

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

MODELOS REGIONALES DE INUNDACIÓN.
PROYECTO AUCKLAND REGIONWIDE FLOOD MODELLING.

JORGE ASTUDILLO C.¹
SEN YANG²

RESUMEN

Hoy en día los modelos numéricos hidrológicos/hidráulicos son decisivos en el proceso de planificación urbana y manejo del riesgo de inundaciones para gobiernos locales y regionales. Tres elementos son fundamentales a la hora de diseñar un modelo de inundación: la disponibilidad y calidad de información, los recursos tecnológicos, y la calidad y experiencia técnica. La escala y detalle de un modelo regional difiere de los tradicionales modelos locales o troncales, y buscan facilitar la toma de decisiones políticas, gestión de aguas pluviales, desarrollo urbano e impacto del cambio climático, entre otras materias.

Desde el año 2020, Ewaters NZ Ltd. trabaja en el desarrollo de un modelo de inundación para la Región de Auckland. Este se compone de varios proyectos de investigación, diseño, y desarrollo de las metodologías y las especificaciones de los productos de entrega. Auckland Regionwide Project se aleja de los enfoques tradicionales, y cubre cerca de 5000km² que componen la región de Auckland.

Este proyecto se caracteriza por integrar información regional en un sistema geoespacial, crea una red geométrica del sistema de drenaje, y la usa para analizar información, y diseñar y construir un modelo hidráulico. La idea de red no es nueva en concepto, sin embargo, el desafío es la escala y densidad de la información. La metodología proporciona un manejo coherente de la información regional, permitiendo el estudio a diferentes escalas. La innovación y la tecnología de la información juegan un rol indispensable en el desarrollo de las soluciones.

El presente trabajo se centra en el proceso de diseño de la metodología del Auckland Regionwide Project, y describe el desarrollo técnico del proyecto. En ese contexto, se ofrecen ejemplos de contraste con la ciudad de Shanghai, China y pone miras en las alternativas para Chile en el desarrollo de programas y soluciones a medida.

¹ Director and Principal Hydraulic Engineer, Ewaters NZ Ltd., email: jorge.astudillo@ewaters.co.nz

² Principal Hydraulic Engineer, Ewaters (Shanghai) Co. Ltd., email: johnson.yang@ewaters.cn

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

La ciudad de Auckland cuenta con una sólida planificación urbana con estrictos procesos de autorización para el control del desarrollo sustentable. Este proceso, enmarcado dentro de los límites establecidos por el Plan Regulador, se ha hecho cada vez más complejo y riguroso. Además, las agencias públicas en Nueva Zelanda ponen a libre disposición un extenso catálogo de información pública a la comunidad técnica y general con una alta calidad de detalle. Esto incluye topografía Lidar de 1m de resolución y un sin número de capas SIG disponibles. Esta información se ha generado a través de los años, siendo constantemente revisada, actualizada y mejorada. Por otra parte, los modelos numéricos han evolucionado rápidamente, incorporando tecnología GPU y optimizando los procesos numéricos.

Este escenario, y junto con las recientes inundaciones y consideraciones del cambio climático, han dado fuerza a la necesidad de un modelo regional de inundaciones. Desde el 2020 Ewaters ha estado desarrollando el Auckland Regionwide Project, que involucra una serie de proyectos de investigación e implementación de un modelo numérico de inundación regional de detalle. El desafío es integrar la información geoespacial en una estructura coherente que permita profundizar el entendimiento del sistema y el desarrollo de estudios a escala.

Auckland Regionwide Project se aleja de los enfoques tradicionales, utilizando las últimas tecnologías en información de datos, herramientas de procesos e integración técnica para el diseño y desarrollo de las metodologías a medida. La metodología y consideraciones técnicas de este proyecto se describen en los siguientes capítulos de este trabajo.

1.2. OBJETIVOS GENERALES

El objetivo principal es desarrollar un modelo de riesgo de inundación a nivel regional. Por otra parte, a lo largo de varios proyectos desarrollados se identifican tres objetivos secundarios esenciales para crear soluciones efectivas: (1) Consistencia en el desarrollo de modelos en la región, para promover el análisis a escala regional. Esto facilita el estudio del cambio del uso de suelo, el impacto del desarrollo proyectado en el plan regulador, y el impacto del cambio climático, entre otras materias. (2) El mejor uso de la información disponible, integrando la información y el manejo de datos de manera práctica y eficiente, para minimizar los costos y errores. Esto, sin embargo, balanceando los esfuerzos técnicos de manera de alcanzar la mejor relación de costo y beneficio. (3) Facilitar la difusión de la información generada, tanto para la comunidad técnica como el público en general. Esto incluye la selección de los formatos de difusión, y generación de mapas de inundación de acuerdo con estrictas reglas de implementación que buscan la consistencia en la interpretación del riesgo.

1.3. CONSIDERACIONES BÁSICAS

Primero, la selección de los softwares y hardware atiende varios aspectos prácticos. El formato base de manejo de información geoespacial en los organismos públicos en Nueva Zelanda es SIG (Sistema de Información Geográfica). Plataformas SIG, además de contar con interfaces gráficas, son simples en estructura de objetos, fuertes en procesamiento de datos, flexibles en el diseño de herramientas y son más adecuados para los procesos a escala. Un formato de datos de entrada y salida compatible con plataformas SIG facilita la

transferencia de información a través de todas las fuentes y procesos. La incorporación del software hidráulico agregó a la discusión aspectos técnicos hidráulicos, numéricos, de precisión, de escalas, compatibilidad, y formatos de entrada y salida. Bajo estas consideraciones el software seleccionado para el modelo hidráulico es Tuflow (BMT Commercial Australia Pty Ltd), que además utiliza unidades procesamiento grafico (GPU) para incrementar la rapidez de cálculo. Todas estas discusiones se desarrollan de forma amplia en conjunto con las visiones técnicas del Auckland Council.

1.4. INFORMACIÓN DISPONIBLE

Auckland cubre un área de aproximadamente 4906 km² y organiza el manejo de sus cuencas dividiendo la región en cerca de 230 unidades o “cuencas consolidadas”. La información disponible fundamental para este proyecto es: (1) Topografía Lidar de 1m de resolución generada en el año 2016 para toda la región de Auckland. (2) Datos digitales de infraestructura pública del sistema de drenaje. (3) Capas regionales para el análisis de la hidrología (tipos de suelo, cobertura de la superficie, plan regulador, calles, edificaciones, levantamientos, etc.). (4) Reportes de inundación entregados por el público general y personal de terreno. La información contiene varias tormentas recientes que superan la frecuencia de 100 años, cubriendo la mayoría de la zona de estudio. Esto se complementa con registros fotográficos y levantamiento de los niveles habitables. (5) Puntos de levantamiento describiendo el lecho de los cauces abiertos y otros elementos topográficos de interés.

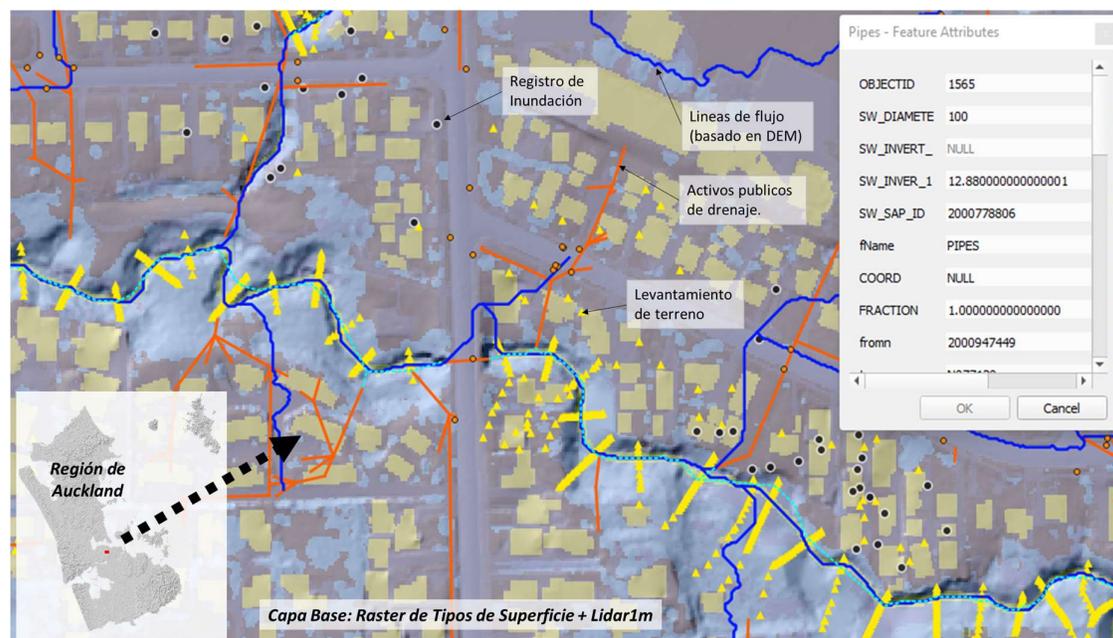


Figura 1. Lidar (2016) de 1m e información de infraestructura y drenaje. Ejemplo en la Región de Auckland, zona urbana.

2. METODOLOGÍA

2.1. ESQUEMATIZACIÓN GENERAL

De manera de maximizar el uso de la información disponible, el proyecto cubre el territorio regional en su totalidad con una grilla 2D e incorpora las estructuras esenciales de drenaje. El proyecto divide la región en 24 modelos: 18 unidades rurales, y 6 unidades urbanas (Figura 2). Ambos tipos de unidades consideran el mismo diseño conceptual de modelo: el dominio 2D

describe los flujos superficiales y cauces abiertos, y el dominio 1D describe el sistema troncal y estructuras esenciales para el drenaje. Las unidades urbanas y rurales de la región y sus tamaños se pueden ver en la Figura 2.

Al momento de este trabajo, el proyecto ha finalizado todas sus 18 unidades rurales, y está en proceso de revisión del proyecto piloto y metodología de la primera de las 6 zonas urbanas. En la metodología se destacan dos procesos bien definidos: El modelo SIG o red geométrica, y el modelo hidráulico.

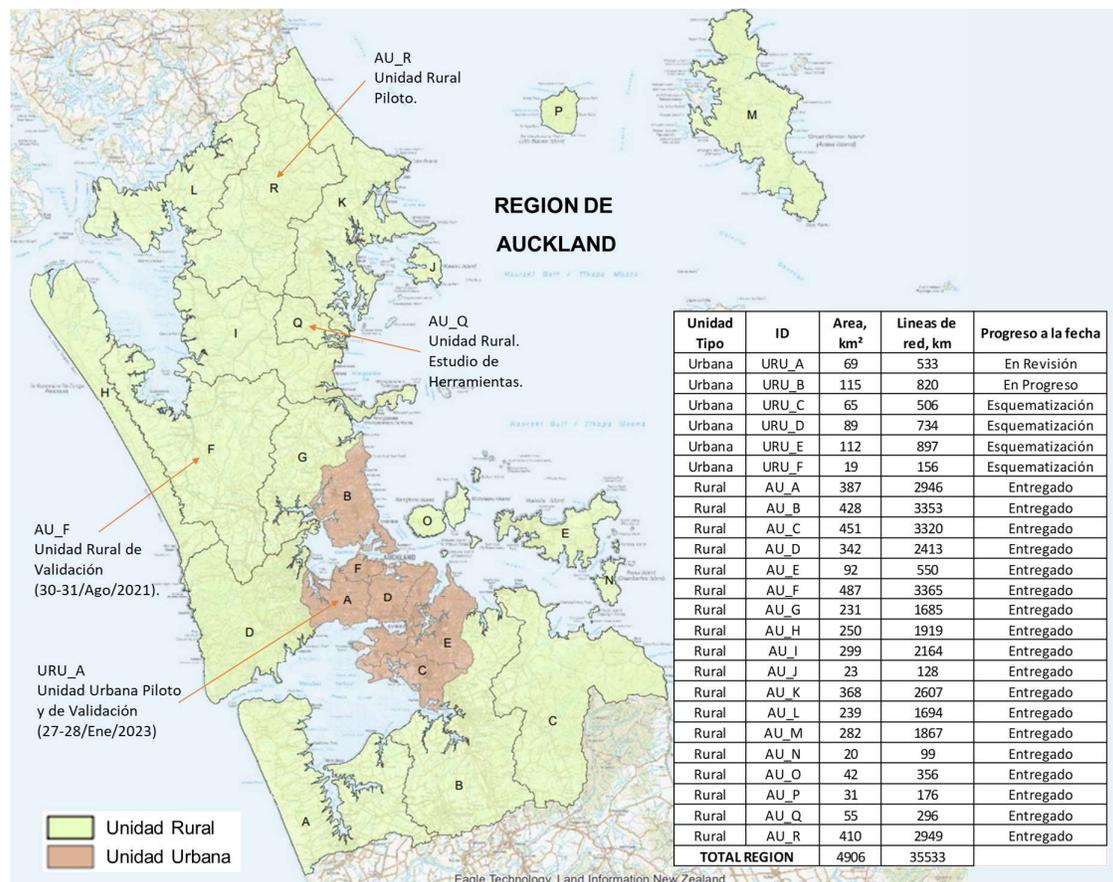


Figura 2. Unidades Rurales y Urbanas del Modelo Regional de Auckland. Mapa y estadísticas generales.

2.2. INTEGRACIÓN CON SIG

El proceso de construcción de los modelos a escala es sólo posible a través de una integración con SIG para el manejo y análisis de datos de entrada y salidas. Estos procesos SIG no sólo son para recopilar y superponer la información geoespacial, sino que para construir una estructura de relación entre objetos llamada red geométrica (Figura 3). De esta forma, todo el sistema de drenaje está relacionado en sí mismo, definiendo diferentes dimensiones de acuerdo con los atributos y la relación con otros objetos o capas. Esta estructura es esencial para integrar la información, operar y modificar los objetos de manera eficiente y flexible, de los más de 35 mil kilómetros de líneas de red que componen el drenaje regional.

Dentro de los propósitos de la red geométrica está: (1) Estudiar y corregir la conectividad. (2) Análisis de los cursos superficiales, depresiones y volúmenes. (3) Completar la información necesaria para el modelo hidráulico. (3) Construir el modelo hidráulico. (4) Integrar el DEM

(Modelo Digital de Elevación), elevaciones de tuberías, y levantamientos del lecho del río, para generar y corregir los perfiles verticales del modelo hidráulico (ambos: 1D y 2D). (5) Generar secciones transversales sobre la red para el proceso de análisis y mapeo de las zonas de riesgo. (6) Generación de mapas de inundación estandarizados.

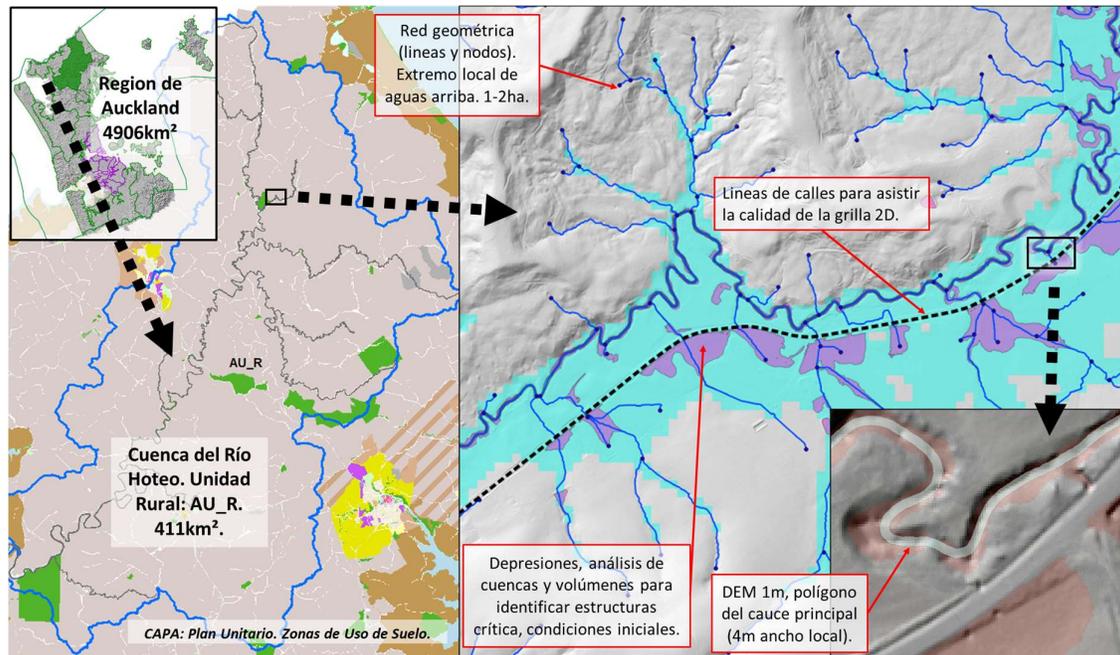


Figura 3. Ejemplo de la red geométrica en varias escalas. Cuenca del Río Hoteo, zona rural de la Región de Auckland.

Otros de los procesos de interés desarrollados en SIG son: (1) Identificación en el DEM del lecho principal de los cauces. (2) Modificación y corrección del DEM de anomalías o errores locales, puentes, e incorporar el perfil vertical del cauce en el DEM. (3) Definir los polígonos de lluvias y los parámetros hidrológicos para la estimación de las pérdidas de agua, que se definen de acuerdo con el uso del suelo del plan regulador, clasificación del drenaje del suelo, porción de cobertura impermeable, variabilidad espacial de la precipitación, entre otras cosas. (4) Generar las series de lluvia efectiva de las tormentas de diseño, de acuerdo con los parámetros de cada uno de los polígonos de lluvia.

Dado que el proyecto busca consistencia, algunos procesos de datos son programados. Esto requiere tiempo en la implementación, pero facilita los procesos a escala significativamente.

2.3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO

La esquematización del modelo hidráulico (desarrollado en Tuflow) considera las siguientes características generales: (1) La resolución de la malla del modelo para zonas rurales es de 4m, y 2m para zonas urbanas. Cada celda de la grilla de 4m usa una resolución de 1m para describir sus caras o perfiles, y volúmenes internos, incrementado la precisión del modelo. (2) Modificaciones del DEM que incluyen la descripción del cauce principal; la descripción del perfil vertical para cauces abiertos conectados con tuberías; correcciones en cruces y puentes; líneas de calles y otros elementos estructurales son usadas como “líneas de quiebre”. Estas últimas mejoran la descripción de los niveles de derrame para variadas resoluciones de la grilla. (3) Grillas o polígonos para la descripción de varios tipos de infiltración, rugosidades, condiciones iniciales, entre otras propiedades de la superficie. (4) Las condiciones de bordes

son de precipitación y niveles del mar. (5) La hidrología es albergada en polígonos de lluvia, que distribuye las series de lluvia efectiva sobre la grilla 2D del modelo. (6) Sólo tuberías con un área contribuyente mayor que 6 hectáreas son seleccionadas para el modelo hidráulico 1D. (7) Puntos de descarga y entrada de tuberías 1D son conectados con el modelo 2D. (8) Todos los nodos y alcantarillas de la red geométrica son incluidos en el modelo hidráulico. Estos colectan las aguas desde el dominio 2D, y lo entregan en los puntos de descarga en el modelo 1D, y de acuerdo con la estructura de la red de SIG.

La Figura 4 compara el modelo geométrico (SIG) y el modelo hidráulico resultante. La mayoría de las decisiones técnicas del modelo hidráulico fueron estudiadas en sensibilidad e importancia, para ser implementadas de acuerdo con los objetivos de proyecto.

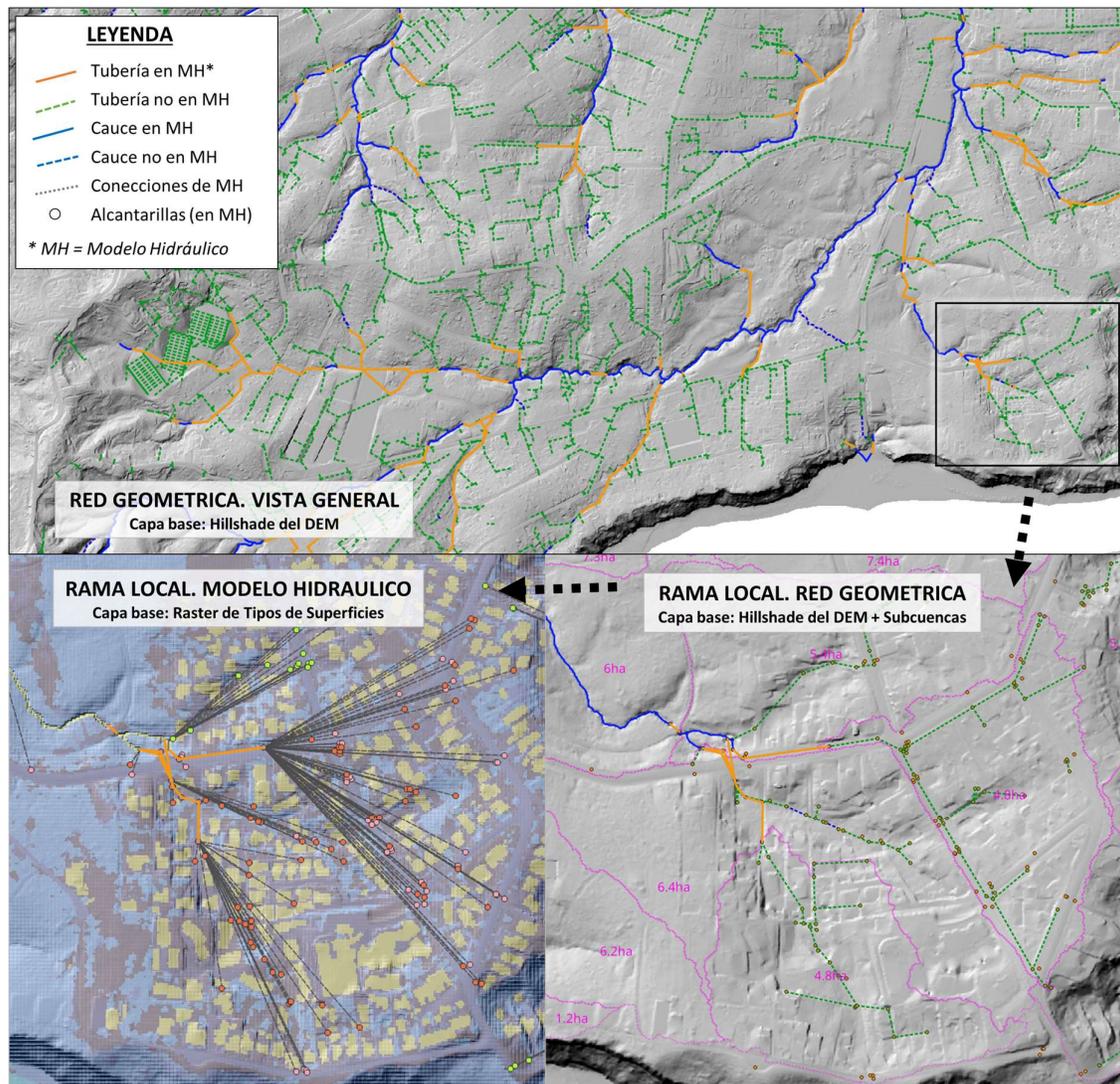


Figura 4. Representación SIG vs Modelo Hidráulico. Red geométrica y modelo hidráulico.

2.4. VALIDACIÓN Y REVISIONES (LIMITACIONES)

Los procesos en SIG no están exentos de potenciales errores. Ambos, el modelo SIG y el modelo hidráulico son revisados exhaustivamente para encontrar excepciones y corregir errores. El proceso de revisión tuvo varias etapas, empezando en la red geométrica, que

permite separar elementos conflictivos (ejemplos: pendientes negativas, conexiones incompletas). Los productos preliminares del proyecto son entregados al Auckland Council para efectuar una revisión independiente en tres materias: calidad de datos y suposiciones, correcta implementación de los objetos de modelo (de acuerdo con el diseño), y la revisión de los mapas de inundación.

Una unidad urbana y otra rural fueron seleccionadas para la validación y ajuste del modelo hidráulico. Los ajustes se efectúan en consideraciones de la red, y parámetros globales, para ser aplicados en todas las unidades de forma consistente. Se dispone de dos tormentas de gran escala, ambas del orden de 100 años de periodo de retorno ($T=100$ años), y una para cada unidad de validación (30-31/ agosto del 2021 en Kumeu; 27-28 enero del 2023, Auckland City, Figura 2). La selección considera la importancia política de la unidad y la disponibilidad de información de lluvias y registros de inundación (niveles y fotos) para los análisis.

2.5. PRODUCTOS DE ENTREGA

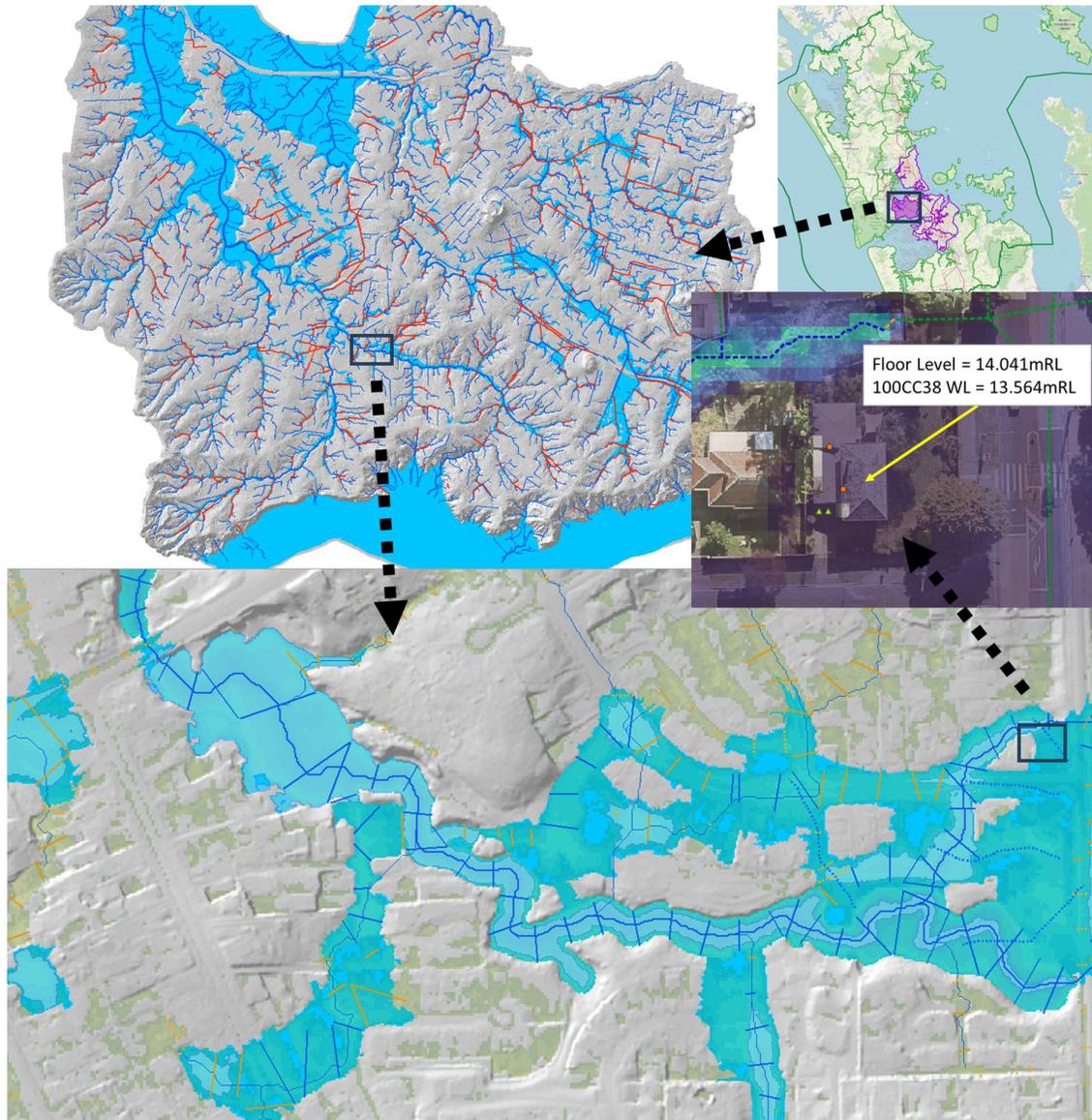


Figura 5. Detalle de los mapas de inundación, red geométrica de mapeo, secciones transversales, riesgo a propiedades habitables.

Dentro de los productos que se entregan se destacan: el modelo o red geométrica (SIG), el modelo numérico hidráulico y los reportes técnicos. El modelo hidráulico incluye la implementación de 18 tormentas de diseño. Los resultados de los modelos se proporcionan para un periodo de retorno de 100 años y con tres escenarios de cambio climático. Estos resultados (1D, 2D, dinámicos y espaciales) se entregan en formato SIG y otros formatos estándares para su incorporación en otros paquetes, facilitando su difusión entre la comunidad técnica.

Además, se entregan mapas de inundación para la tormenta de los 100 años y considerando factores de cambio climático, todo aquello de acuerdo con los estándares locales y acuerdos técnicos con el Auckland Council. El mapa es procesado a través de la red geométrica, y usando la información colectada por las secciones transversales. A la fecha de este trabajo, alrededor de un 50% de la cobertura regional tiene mapas publicados por este proyecto.

3. DISCUSIÓN

3.1. METODOLOGÍAS A MEDIDA

La metodología para Auckland busca ajustarse a sus particularidades. El Auckland Council tiene el mérito de tener su información bien georreferenciada en un sistema de manejo coherente, y mantener una actitud técnica de cooperación e innovación. Esto le permite explorar mejores herramientas de manejo. Ciertamente ninguno de estos sistemas y estructuras es perfecto, pero se trabaja en ello.

La motivación de este trabajo es compartir alternativas y herramientas en el manejo del riesgo en regiones. Sin embargo, en la búsqueda de soluciones regionales, las experiencias de cada comunidad son variadas, dependiendo en gran parte de las escalas, las necesidades, y los recursos económicos disponibles para el desarrollo de soluciones. En este contexto y como parte de este trabajo, a continuación se analizan otros proyectos a gran escala con elementos de interés, con el fin de conceptualizar una metodología aplicable a Chile.

3.2. PLAN DE MANEJO PARA SHANGHAI

Ewaters Shanghai realizó el estudio hidráulico y modelo numérico para desarrollo del plan de manejo de aguas lluvias del centro empresarial y financiero de Shanghai, en el corazón de la ciudad. Tras un explosivo crecimiento, el gobierno local busca entender mejor su sistema de drenaje, su capacidad, limitaciones y alternativas de mejora, con el objetivo de controlar los riesgos de inundación para el presente y futuro.

Sin embargo, en Shanghai la información de terreno disponible (modelo digital de elevación, DEM) es entre 10-20m de resolución, que es complementada con un levantamiento de secciones transversales en el sistema de canales y ríos. Por otro lado, la ciudad cuenta con una gran cantidad de estaciones de monitoreo de lluvias, niveles de aguas a lo largo del sistema de canales, estaciones de bombeo y compuertas.

Dada estas condiciones de información, escala, complejidad y objetivos, los modelos, que cubren 3154 km², se centraron en definir unidades hidráulicas semindependientes o celdas que se conectan entre ellas a través de canales, compuertas o estaciones de bombeo. Cada celda considera una curva de volumen basada en el DEM, complementada con los limitados levantamientos locales que permiten mejor definición de los niveles mínimos y niveles de

derrame. Las condiciones de borde del mar y ríos son estudiadas separadamente para definir condiciones de interés en los flujo y nivel de aguas, que son estudiados en el modelo para diferentes tormentas de diseño. Las mediciones de lluvias, niveles y flujos fueron usadas para calibrar 3 tormentas históricas.

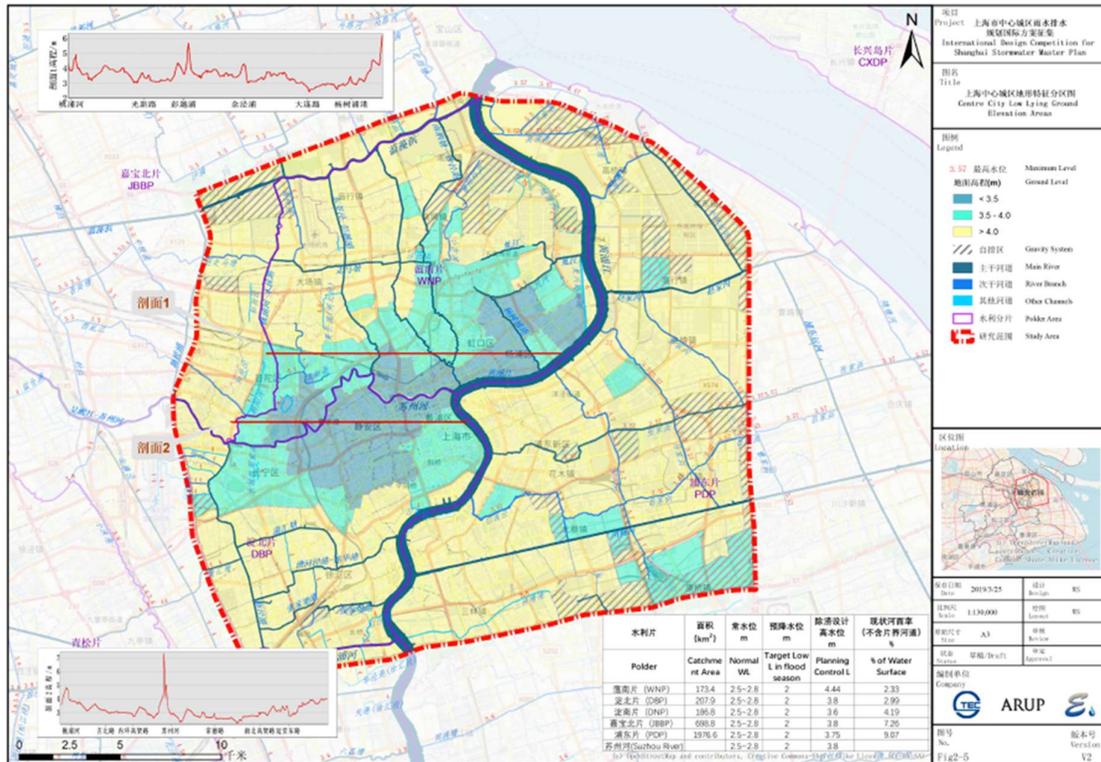


Figura 6. Área de estudio para el Plan Regulador de Shanghai, Ewaters Shanghai 2019.

El estudio usa la modelación hidráulica como herramienta de análisis, sin embargo, primero debe estudiar el sistema de drenaje e integrar SIG con las mediciones temporales. El análisis de la cuenca identifica las zonas débiles antes del ejercicio de modelación, para utilizar los recursos de manera inteligente e incrementar el foco del estudio en las zonas de mayor riesgo. Las tecnologías del proyecto se centran en el proceso de integración de datos. El estudio logra refinar el entendimiento del sistema de drenaje, define limitantes en los volúmenes y caudales que cada unidad e infraestructura hidráulica puede servir, y describe las opciones de actualizaciones que el mega sistema de drenaje puede contemplar. Los resultados fueron utilizados para actualizar el plan regulador y priorizar las soluciones de mayor beneficio.

3.3. ALTERNATIVAS DE BAJO COSTO

Resultados de estudios en China y Nueva Zelandia fueron comparados con mapas generados por JBA Consulting UK usando información satelital de terreno (DEM de 30m o menor en algunas localidades). En esta aplicación, JBA toma ventaja de las tecnologías de información, logrando un manejo integrado de datos y procesos a escalas globales para generar mapas de inundaciones en áreas donde no se dispone de mejor información.

En escalas regionales, los resultados de 30m ya ofrecen suficiente detalle para llevar a cabo investigaciones en las áreas de mayor riesgo (Figura 7). Estos mapas pueden ser combinados con datos actualizados del terreno y otras capas para generar nuevas capas de información, lo

que permite maximizar la utilización de los datos, mejorar el entendimiento y la gestión de las cuencas, dirigir los recursos a las áreas de mayor necesidad y diseñar programas de estudio de mediano y largo plazo, como las aplicaciones en Shanghai y Auckland.

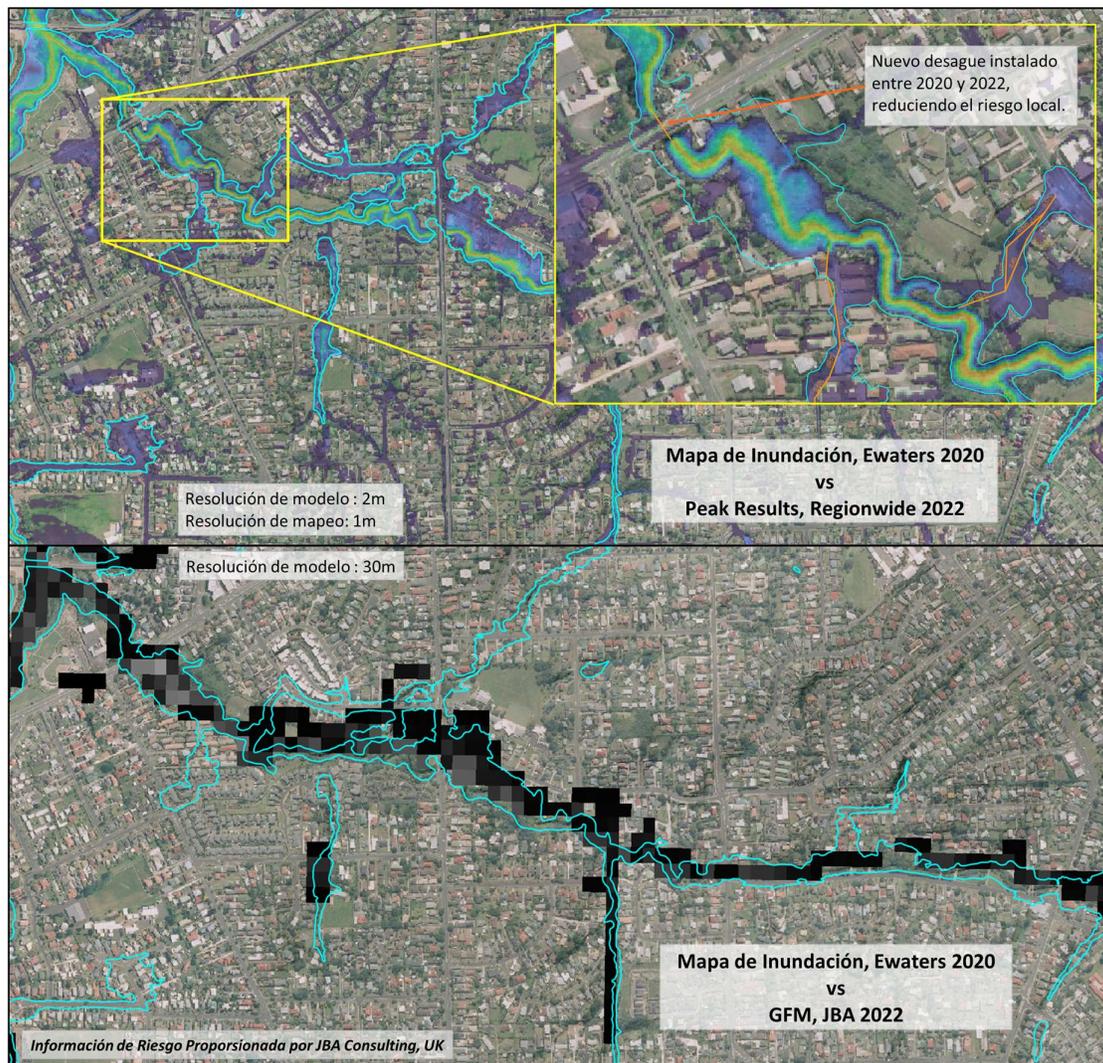


Figura 7. Comparación de escalas y precisión de mapas de inundación de 3 estudios en la zona de Auckland. T=100 años.

3.4. SOLUCIONES INTEGRALES

La estructura de datos y diseño de los procesos permiten un sin número de otras aplicaciones. Algunas soluciones implementadas permiten el monitoreo, despliegue y análisis de mediciones en tiempo real, e integrar con modelos hidráulicos y predicciones meteorológicas para el control de riesgo de inundaciones. Otros sistemas usan la estructura de una red geométrica para analizar el comportamiento del sistema en tiempo real, sin necesidad de un modelo numérico. Modelos numéricos determinísticos o estadísticos pueden ser incorporados para refinar las predicciones. La información puede ser desplegada en varios formatos y plataformas, y asistir el sistema de alertas. Varios modelos producidos en China ya cuentan con soluciones de tiempo real, siendo probadas y mejoradas constantemente.

Por otro lado, por su tamaño y resolución, modelos como los de Auckland no pueden ser activados en tiempo real, ya que los tiempos de simulación son muy largos comparados con el

tiempo disponible para pronósticos (3-4 días con 2x24Gb GPU). Cambiando la resolución se obtienen más rápidos resultados (4-6hrs), pero no suficiente para un sistema de tiempo real. Mientras estas limitaciones existan y esperamos nuevos avances tecnológicos, las ideas se centran en usar el modelo regional de Auckland para crear una carpeta de escenarios. Estos pueden ser usados en conjunto con la red geométrica y las mediciones de lluvia con radar, para producir un modelo, estadístico o semi determinístico, que incorpore las variables espaciales.

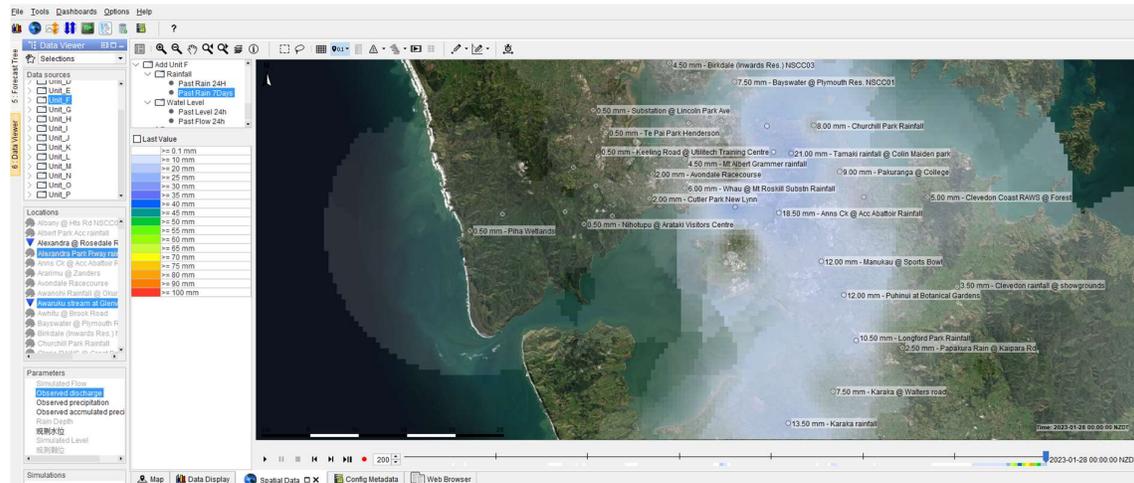


Figura 8. Sistema Piloto de Pronóstico de Inundaciones en Tiempo Real. Plataforma Delft-FEWS, Precipitaciones, Auckland.

3.5. ALTERNATIVAS EN CHILE

Las recientes tormentas extremas que afectaron el territorio chileno exponen la escala del problema. Una cuenca es la unidad mínima requerida para el estudio de la respuesta de ríos bajo tormentas extremas, desde cordillera a mar. Esto requiere un esfuerzo regional y de país en la compilación y difusión de información digital relevante.

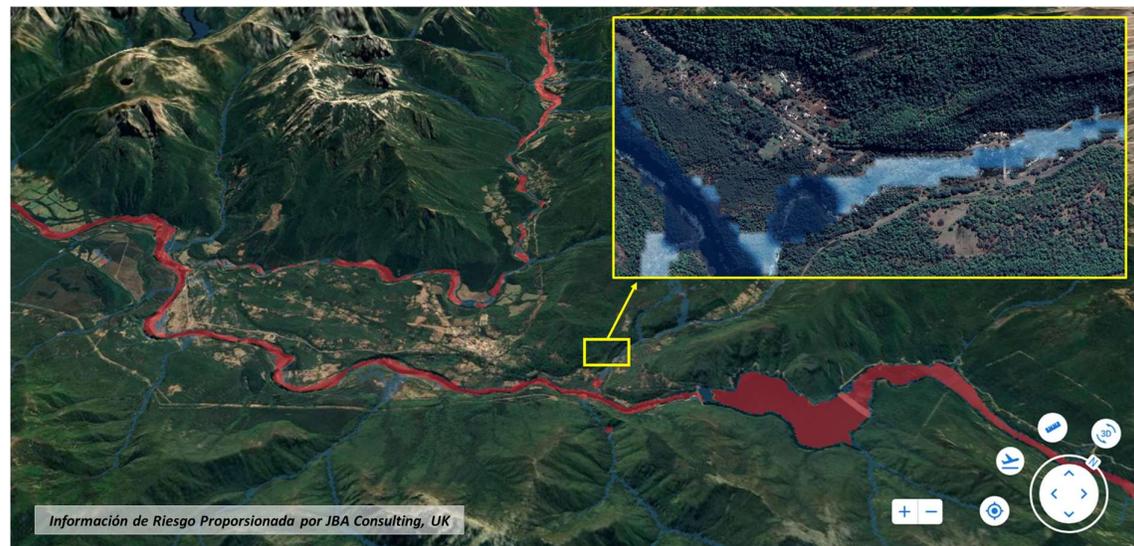


Figura 9. JBA, GFM, 2023. Ralco, Chile, T=100 años. Vista 3D (Flood data provided by JBA Consulting, UK).

La realidad chilena difiere de la de Auckland o Shanghai, especialmente en cuanto a la densidad y calidad de la información de entrada. No obstante, la información existente ya puede aprovecharse para generar nuevas capas de análisis. Combinado con soluciones de bajo

costo, el ejercicio puede incrementar significativamente la información disponible para planificación urbana y control de riesgos, mientras se trabaja en aplicaciones más complejas como las de Shanghai y Auckland.

4. CONCLUSIONES

Los modelos regionales han sido claves para el estudio de cuencas y el control del riesgo de inundación, así como también para el manejo de los recursos y crecimiento urbano. En ese aspecto, las tecnologías de información son fundamentales para el desarrollo de aplicaciones complejas que permitan abordar las escalas y objetivos de estos estudios.

Las herramientas de los proyectos se centran en un manejo integrado de la información, de manera de facilitar el análisis geoespacial sin importar las escalas, y maximizar el valor de la información para identificar las áreas de mayor significancia. Esto, junto con la gama de herramientas tecnológicas disponibles para la modelación del recurso hídrico, requiere un manejo amplio de los temas dentro del equipo técnico de trabajo, donde la cooperación y coordinación son esenciales.

La topografía Lidar fue sin duda el dato de entrada fundamental para el proyecto de Auckland, sin embargo, experiencias como la de Shanghai o JBA muestran un amplio rango de posibilidades, donde el enfoque, experiencia y tecnologías adecuados permiten implementar soluciones de impacto significativo y a medida.

AGRADECIMIENTOS

PhD Felix Pertziger, Ewaters NZ, por su impecable trabajo en los sistemas SIG. Cheryl Bai y Link Zhao, Especialistas del Auckland Council, por la confianza y sus invaluable aportes en el desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS

- Auckland Council (2011), Stormwater Flood Modelling Specifications, November 2011.
- Auckland Council (1999), Guidelines for Stormwater Runoff Modelling in the Auckland Region, TP108, April 1999.
- Ewaters NZ (2020), Regionwide Flood Modelling, Auckland Region (Stage 1). Model Build Report, Nov. 2020.
- Ewaters NZ (2020), Puhoi Catchment Rapid Flood Hazards Assessment, Model Build Report, March 2020.
- Ewaters NZ (2020), Hoteo Catchment RFHA Model, Modelling Report, June 2020.
- Ewaters NZ (2020), Model Software Tests on Puhoi Catchment using ICM, TUFLOW and DHI; Modelling Report, March 2020.
- Ewaters NZ (2022), Regionwide Flood Mapping – Model Build Report and Appendices, July 2022.
- Ewaters Shanghai Co Ltd (2019), Modelling report, Shanghai Urban Stormwater Master Plan, 2019.
- JBA Consulting UK (2022), Global Flood Maps, 2022.
- Tuflow (2018), Tuflow Classic/HPC User Manual, Release Build 2018-03-AD.