 toneladas de la instrucción para calcular un tablero de puente. Los hietogramas de proyecto, que son visiones parciales de la lluvia de proyecto al no incorporar información sobre distribución espacial, pueden desarrollarse para fines específicos: es diferente

el hietograma de proyecto para cálculo de capacidad máxima de un colector, que el hietograma de proyecto que debe emplearse para el cálculo de un depósito de retención, aunque suele usarse el primero para todo tipo de fines.

Hay una gran diversidad de hietogramas de proyecto de uso común. Habitualmente la elección se basa en el tipo de cálculo que vaya a realizarse posteriormente, es decir, en el concepto hidrológico utilizado para analizar la escoorrentía, en las precisiones requeridas, o en la necesidad de estudiar fenómenos concretos de propagación. El modelo más simple de hietograma de proyecto es el denominado "lluvia bloque", que consiste en un hietograma rectangular representativo de una lluvia de intensidad constante durante un determinado período de tiempo. Este hietograma se suele derivar de las curvas IDF, que proporcionan el valor de esa intensidad para una duración determinada y un período de retorno fijado. Es el hietograma utilizado para la aplicación del método racional, haciendo coincidir la duración elegida con el tiempo de concentración de la cuenca, como veremos en la segunda parte de este artículo.

Existen otros hietogramas de uso bastante extendido que introducen variación en la evolución temporal de la lluvia, dado que la lluvia bloque representa sólo una parte del volumen total de lluvia precipitado y no introduce información sobre la forma de la lluvia que tiene bastante importancia. Keifer y Chu presentaron en 1957 la que hoy se conoce como "lluvia Chicago", hietograma derivado de toda la curva IDF. La característica más importante de este hietograma es que cualquier intervalo centrado en su pico presenta una intensidad media equivalente a la derivada de una curva IDF entrando con una duración igual a la del intervalo elegido.

Este hietograma permite una ubicación del pico en diferentes momentos de la lluvia, intentando simular lluvias reales de pico avanzado o retrasado. En el Plan Especial de Alcantarillado de Barcelona se utilizó una lluvia Chicago, discretizada en intervalos de cinco minutos a partir de su derivación analítica, y desplazando el pico al primer tercio de la duración de la tormenta, en consonancia con lo observado en 60 años de registros pluviométricos. Posteriormente se "limó" el pico tras realizar varios estudios de sensibilidad mediante simulación hidrológica en los que se detectaban puntas excesivamente altas de caudal. Puede decirse que la lluvia Chicago es

LLuvia sintética

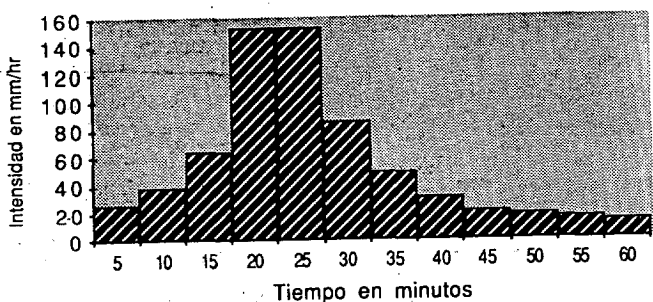


Fig. 7: Hietograma sintético empleado en el Plan Especial de alcantarillado de Barcelona (1988, Wisner, Vázquez, Cabot).

muy pesimista, pues incorpora en un solo hietograma las intensidades máximas procedentes de diferentes lluvias, y tal como se observó en Barcelona, no siempre la punta de lluvia real en 10 minutos corresponde a la misma lluvia real que dio la punta de intensidad para 40 minutos, por ejemplo.

En 1978 Desbordes presentó la que se conoce como "lluvia doble triángulo", que puede considerarse una simplificación de la lluvia Chicago. Se toman sólo de las curvas IDF dos valores: la intensidad correspondiente a una duración crítica, T , para la cuenca analizada (algo así como el tiempo de concentración), y la correspondiente a una duración de 4 horas. Posteriormente se les da forma triangular simétrica a las evoluciones de intensidad en esos períodos manteniendo los volúmenes precipitados en T minutos y en cuatro horas que se deducen de la IDF.

Cuando se quiere estimar volúmenes de aguas mezcladas en sistemas unitarios que puedan pasar por plantas de tratamiento y los volúmenes que son aliviados al medio natural, no es adecuado el uso de hietogramas de proyecto del tipo mencionado. Lo más recomendable es el uso de simulaciones en continuo con lluvias reales, método que cada vez tiene más adeptos en el cálculo de capacidades de colectores, al haber avanzado la potencia de cálculo de los medios de computación y su capacidad de almacenamiento de datos. En algunos casos, para evitar el proceso de la base completa de datos pluviométricos, se escogen una serie de hietogramas reales estadísticamente representativos de la serie total, que pasan a constituir una "serie histórica reducida de hietogramas reales", la cual cumple la función del hietograma de proyecto.

Typ D										
20	24	5	16	9	15	9	1	12	4	5
40	13	5	15	22	15	10	2	8	6	4
60	9	4	15	30	15	8	2	8	6	3
120	4	2	13	42	13	7	2	6	6	4

Fig. 8: Análisis frecuencial de tipologías de precipitación realizado por J. Brummer con la pluviometría de Múnich, de cara a un estudio de tipo estocástico.

Sieker propuso en 1976 un método para la generación de hietogramas sintéticos (término genérico empleado para diferenciar los hietogramas artificiales, como el de Chicago y el de Desbordes, de los hietogramas reales) basado en el análisis multifactorial de la varianza. A rasgos generales, lo que se hace es substituir un proceso aleatorio único por la suma de distintos componentes que tendrán asignadas sus características estadísticas particulares. En el Ayuntamiento de Barcelona se desarrolló esta idea en 1984 para generar hietogramas sintéticos mediante un análisis bifactorial de la varianza, considerando los siguientes factores: la variación de la intensidad de lluvia en el tiempo para un mismo suceso y la variación de la intensidad de lluvia en un mismo intervalo de tiempo para los distintos sucesos. El procesamiento de datos resultaba lento y el formato de los resultados no era de uso cómodo con las herramientas de simulación hidrológica que se empleaban por aquel entonces. Hoy día, el avance en hardware y software disponible nos ha animado a repetir la experiencia usando los datos de la red pluviométrica existente, lo cual permitirá no sólo simular hietogramas sintéticos, sino lluvias de proyecto sintéticas, al poder introducir análisis de varianza ligada a la distribución espacial de la tormenta.

1.6. Predicción de lluvias

El tema de predicción de lluvia es bastante controvertido, puesto que se suele relacionar con las más o menos afortunadas predicciones del tiempo difundidas por los medios de comunicación. Las predicciones del tiempo a escala sinóptica están basadas actualmente en la resolución de sistemas de ecuaciones a cuyas variables se les

asignan unos determinados valores de partida. Escala sinóptica es la que permite la observación de fenómenos meteorológicos a gran escala, como los ciclones y los anticiclones; ello implica la representación de ámbitos territoriales que cubren algunos millones de kilómetros cuadrados. A esta escala se pueden conseguir "buenas" predicciones con antelación de 2 o 3 días, siendo los errores proporcionales al orden de magnitud de las escalas dimensionales citadas. No obstante pueden introducirse errores de envergadura debido a la interacción con sistemas que evolucionan a escala menor que la sinóptica, o debido a observaciones insuficientes en las áreas oceánicas y zonas del globo poco pobladas, así como errores derivados de las aproximaciones numéricas utilizadas. La experiencia muestra que las predicciones a escala sinóptica con antelación superior a los 5 o 6 días no tienen prácticamente valor.

La escala siguiente a la sinóptica, en observación meteorológica, es la denominada mesoescala. Los fenómenos o sistemas que evolucionan a nivel mesoescala son los que afectan de una forma más directa al tiempo reinante en ámbitos locales reducidos. El estado del tiempo varía de una localidad a otra atendiendo a causas que no son descriptibles por las predicciones numéricas generales empleadas en la escala sinóptica. Los sistemas de mesoescala incluyen un rango de escalas que van desde las decenas de kilómetros hasta el medio millar de kilómetros. Habitualmente estos sistemas presentan un desarrollo territorial inferior al paso de malla creado por las 7.000 estaciones de observación meteorológica a escala sinóptica distribuidos por todo el mundo, por lo que su descripción detallada presenta problemas. La circulación atmosférica producida a estas escalas está dominada por cambios en la elevación del terreno, diferencias entre tierra firme y agua, diferencias de rugosidad del terreno, propiedades térmicas del subsuelo, etc. Los tipos de circulación más importantes son brisas entre la tierra y el mar, vientos entre montañas y valles, y circulaciones generadas por el contraste entre zonas urbanas y no urbanas. La predicción en estos sistemas no se realiza mediante modelación matemática de la evolución de las ecuaciones de estado de la atmósfera, sino por ecuaciones de regresión estadística cuyos predictores se toman de las predicciones matemático-físicas a escala sinóptica. Se puede conseguir "buenas" predicciones con antelación de medio día o un día, de nuevo dentro de los límites de exactitud a que fuerza la escala empleada.

Desde el punto de vista de las precipitaciones que afectan al funcionamiento de las redes de alcantarillado, ninguna de las predicciones anteriores son suficientes, pues no aportan el detalle necesario para poder analizar el efecto sobre cualquier sistema de drenaje urbano, por grande que sea. Es por ello que el colocar un dispositivo que permita disponer de información a escala sinóptica o incluso a mesoescala, como puedan ser los receptores de información de Meteosat, no sirve desde el punto de vista práctico para nada, a no ser la ilusión de quien de ellos dispone de que está haciendo algo por "controlar".

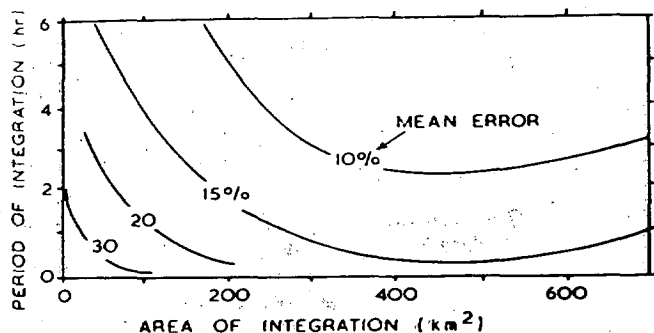


Fig. 9: Error absoluto medio en la medición de precipitación superficial usando un radar calibrado contra un pluviómetro, grafado en función del área y el tiempo de integración (Collier, 1977).

Normalmente, y sobre todo en los países mediterráneos, las precipitaciones que causan problemas son precipitaciones de carácter convectivo. Estas precipitaciones son la descarga de células de tormenta en las cuales se produce, habitualmente con alimentación en continuo de aire húmedo, todo el proceso de precipitación explicado en puntos anteriores. Las células convectivas son como enormes columnas de condensación cuyos diámetros no superan la quincena de kilómetros, y cuya vida supera débilmente la hora de duración. Estas células se producen obviamente en determinadas situaciones de mesoescala, y es habitual que presenten traslaciones sobre el territorio. La predicción de su evolución y las magnitudes precipitables es bastante difícil.

Desde hace aproximadamente cuarenta años que está reconocido el potencial del radar como sistema de medición de las precipitaciones, pero sólo hace quince años que los radares meteorológicos, junto a los sistemas de telecomunicaciones, los sistemas de monitorización y la tecnología de computación, han permitido un avance en la

implantación de sistemas operativos de radar. Se ha demostrado que el radar meteorológico puede servir bien a sus fines siempre que esté apoyado por una red pluviométrica en tierra para su continua calibración. Una mejora clara introducida por el radar es la referente a definición espacial de la lluvia, no en casos de precipitación por frontogénesis generalizada en que la lluvia está distribuida muy uniformemente, sino en casos de precipitación convectiva o tormentas aisladas.

El uso combinado de radar meteorológico y red pluviométrica puede permitir la elaboración de predicciones con una antelación del orden de los 50 minutos, no sobre la cantidad de lluvia precipitada, sino sobre los caudales que se pueden producir en un punto determinado de una red, por mediación claro está de la simulación en tiempo real del funcionamiento del sistema de drenaje bajo una determinada solicitación pluvial predicha. Parte de este tiempo de anticipación corresponde, claro está, a los tiempos de tránsito de los caudales por superficie y por red, es decir, tiempos de escorrentía y tiempos de recorrido. Este tiempo puede ser el suficiente para desplegar determinados dispositivos de emergencia o de prevención ciudadana, así como para operar sobre la red en el caso de sistemas de control en tiempo real de redes de alcantarillado (SICTRA).

1.7. Conclusión

Dentro de una óptica sistémica (de teoría de sistemas), la lluvia es el input de los sistemas hidrológicos urbanos más importante desde el punto de vista cuantitativo: ello le hace merecedora de una atención especial, más allá de su concreción estadística. Es necesaria una "sensibilidad meteorológica" para desarrollar buena ingeniería del drenaje. En zona urbana son las células convectivas las que más interesan para el análisis y el diseño, y esta tipología de precipitación puede comportar estadísticas locales diferentes en las estadísticas regionales. Las temperaturas en zona urbana son mayores que en sus entornos no urbanos, siendo también distinto su albedo (relación entre radiación recibida y emitida) y los niveles de creación de partículas aerosol, todas ellas variaciones de carácter antropogénico.

Estas diferencias hacen que la precipitación en zona urbana tenga características específicas distintas a las de su entorno, en general (a falta de

estudios definitivos) tendentes a una alza en cuanto a intensidades.

Se hace necesaria la constitución generalizada de redes pluviométricas y bases de datos que permitan la confección, tanto de curvas IDF fiables en un primer paso, como la de hietogramas sintéticos, así como el uso directo de archivos pluviométricos estandarizados para simulación en continuo de redes de drenaje. Esos datos deben permitir un conocimiento de la distribución espacial de la lluvia, que puede tener tremenda importancia en el diseño de redes de drenaje.

El radar es un instrumento meteorológico en el que, sin ninguna duda, las próximas generaciones de ingenieros que trabajen en hidrología urbana estarán acostumbrados a apoyarse, sobre todo en cuanto gane terreno la filosofía de explotación avanzada de las infraestructuras de drenaje. Esta filosofía conduce a la intervención en tiempo real para optimizar rendimientos, y ahí juega un papel esencial la capacidad predictiva del radar.

En los artículos siguientes se completará esta concepción nueva de las redes de alcantarillado, extensible a redes de drenaje de mayor ámbito espacial.

BIBLIOGRAFIA

La Bibliografía de las tres partes se ofrece al final de la tercera y última parte de este artículo, dedicada a "La propagación".

Ramón Vázquez García



Ingeniero de Caminos, especializado en Hidráulica y Energética por la Politécnica de Barcelona. A lo largo de su trayectoria profesional ha ocupado puestos de distinta responsabilidad como funcionario en el Ayuntamiento de Barcelona, de donde marchó en situación de excedente en 1987, cuando ocupaba la Jefatura del Servicio de Planificación de Alcantarillado.

Desde 1987 a 1990 dirigió la División de Hidrología de la ingeniería "Adasa Sistemas". En la actualidad forma parte del staff de Dirección de la Sociedad General de Aguas de Barcelona. Es autor de varios artículos en revistas españolas y extranjeras, y colabora como profesor en diversos cursos y masters relacionados con la actividad del sector hidráulico.

