

Modelización hidráulica 2D para la determinación de cargas de lluvia en cubiertas singulares

Ismael Ait-Chaib^a, Alejandro Quílez^b y Jose M Moure^c (AECOM)

^aDpto. Hidráulica en AECOM Spain, Joselsmael.Ait-ChaibCorchero@aecom.com, ^b Dpto. Hidráulica en AECOM Spain, Alejandro.QuilezPlanelles@aecom.com y ^c Dpto. Hidráulica en AECOM Spain, josemaria.moure@aecom.com.

Línea temática C | Agua y ciudad

RESUMEN

El objeto de este artículo es el análisis del impacto de la lluvia sobre las dos cubiertas singulares de un prototípico estadio de fútbol de ámbito regional. Es habitual dentro de las normativas internacionales de referencia considerar la carga de lluvia, principalmente la debida al estancamiento en caso de bloqueo del sistema de evacuación, y vertido a través del sistema de emergencia. Esta acumulación de agua se identifica de forma ágil y precisa utilizando modelos hidráulicos bidimensionales. Para realizar las simulaciones hidráulicas 2D se han utilizado el software Iber y MIKE 21, contrastando los resultados obtenidos. La precipitación se aplica sobre las superficies de las cubiertas con el objetivo de determinar las zonas de acumulación de agua y traducir los calados resultantes en valores de carga de lluvia. Estos valores son posteriormente considerados en los estudios estructurales y de optimización de la geometría de las cubiertas.

Palabras clave | cubiertas; carga de lluvia; modelos hidráulicos bidimensionales.

INTRODUCCIÓN

Las cubiertas singulares compuestas por superficies de curvatura variable empiezan a formar parte habitual de nuestro entorno, estableciendo una marcada separación en su resolución frente a los cerramientos verticales. La función de estas estructuras de cierre superior es principalmente la protección ante los agentes climáticos, factor a considerar en la determinación del material. Estas cubiertas singulares, en ocasiones ligeras, pueden establecer limitaciones al tránsito.

Existen diferentes normativas internacionales aplicables a cubiertas, que profundizan en la definición de cargas a considerar debidas a los agentes climáticos. La geometría de las cubiertas singulares requiere el establecimiento de sistemas de drenaje adecuados y compatibles con el diseño, establecimiento medidas preventivas para evitar acumulaciones de agua en la cubierta por fallos en el sistema de evacuación diseñado. Esta acumulación de agua puede identificarse de forma ágil y precisa utilizando modelos hidráulicos bidimensionales, trasladando el resultado como input para determinar el impacto sobre la estructura, de cara a la consideración en el diseño e incluso a la optimización de la geometría de la cubierta.

El objeto de este artículo es el análisis del impacto de la lluvia sobre las dos cubiertas singulares de un prototípico estadio de fútbol de ámbito regional representado en los modelos de la Figura 1.



Figura 1 | Modelado 3D de las cubiertas singulares.

MATERIAL Y MÉTODOS

El siguiente apartado expone los procesos seguidos, con ordenación cronológica, para la construcción de los modelos hidráulicos planteados.

Características de las cubiertas. Modelado 3D

En las cubiertas proyectadas se ha tratado de maximizar su singularidad creando complejas formas tridimensionales para resaltar su aspecto dentro del entorno y su ubicación. Estas cubiertas se han diseñado para cubrir los graderíos de un estadio de fútbol de capacidad media.

La cubierta principal, denominada “Tribuna”, tiene un área total de 2600m^2 y se ha propuesto un diseño frontal en forma de gaviotas sucesivas, con una inclinación en su vista lateral que favorece la evacuación del agua. En la parte media, la geometría propuesta presenta un área en forma de cuenco. La Figura 2 muestra los elementos característicos de esta cubierta.

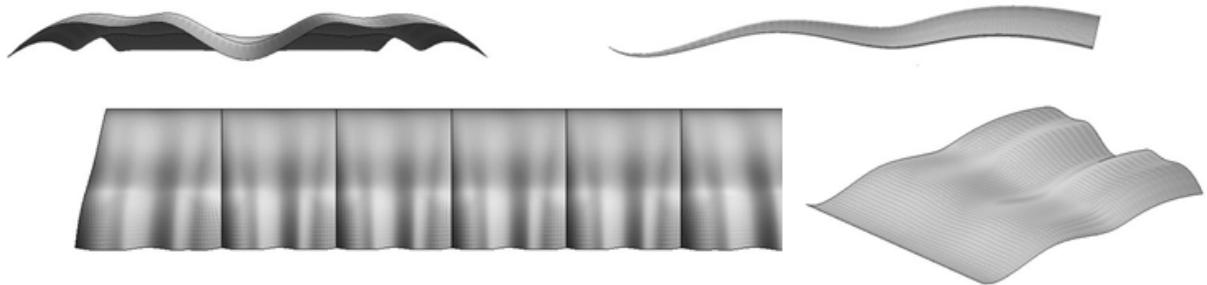


Figura 2 | Geometría de la cubierta “Tribuna”.

La cubierta “Preferente” tiene un área total 792m^2 y está compuesta de 11 módulos equivalentes de $4 \times 18\text{m}$ estabilizados por mástiles y tirantes que dan rigidez al diseño. La Figura 3 representa los elementos geométricos principales.

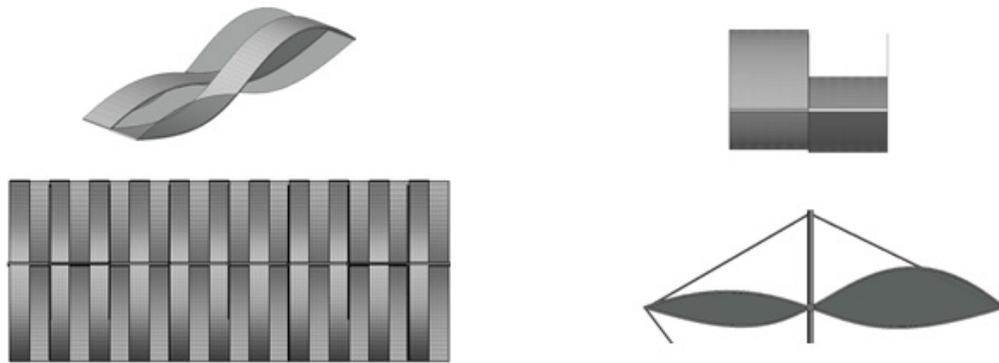


Figura 3 | Geometría de la cubierta "Preferente".

El software BIM empleado para los diseños tridimensionales de las cubiertas ha sido Revit 2017(Autodesk).

Tratamiento SIG de las cubiertas

Mediante el uso herramientas SIG, las superficies de las cubiertas diseñadas en formato 3D CAD se han convertido a formato TIN (Triangulated Irregular Network) y posteriormente a formato ASCII para ser utilizados como inputs de entrada en la modelización hidráulica. Estos inputs presentan unas resoluciones de celda que han buscado el equilibrio entre precisión de resultados suficiente y tiempos de computación coherentes. La Figura 4 muestra el aspecto de las cubiertas en sus distintos formatos.

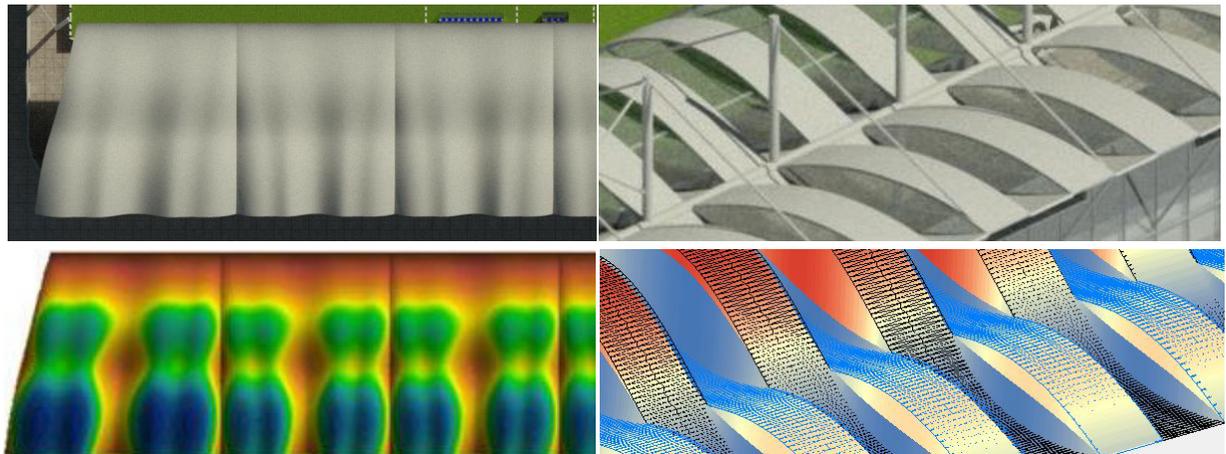


Figura 4 | Modelado 3D y tratamiento SIG de las cubiertas.

Escenarios de precipitación considerados

Existen numerosas normativas internacionales que abordan los criterios esenciales para el dimensionamiento de los elementos de drenaje de cubiertas así como de las hipótesis de cálculo de cargas de lluvia. En líneas generales todas ellas consideran la carga de lluvia como aquella provocada por la presencia de agua estancada en el hipotético caso de bloqueo del sistema de drenaje primario y vertido a través de los elementos de drenaje de emergencia.

Para determinar las cargas de lluvia, se han seleccionado las intensidades de precipitación indicadas por algunas normativas para el dimensionamiento de los elementos de drenaje y/o cálculo de cargas de lluvia. Así pues, para realizar las modelizaciones, se han estudiado las intensidades de precipitación que proponen normativas representativas de distintas regiones del mundo, con el fin de contemplar aquellos valores más elevados que den lugar a resultados más conservadores. De cada una de las normativas se han seleccionado los mayores valores de intensidad de lluvia, ligados a una determinada región geográfica y algunos de ellos incrementados según el uso del edificio. Las normativas consultadas han sido las siguientes:

- NEN 3215 Sewerage Inside Dwellings – Requirements and Determination Methods (Países Bajos);
- International Building Code (Estados Unidos);
- Saudi Building Code (Arabia Saudí);
- BS EN 12056-3:2000 Gravity Drainage Systems Inside Buildings (Reino Unido);
- Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HS – Salubridad (España).

Las intensidades máximas de precipitación indicadas por cada una de las normativas anteriores quedan reflejadas en las Tabla 1, adjunta. Algunos de los valores reflejados en la tabla reflejan cifras extraídas de mapas y figuras, por lo que deben ser consideradas como aproximadas, de naturaleza didáctica y con validez exclusiva para el presente trabajo.

Tabla 1 | Intensidades máximas de precipitación para el dimensionamiento de drenaje de cubiertas y/o cálculos de cargas de lluvia.

Normativa	Intensidad de precipitación (mm/h)
NEN 3215	108
IBC	203
SBC	180
BS EN 12056-3:2000	324
CTE	240

Se ha seleccionado una intensidad de 324mm/h para todas las modelizaciones realizadas, por ser el valor mayor en relación a los demás. No se ha contemplado la opción de construir hietogramas de precipitación con intensidades variables en el tiempo, ya que supondrían una reducción de los volúmenes totales de precipitación vertidos sobre la cubierta. Como se indicó anteriormente, para el presente estudio se han buscado valores conservadores.

Dadas las características de las cubiertas estudiadas, se ha considerado un coeficiente de escorrentía de valor la unidad, asumiendo neta toda la precipitación producida.

Aplicación de modelos hidráulicos 2D

Para realizar las simulaciones hidráulicas 2D se han utilizado los modelos Iber y MIKE 21 de DHI, contrastando los resultados obtenidos. Se han seleccionado ambos modelos debido a su amplia difusión y gran capacidad de cálculo. A pesar de que las elevadas pendientes que presentan las cubiertas modelizadas pueden conducir a situaciones de cambios de régimen hidráulico, y por tanto a inestabilidades, las robusteces computacionales de ambos modelos han permitido que los resultados obtenidos puedan ser considerados fiables para el objeto del estudio. No se debe olvidar que los modelos tratan de representar situaciones complejas del mundo real mediante simplificaciones.

En base a lo explicado en el apartado anterior, los modelos se han ejecutado aplicando precipitación sobre las superficies de las cubiertas con el objetivo de determinar las zonas de acumulación de agua y traducir esta información en cargas de lluvia.

La Figura 5 presenta unos ejemplos de los resultados obtenidos. En cada uno de los puntos que definen las superficies modelizadas se han podido obtener los calados provocados por la acumulación de lluvia. Estos calados han sido posteriormente transformados en valores de carga de lluvia para ser considerados en los estudios estructurales y optimización de la geometría de las cubiertas.

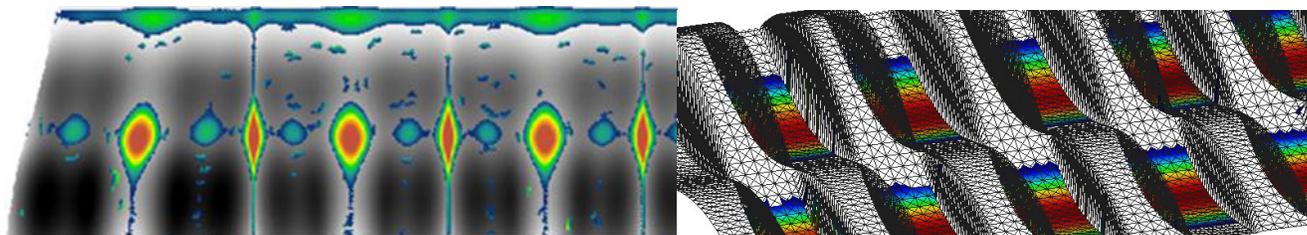


Figura 5 | Cargas de lluvia aplicadas sobre las superficies estudiadas.

Se exponen brevemente a continuación las características de los modelos construidos.

Modelo Iber

Uno de los programas empleados para el cálculo hidráulico ha sido la versión 2.4.2 del modelo Iber (Bladé et al. 2014). Se trata de una herramienta de modelización hidráulica bidimensional constituido por la integración de los modelos CARPA (de la Universidad Politécnica de Cataluña) y TURBILLON (de la Universidad de La Coruña).

Iber ha sido desarrollado conjuntamente por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, la UPC, la UdC y el CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería). El programa consta de módulos de cálculo hidrodinámico, turbulencia, transporte de sedimentos, calidad de aguas e hidrológico.

El módulo hidrodinámico del programa, empleado en el presente estudio, resuelve las ecuaciones de Navier Stokes 2D integradas en profundidad para aguas poco profundas, también llamadas ecuaciones de Saint Venant. Estas ecuaciones se resuelven por el método de volúmenes finitos y empleando un esquema numérico tipo “upwind” (CEDEX, 2016).

Para la modelización de las cubiertas por medio del programa Iber se han transformado los modelos digitales originales en mallas triangulares de cálculo de tipo RTIN (Rectangular Triangulated Irregular Network). Así pues, ambas cubiertas han quedado caracterizadas por sendas mallas de cálculo con las características geométricas incluidas en la Tabla 2.

Tabla 2 | Características geométricas de las cubiertas modelizadas con Iber.

Aspecto geométrico	Cubierta	Valor característico (m)
Resolución inicial del modelo digital de elevaciones	Preferente	0.1
	Tribuna	0.1
Tolerancia altimétrica máxima	Preferente	0.1
	Tribuna	0.1
Lado mínimo de los triángulos de la malla	Preferente	0.1
	Tribuna	0.1
Lado máximo de los triángulos de la malla	Preferente	3.0
	Tribuna	1.1

La Figura 6 muestra el aspecto de las mallas de cálculo de las cubiertas modelizadas.

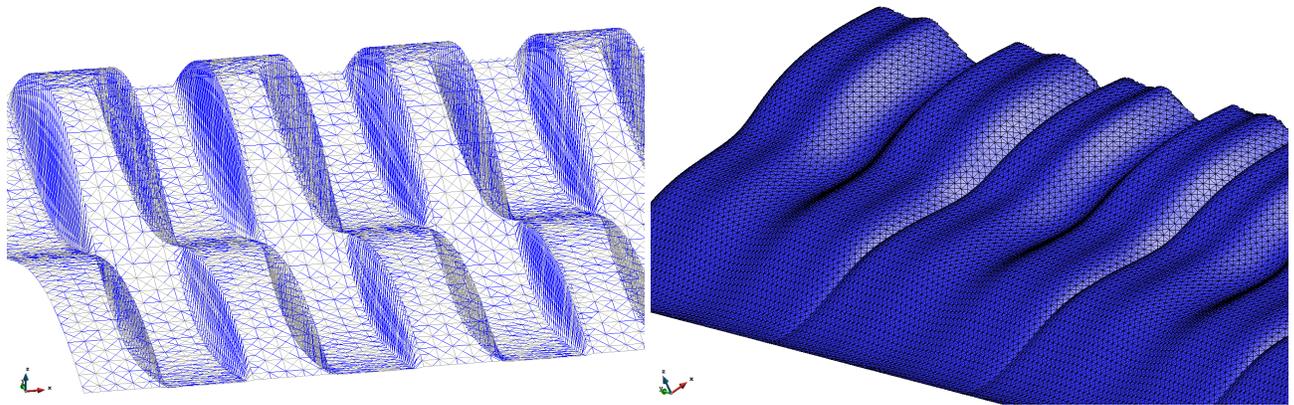


Figura 6 | Mallas de cálculo en Iber de las cubiertas modelizadas (Cubierta “Preferente” a la izquierda y “Tribuna” a la derecha).

Se ha empleado el coeficiente de rugosidad de Manning (n) para la consideración, por parte del modelo, de las pérdidas de carga generales producidas por fricción. El programa exige introducir una distribución espacial de los valores n de Manning sobre toda la malla de cálculo. De acuerdo a las características del material, se ha considerado un valor de 0.011 para ambas cubiertas. Dado que el material es el mismo en todas las superficies, la distribución espacial del valor n es homogénea.

En cuanto a las condiciones de contorno aplicadas en las simulaciones, podemos distinguir entre condiciones iniciales, condiciones de entrada y condiciones de salida. No se han aplicado condiciones internas en ninguna de las modelizaciones.

Según lo anterior, como condición inicial se ha considerado un calado de valor nulo; las condiciones de entrada han venido dadas por la introducción de lluvia sobre toda la superficie modelizada con las intensidades indicadas en apartados anteriores; y finalmente, como condición de salida, se ha fijado un calado inicial nulo.

Se ha establecido un valor de 0.01m como límite seco-mojado en los cálculos hidrodinámicos.

Se ha considerado un time step máximo de 1s en todas las computaciones realizadas con Iber. En cuanto a los períodos de simulación aplicados, en ambos modelos se han contemplado tiempos suficientes como para que el agua de lluvia inunde por completo las depresiones de las cubiertas y comience el vertido por los bordes exteriores de las mismas. De esta manera se han alcanzado los resultados más conservadores posibles.

Modelo MIKE 21

Otro de los programas empleados para llevar a cabo las simulaciones hidráulicas ha sido MIKE 21 de DHI (Danish Hydraulic Institute). MIKE 21 es un software de cálculo hidráulico 2D mundialmente reconocido y con más de 25 años de experiencia contrastada.

El módulo hidrodinámico clásico del modelo resuelve las ecuaciones de Saint-Venant 2D, promediadas en profundidad, aplicando diferencias finitas a cada elemento y utilizando algoritmos ADI.

La geometría de cálculo se ha creado a partir del modelo de elevaciones original, transformando el mismo en una malla rectangular de características resumidas en la Tabla 3.

Como ocurre con otros modelos, MIKE 21 requiere la introducción de un coeficiente de rugosidad, distribuido espacialmente, para poder computar las pérdidas de carga por fricción. En consonancia con los otros modelos, el valor considerado para el número de Manning (n) ha sido de 0.011.

Se ha considerado a una lámina de agua de calado nulo como condición inicial en todas las superficies modelizadas; lluvia sobre celda como condición de entrada y contornos del modelo abiertos con lámina de agua precedente a una cota ficticia de 7.5m en el caso de la cubierta “Preferente” y a -0.5m para el caso de la cubierta “Tribuna”.

En todos los modelos MIKE 21 se ha contemplado un valor de 0.002m para el parámetro “Drying depth” y 0.004 para “Flooding depth”.

El time step aplicado en todas las modelizaciones con MIKE 21 ha sido de 0.01s.

Al igual que con los modelos Iber, los tiempos de simulación contemplados han sido los suficientes como para que la lluvia inunde por completo las depresiones de las superficies modelizadas y comience el vertido periférico.

Tabla 3 | Características geométricas de las cubiertas modelizadas con MIKE 21.

Aspecto geométrico	Cubierta	Valor característico (m)
Resolución inicial del modelo digital de elevaciones	Preferente	0.1
	Tribuna	0.1
Resolución de la geometría rectangular de cálculo	Preferente	0.1
	Tribuna	0.1

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Finalizadas todas las simulaciones, a continuación se exponen los resultados obtenidos y el proceso aplicado para asegurar la calidad de los modelos.

Medida de la calidad de los modelos

Para validar las simulaciones llevadas a cabo se han aplicado dos métodos de aseguramiento de la calidad de los modelos: Balance volumétrico y revisión del número de Courant (DHI, 2009).

Balance volumétrico

Este método compara el volumen de agua que sale del sistema con el entrante (lluvia) y el almacenado en la cubierta. En el caso de modelizaciones de lluvia sobre celda, diferencias de $\pm 5\%$ del volumen saliente son consideradas aceptables (Engineers Australia, 2012). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 | Errores volumétricos obtenidos en las simulaciones.

Software	Cubierta	Error volumétrico (%)
Iber	Preferente	-0.27
	Tribuna	0.13
MIKE 21	Preferente	-1.22
	Tribuna	$5.3 \cdot 10^{-3}$

Revisión del número de Courant

Este método se ha aplicado a las simulaciones realizadas con MIKE 21 y establece que el número de Courant no debe superar la unidad en el momento de aplicar la siguiente expresión:

$$Cr = Vmax (Time\ step / Grid\ resolution) \tag{1}$$

Siendo *Cr* el número de Courant (adimensional) y *Vmax* la máxima velocidad de flujo obtenida en cada simulación. Los resultados obtenidos quedan representados en la Tabla 5.

Tabla 5 | Valores de Cr obtenidos en las simulaciones realizadas con MIKE 21.

Cubierta	Cr
Preferente	0.86
Tribuna	0.37

Resultados obtenidos

Una vez validados los resultados de las simulaciones, a continuación se muestran los resultados obtenidos. La figura 7 representa los calados máximos generados en las simulaciones llevadas a cabo con Iber.

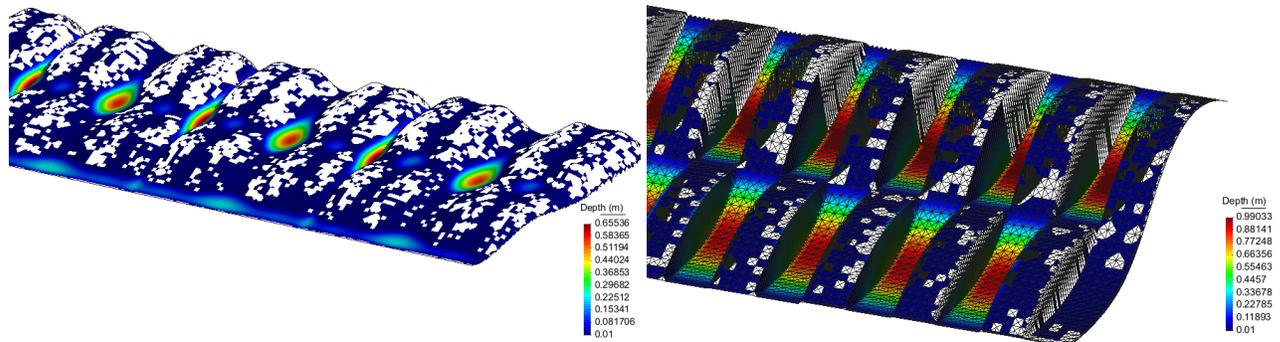


Figura 7 | Calados máximos obtenidos con Iber en cubierta “Tribuna” a la izquierda y “Preferente” a la derecha.

Estos calados han sido transformados en cargas máximas de lluvia (en kN/m²) espacialmente distribuidas. Ésta es una transformación sencilla, derivada de multiplicar cada uno de los calados específicos en cada celda (en metros) por el peso específico del agua (9.8 kN/m³), resultando los valores representados en la Figura 8.

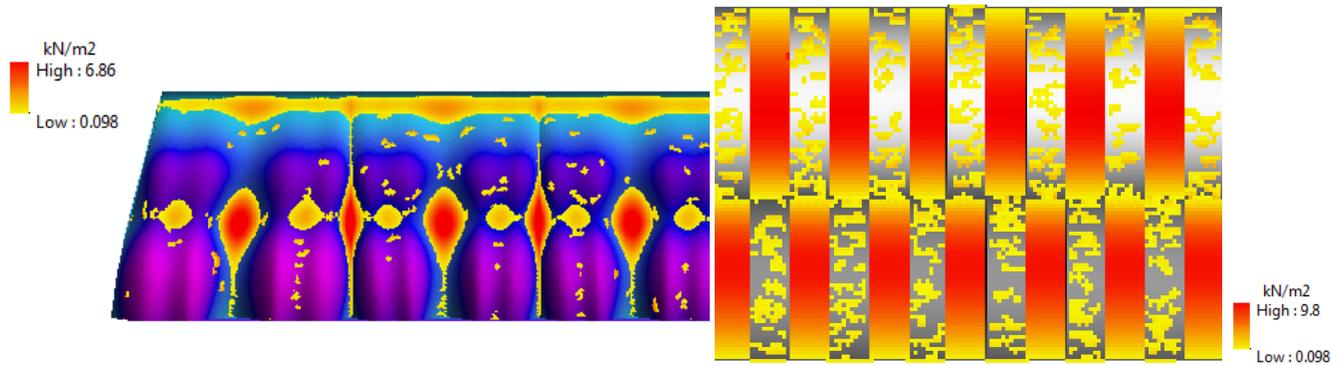


Figura 8 | Cargas máximas de lluvia sobre cubierta “Tribuna” a la izquierda y “Preferente” a la derecha.

Para comprender mejor la variabilidad espacial de las cargas de lluvia obtenidas, la Figura 9 muestra una representación tridimensional de las mismas.

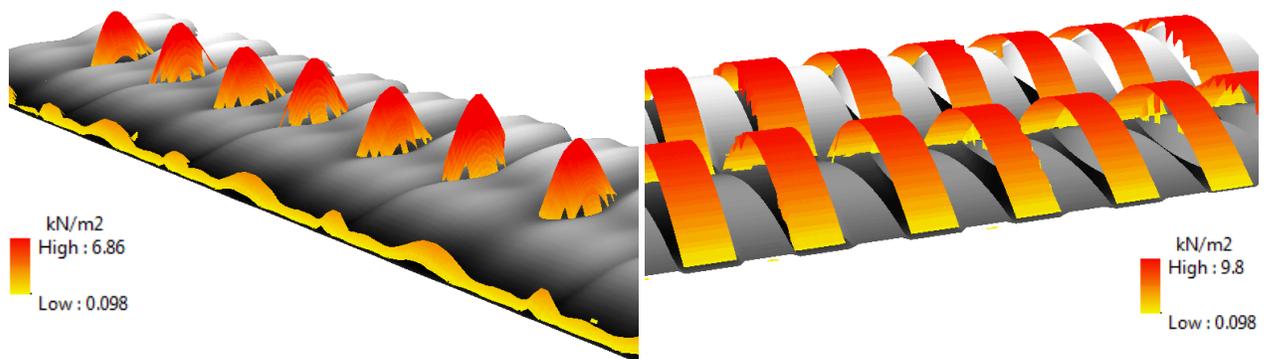


Figura 9 | Representación 3D de las cargas máximas de lluvia sobre cubierta “Tribuna” a la izquierda y “Preferente” a la derecha.

Por otro lado, las Figuras 10 y 11 muestran los calados máximos generados tras las simulaciones realizadas con MIKE 21.

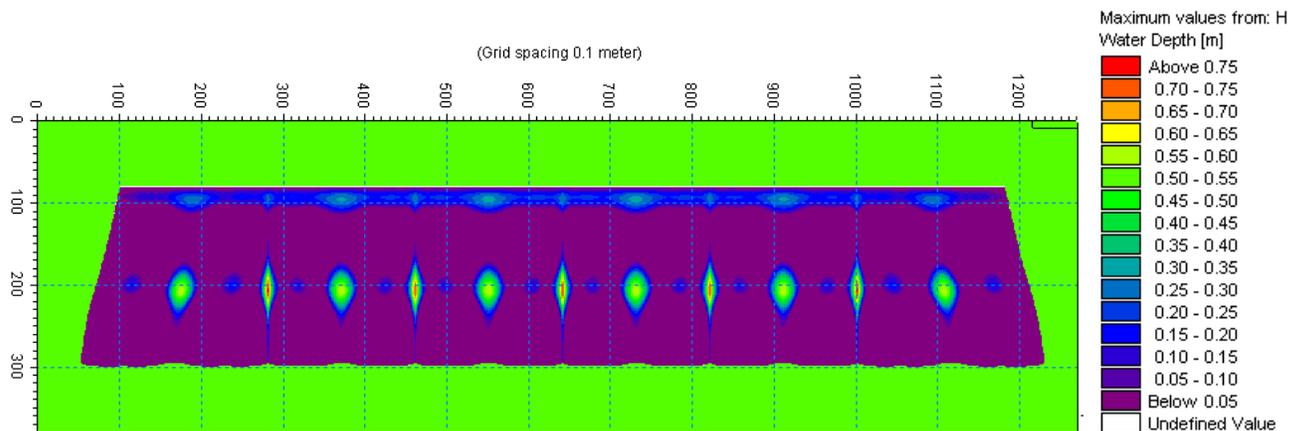


Figura 10 | Calados máximos obtenidos con MIKE 21 en cubierta “Tribuna”.

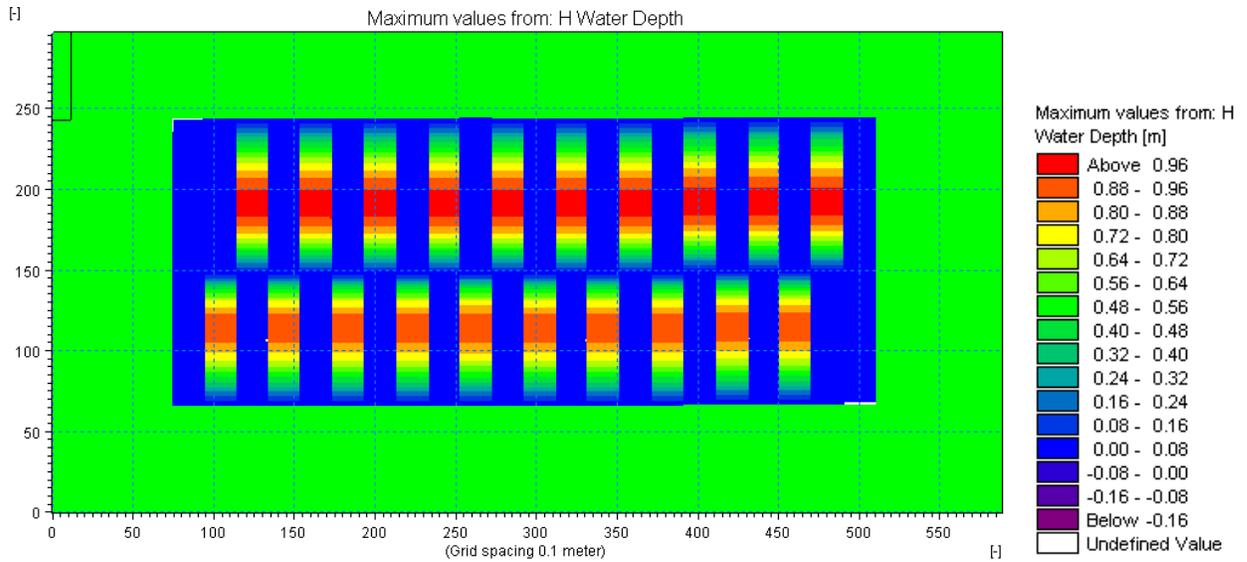


Figura 11 | Calados máximos obtenidos con MIKE 21 en cubierta “Preferente”.

Y de igual modo, la Figura 12 representa las cargas de lluvia asociadas.

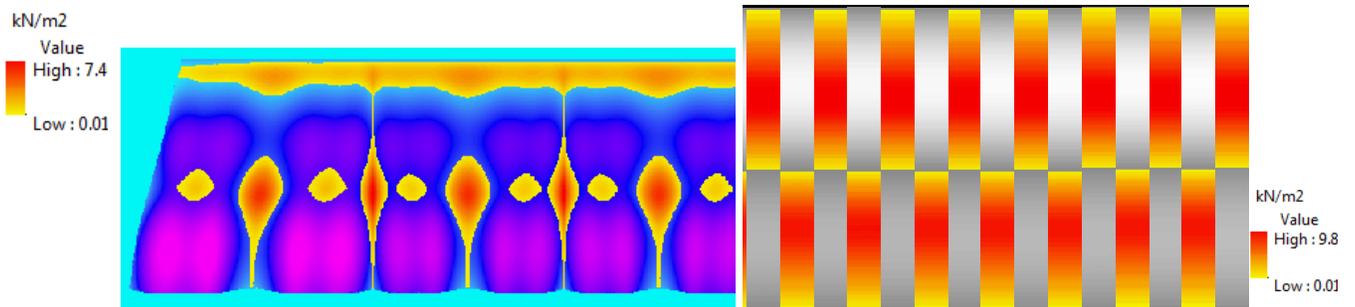


Figura 12 | Cargas máximas de lluvia sobre cubierta “Tribuna” a la izquierda y “Preferente” a la derecha.

La Figura 13 muestra las distribuciones espaciales, con representación tridimensional, de las cargas de lluvia obtenidas.

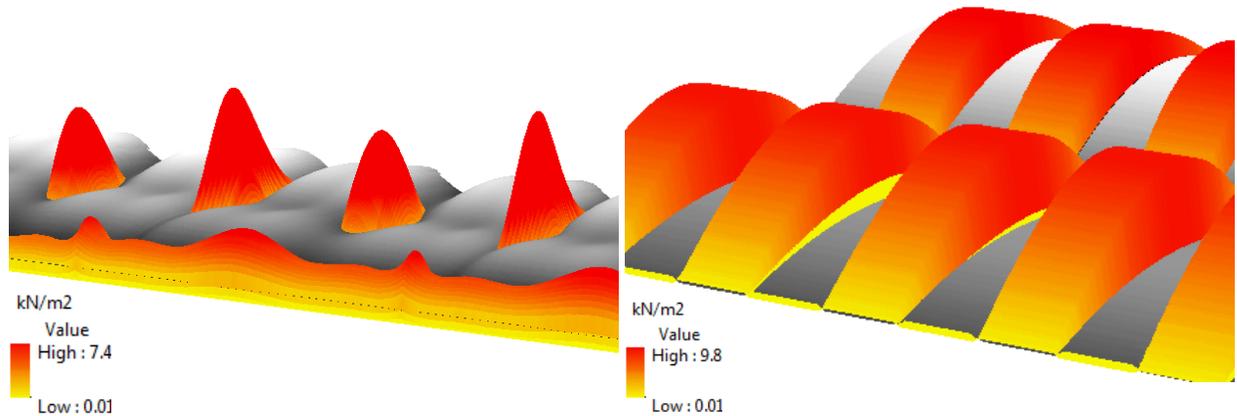


Figura 13 | Representación 3D de las cargas máximas de lluvia sobre cubierta “Tribuna” a la izquierda y “Preferente” a la derecha.

A la vista de los resultados obtenidos, se pueden apreciar ciertas diferencias en los resultados obtenidos con Iber y lo generado con MIKE 21. Si bien la cubierta “Preferente” arroja resultados similares, la cubierta “Tribuna”, debido a diferencias geométricas ligadas a los procesos de creación de mallas, denota variaciones en los calados máximos obtenidos.

CONCLUSIONES

Con este trabajo se manifiesta la versatilidad del uso de software hidráulico bidimensional en aplicaciones diferentes a las tradicionales, como es el caso de la determinación de cargas sobre elementos estructurales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento por el apoyo recibido por parte de la empresa AECOM Spain en la elaboración de este trabajo.

REFERENCIAS

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Dolz, J., Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol.30(1) pp.1-10.
- BSI. 2007. *BS EN 12056-3:2000. Gravity Drainage Systems Inside Buildings*. UK.
- Centro de Estudios Hidrográficos – CEDEX. 2016. *Modelo Iber 2.0. Manual del usuario*. Publicaciones CEDEX. España.
- CTE. 2007. *Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HS – Salubridad*. España.
- Danish Hydraulic Institute (DHI). 2009. *MIKE 21. Hydrodynamic Module. User Guide*. Denmark.
- E. Bladé, M. Sánchez-Juny, H. P. Sánchez, D. Niñerola y M. Gómez. 2009. *Modelización numérica en ríos en régimen permanente y variable*. Ediciones UPC. Barcelona, España.
- Engineers Australia. 2012. *Australian Rainfall and Runoff. Revision Project 15. Two Dimensional Modelling in Urban and Rural floodplains*. Australia
- ICC IBC. 2012. *International Building Code*. U.S.A.
- NEN. 2011. *NEN 3215 Sewerage Inside Dwellings – Requirements and Determination Methods*. The Netherlands.
- SBCNC. 2007. *Saudi Building Code 301. Structural – Loading and Forces*. Saudi Arabia.