

## La aplicación de un Bote Remotamente Operado para Levantamientos Batimétricos en Depósitos de Relaves

**Autor: Dr. Adrian McDonald**  
Grupo Oceanscience, USA

Traducción: Ing. MSc. José Sánchez  
GeoSoluciones, Chile

### RESUMEN

Los métodos disponibles para la obtener la topografía de la parte terrestre de una mina son cada vez más complejos, sin embargo, para medir la topografía de las zonas inundadas se siguen utilizando técnicas muy inexactas, laboriosas y primitivas. La reciente aplicación del sistema Z-Boat 1800, un equipo remotamente controlado, para el levantamiento hidrográfico en tranques de relaves ha permitido a los operadores de mina obtener información batimétrica precisa, a bajo costo, y de forma segura en las instalaciones de relaves. Un equipo GNSS (GPS) móvil instalado en el bote proporciona una posición y rumbo preciso, y una ecosonda informa al mismo tiempo de la profundidad bajo la embarcación. La combinación de datos se transmite en tiempo real al operador en la orilla. El monitoreo de datos en tiempo real se utiliza para ayudar al operador a guiar el bote a lo largo de la ruta de levantamiento planificada, que puede estar a 1500 m de distancia de la orilla. Las ecosondas utilizadas pueden ser unidades básicas de grabación de un único valor digital de profundidad bajo el bote, o sistemas complejos con ecograma que proporcionan controles de calidad avanzados de los datos del sondeo, donde la aplicabilidad de cada sistema dependerá de las condiciones locales y de los usos programados para el equipo. El Z-Boat ha demostrado su eficacia en diversas minas, mejorando las estimaciones en el volumen de agua y permitiendo relaciones etapa/volumen que pueden desarrollarse y mantenerse mediante sucesivos levantamientos realizados con una frecuencia y precisión antes impensable.

## INTRODUCCIÓN

Los retos de la topografía y los beneficios de los nuevos equipos de posicionamiento para afrontar estos desafíos en la minería son bastante evidentes; es necesario conocer con gran precisión las elevaciones de minas a cielo abierto, además de otras zonas de la mina, para la construcción y la seguridad. Operativamente, es necesario conocer con precisión las posiciones de los vehículos grandes que operan en la zona de rajo. Estos requisitos están ahora intrínsecamente relacionados con los equipos GPS o Sistema Global de Navegación Satelital (GNSS). Los topógrafos reúnen mediciones puntuales GNSS para actualizar los mapas topográficos de la mina en un software especializado para la gestión de la mina. La reciente introducción de pequeñas plataformas aéreas (UAV), de ala fija y multi-rotor, para cartografía aérea ha supuesto un avance para el levantamiento de información geográfica de manera barata, precisa y valiosa. Sin embargo algunos lugares de la explotación minera han permanecido ajenos a estos avances tecnológicos en la topografía. Estos lugares son aquellos ubicados bajo los distintos depósitos de agua.

La gestión del agua es una disciplina fundamental en la gestión global de la mina, pero a menudo hay un conocimiento limitado acerca de los recursos de agua en la mina. La principal razón es la relativa dificultad en la obtención de datos de estos recursos - incluyendo la instalación de almacenamiento de relaves. El ambiente es a menudo peligroso, a menudo con un precario acceso al agua, tanto para el equipo de trabajo o en caso de una situación de emergencia, y no existe un método estándar o equipos fácilmente utilizables. Ante la falta de una buena metodología para levantar la batimetría de estos depósitos de agua, los topógrafos de la mina se ven obligados a utilizar métodos que han ideado ellos mismos para obtener los datos batimétricos cuando es necesario. Los topógrafos en botes pequeños pueden simplemente utilizar un poste largo o una plomada para obtener la profundidad aproximada a la superficie de sedimentos en posiciones discretas. Se podrían llevar a cabo periódicamente levantamientos hidrográficos tradicionales utilizando ecosondas monohaz para obtener una batimetría de alta calidad, ya sea usando personal de la mina o contratando un topógrafo. Sin embargo, este método requiere que el personal trabaje dentro del agua y además es relativamente costoso, lo que reduce la frecuencia potencial de recopilación de datos.

Como el agua almacenada en el tranque de relaves se recicla, los modelos de balance de agua se basan en el conocimiento del volumen de agua en el embalse. Además, la mina puede tener la obligación legal de informar periódicamente el volumen de agua del embalse. Por lo tanto, existe una fuerte necesidad por parte del operador de la mina de conocer la batimetría del tranque de relaves. Hasta ahora no existía un método de levantamiento eficaz para completar esta tarea. Con el fin de ofrecer a los operadores de mina una opción más segura y con un menor coste operativo para obtener batimetrías en los tranques de relaves, se ha adaptado para su uso en tranques de relaves un bote para levantamientos hidrográficos operado por control remoto, fabricado por el Grupo Oceanscience (San Diego, EE.UU.). El bote funciona con baterías de 24V, monta un sistema GNSS para dar mediciones de posición continuas y una ecosonda que mide con precisión la profundidad bajo de la embarcación. El "ping" del sonar se desplaza a través del agua desde el transductor situado en el casco de la embarcación, es reflejado por el fondo y es recibido de nuevo en el transductor un cierto tiempo después; este tiempo es directamente proporcional a la profundidad

bajo de la embarcación. Las mediciones de sonar y GNSS se combinan y se transmiten en tiempo real a través de un enlace de radio al operador de la orilla, que utiliza una pantalla de navegación para dirigir el barco desde un lugar seguro durante el levantamiento. En este artículo se discuten consideraciones importantes para el diseño y operación de este sistema para levantamientos remotos.

## METODOLOGÍA

El bote operado por control remoto para levantamientos hidrográficos Z-Boat 1800 del Grupo Oceanscience se ha utilizado para la recogida de datos hidrográficos remotos desde el año 2008, y es utilizado en muchos países de todo el mundo. El bote fue desarrollado originalmente en 2007 por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) para permitir la medida remota del caudal de los ríos y realizar mediciones batimétricas en condiciones potencialmente peligrosas para las personas. En 2012 el Z-Boat llamó la atención de los operadores mineros para sus desafíos de topografía en depósitos de relaves.

### Levantamientos Operados Remotamente

Un bote para levantamientos operado por control remoto requiere de tres componentes específicos:

1. **Señal de control de la navegación de la orilla al bote.** Se utiliza un sistema de radio con frecuencia de 2,4 GHz y con un rango máximo de alrededor de 1.500 a 2.000 m. La embarcación se controla mediante un joystick desde la orilla. Este sistema también ofrece la telemetría del nivel de carga de la batería principal del bote.
2. **Transmisión de datos desde el bote al operador la orilla.** Como el bote puede estar fuera del alcance visual del operador durante gran parte del levantamiento, los datos de posición y profundidad debe ser visible para el operador en tiempo real. Esto se logra mediante un módulo de telemetría a bordo del bote (CCM) que acepta un máximo de tres entradas serial RS232 - posición GNSS, profundidad y rumbo de la brújula magnética. Este flujo de datos se graba en una tarjeta de memoria interna en el orden en que se reciben, y al mismo tiempo se transmite a la orilla usando un Bluetooth industrial o una radio de alta potencia (Boulder, EE.UU.). En el PC orilla, un puerto serie COM se utiliza para recibir los mensajes en formato NMEA0183.
3. **Software de monitoreo y adquisición en el PC orilla.** Se puede utilizar cualquier software de levantamientos hidrográficos para gestionar el flujo de trabajo del bote operado por control remoto. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de pantallazo del PC de la orilla durante un levantamiento con Z-Boat.



Figura 1. Z-Boat 1800 midiendo acumulación de sedimentos en Queensland, Australia.

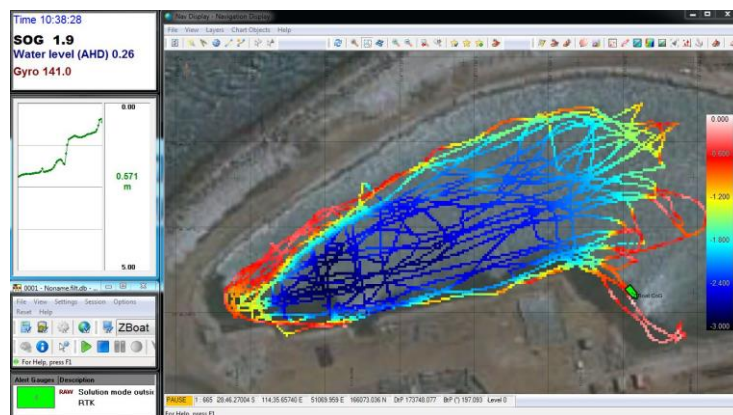


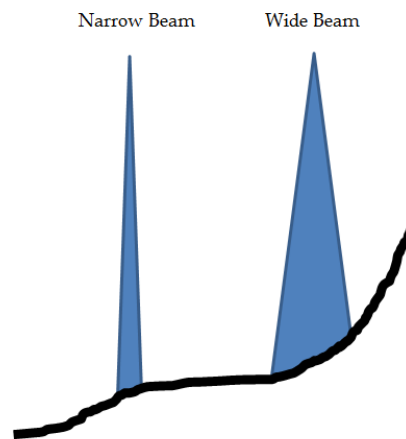
Figura 2. Monitoreo de datos en tiempo real mostrando la posición real del bote en el PC de la orilla.

El entorno típico de los depósitos de relaves presenta un único desafío en levantamientos hidrográficos, y después de que varias compañías mineras se interesaran en el uso del sistema Z-Boat para levantar sus depósitos de relaves, era apropiado investigar los requisitos y especificaciones clave para poder utilizar un bote operado por control remoto como el Z-Boat 1800

en un entorno minero. Los temas evaluados fueron: selección del ecosonda, sistemas GNSS de posicionamiento, radio telemetría, y materiales de construcción.

## Selección del Ecosonda

Los depósitos de relaves se caracterizan generalmente por tener aguas relativamente poco profundas en la mayor parte de su extensión, con pendientes suaves y una topografía del fondo bastante uniforme. Esta situación es beneficiosa para la selección del ecosonda, de modo que se pueden utilizar ecosondas bastante económicas, con un ancho de haz amplio. Como se muestra en la Figura 3, para una pendiente pronunciada como en la imagen de la derecha, una ecosonda de haz amplio puede reportar lecturas de profundidad tendenciosas e inexactas en comparación con una ecosonda de haz estrecho. Uno de estos lugares donde una ecosonda de haz amplio puede ser inútil es en un lago profundo con elevadas pendientes, donde los reflejos de las paredes laterales pueden distorsionar los datos batimétricos.



**Figura 3.** Huellas de ecosondas con haz estrecho vs haz amplio.

La principal característica de los depósitos de relaves en relación con la operación de la ecosonda es su disminución gradual en el contenido de agua y el aumento asociado en el contenido de sólidos con la profundidad debido a la sedimentación, además del potencial de las partículas más finas a quedar suspendidas por encima del fondo. Las ecosondas para aguas de poca profundidad por lo general operan a una frecuencia de 200 kHz, la cual apenas penetra en el sedimento; el pulso del sonar incluso puede ser atenuado por relaves suspendidos que conducen a una lectura de profundidad inexacta. Tener la capacidad para ajustar el algoritmo de detección del fondo dentro del ecosonda puede permitir la medición precisa del fondo, incluso con capas de sólidos suspendidos. Por lo tanto, aunque los sonares baratos son candidatos viables para el Z-Boat, se debe tener cuidado para asegurar que no se registran resultados erróneos potencialmente evitables. Para asegurar la máxima calidad de los datos batimétricos en los levantamientos con Z-Boat, es posible utilizar ecosondas mono frecuencia de 200 kHz o doble frecuencia de 33 kHz \ 200 kHz, las cuales registran un ecograma completo “imagen” de la respuesta del sonar para cada ping. Las ecosondas que han sido probadas con el Z-Boat en depósitos de relaves se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1** Tipos de ecosondas probadas.

Ecosonda	Coste Relativo	Anchura del Haz (°)	Profundidad Mínima (m)	Ajustes para Detección del Fondo	Control de Calidad
Airmar Smart Sensor DT800 200 kHz	\$	15	0.5	Ninguno	Ninguno
Seafloor Systems SONAR M8 200 kHz	\$\$\$	4	0.25	Ninguno	Ninguno
CEE HydroSystems CEEPULSE 200 kHz	\$\$\$	9	0.25	Ancho del pulso Sensibilidad	Ninguno
CEE HydroSystems CEESCOPE 33 kHz & 200 kHz	\$\$\$\$\$	8	0.15	Ancho del pulso Sensibilidad	Registro de ecograma

## Sistemas de Posicionamiento GNSS

La posición del Z -Boat en el depósito de relaves se obtiene mediante técnicas GNSS. La precisión de los receptores GNSS depende en gran medida de la utilización de correcciones diferenciales en tiempo real que permiten al receptor móvil calcular su posición considerando los errores ionosféricos presentes. Como cada región del mundo tiene un acceso variable a estos servicios de corrección diferencial, no se pudo tomar una solución única para todos. Las mineras operan sus propias redes de corrección diferencial RTK (Real Time Kinematic) y la configuración del Z-Boat 1800 garantiza que cualquiera de los receptores GNSS existentes en el sitio puede ser utilizado en el bote, o se puede adquirir un nuevo receptor móvil GNSS en base a los requisitos particulares de la localización de la mina.

## Radio Telemetría

Para un vehículo de levantamientos remotos una radio telemetría fiable es un requisito fundamental. Los depósitos de relaves suponen una amplia zona para levantar; la embarcación puede estar fuera del alcance visual, y puede haber movimientos de tierra que impiden la línea de visión. Por lo tanto, la potencia de la radio es particularmente importante para la operación en depósitos de relaves. Se suele utilizar la pantalla del computador para apoyar el manejo de la embarcación incluso en áreas pequeñas, convirtiéndose en la única referencia para los levantamientos más grandes. Para levantamientos en depósitos de relaves, se puede lograr

aumentar el alcance del sistema de navegación (control del bote) a 1500 m utilizando una antena omnidireccional de alta ganancia de 9 dBi en el bote. Para levantamientos de hasta 2000 metros de distancia, se puede utilizar una antena plana de 14 dBi en la orilla en lugar de la antena estándar del transmisor. El alcance de transmisión de datos por radio es de 600 m cuando se utiliza Bluetooth industrial, pero esto se puede aumentar a más de 2.000 m utilizando sistemas de radio de espectro ensanchado Freewave 900 MHz o 2,4 GHz, las cuales son esenciales para los levantamientos en grandes depósitos de relaves.



**Figura 4.** Levantamiento en un depósito de relaves en la República Democrática del Congo – vista a 250 m.

## Los materiales de construcción

El bote debe ser resistente a aguas agresivas, generalmente con un pH corrosivo bajo o alto. Afortunadamente, durante el levantamiento el tiempo total de la exposición es relativamente corto, por lo que la corrosión y degradación se minimizan. El uso de un plástico resistente a los ácidos ABS, acero inoxidable, y juntas de Viton para los ejes de rotación del motor aseguran la buena resistencia del Z-Boat, demostrada a través de dos semanas de inmersión en ácido, como se muestra en la Figura 4. El transductor del ecosonda no está expuesto al agua, sino que está sellado en una cavidad llena de propilenglicol en el interior del casco.

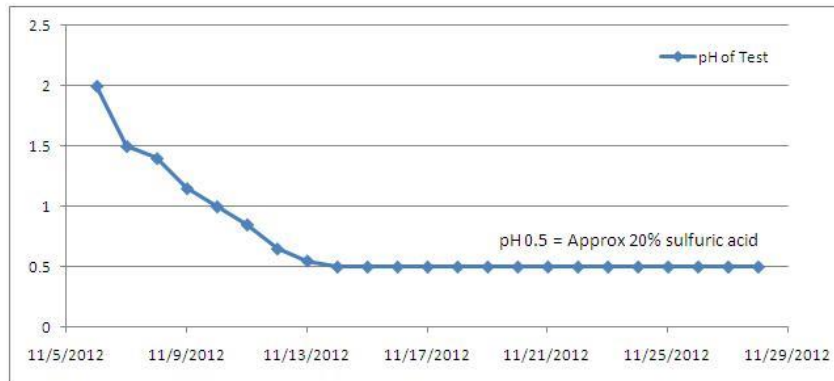


Figura 4. pH durante los test de resistencia al ácido del Z-Boat

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las diversas opciones GNSS utilizadas en diferentes sistemas Z-Boat 1800 desplegados en varios depósitos de relaves no mostraron ninguna desviación del comportamiento esperado. Todos los receptores móviles GNSS pueden configurarse para salida de datos en formato genérico NMEA, el cual es compatible con el Z-Boat. Sin embargo, se requirieron topógrafos para configurar el receptor GNSS móvil de manera adecuada. Los requisitos de telemetría de radio para levantamientos en depósitos de relaves condujeron a resultados relativamente pobres con los sistemas Bluetooth industrial de alcance limitado. La radio basada en Freewave, más robusta, se puede colocar prácticamente en cualquier lugar alrededor del depósito de relaves y recibir los datos del levantamiento, permitiendo la máxima flexibilidad en la ubicación del puesto de control del levantamiento.

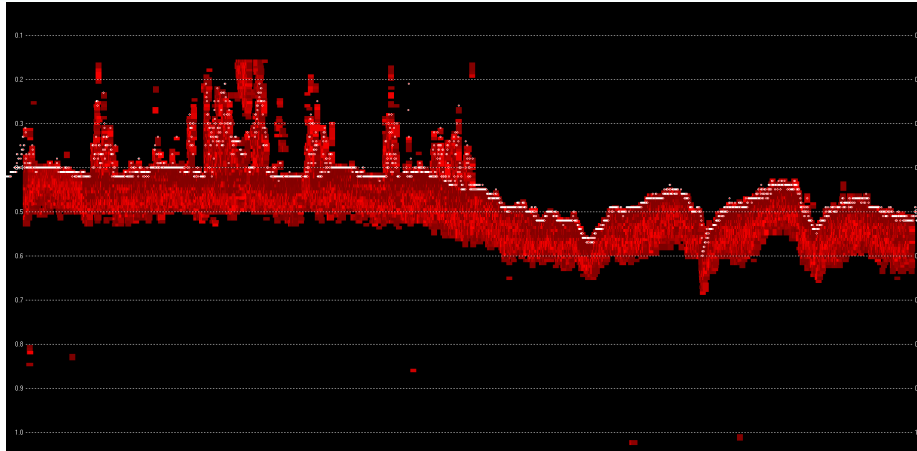
Los resultados globales han sido positivos con las ecosondas probados; incluso la sonda más barata (Airmar DT800) ha demostrado ser eficaz, aunque la mayor parte de los sitios de prueba se caracterizan por tener una diferenciación entre agua/sólidos relativamente bien definida. La figura 5 muestra un mapa del camino seguido por el Z-Boat, codificado por colores según la profundidad del sondeo desde <60 cm a más de 10 m para un lugar en los EE.UU. El depósito de relaves tiene alrededor de 1,3 kilómetros de ancho, con el levantamiento realizado desde tres ubicaciones en el lado oeste. Durante varias pruebas, la DT800 era poco fiable superficialmente, a 60 cm de profundidad, a diferencia de las otras ecosondas que continúan arrojando resultados precisos hasta casi el calado del Z-Boat (25 cm).





**Figura 5.** Levantamiento completado con el Z-Boat en Noviembre de 2012 utilizando una ecosonda Airmar DT800 con un GNSS Trimble R8.

Las ecosondas CEEPULSE y SONAR M8 ofrecen resultados con una precisión de 1 cm, gracias a sus mejores transductores y más avanzados algoritmos de reconocimiento del fondo. Aunque la DT800 funcionó satisfactoriamente, la elección de una ecosonda de calidad sigue siendo la elección más prudente. Los levantamientos hidrográficos convencionales requieren no sólo el registro de profundidad, una "imagen de sonar" o ecograma puede servir de soporte para inspeccionar visualmente los resultados. Esta inspección permite que los datos erróneos se eliminen manualmente o se ajusten. La ecosonda CEESCOPE 200 kHz permite este registro del ecograma en tiempo real o después de completar el levantamiento, y representa la mejor configuración a prueba de errores para levantamientos en depósitos de relaves. La imagen que se muestra en la Figura 6 es una muestra de ecograma a lo largo de varios metros, y el material suspendido es claramente visible por encima de la parte inferior en el lado izquierdo. Sin esta capacidad de comprobar los resultados del sonar, la materia en suspensión puede ser registrada erróneamente como el fondo en una ecosonda "sólo digital". La adición de un segundo canal de sonar de 33 kHz a la CEESCOPE permite al operador trabajar en entornos más turbios, donde la señal de 200 kHz se puede atenuar, y también investigan el espesor del sedimento superficial. El sonido de 33 kHz penetra varios metros en el sedimento depositado, permitiendo la medición cualitativa de la deposición de sólidos.



**Figura 6.** Ecograma en tiempo real de Z-Boat con ecosonda CEESCOPE 200kHz

## CONCLUSIÓN

El Z-Boat ya ha demostrado ser una herramienta exitosa para el levantamiento de depósitos de relaves en varios sitios mineros. Con una tasa de ping del ecosonda que puede variar entre 2-10 Hz, presenta un gran avance en comparación con los métodos tradicionales. No sólo hay una exactitud mucho mayor, la confianza en los cálculos que se basan en este conjunto de datos aumenta significativamente. Al término del levantamiento, las profundidades se pueden convertir a la elevación y el conjunto de datos se puede importar a ArcMap (ESRI), MineSight, AutoCAD u otro software de gestión de la mina. El conjunto de datos batimétricos se puede combinar con los datos topográficos de levantamientos topográficos existentes para generar curvas de fase / volumen / área para el depósito de relaves, ofreciendo a los ingenieros volúmenes precisos del agua existentes y de almacenamiento disponible por encima del agua existente, junto con la identificación de los patrones de deposición en el depósito de relaves. Las curvas de fase - volumen - área son piezas vitales de información de los modelos de balance hídrico. Los ingenieros saben cuánta agua se envía al depósito de relaves, y cuánto se bombea de vuelta (a través de medidores de flujo), pero a menudo la evaporación, la filtración, y la pérdida son estimadas. Debido a que estos modelos se utilizan para evaluar los riesgos de seguridad del agua, si el volumen de agua aprovechable en el depósito de relaves es desconocido, esto puede suponer un gran vacío de información. Un bote para levantamientos hidrográficos operado por control remoto, como el Z-Boat, permite al operador superar las limitaciones topográficas, llenar el vacío de datos y, al mismo tiempo, contribuir a mejorar la seguridad; algunos lugares dentro de una mina tienen un riesgo inherente mayor que los depósitos de relaves, pero en todo caso mantener a los trabajadores fuera del agua en un entorno industrial es un paso en la dirección correcta.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor agradece a Swathe Services (Australia) Pty Ltd y Maxitool Grupo por las imágenes de levantamientos.

## **NOMENCLATURA**

GPS Sistema de Posicionamiento Global.

GNSS Sistema Global de Navegación Satelital.

## **REFERENCIAS**

Sin referencias