

Capítulo 8

Estado del arte de la instrumentación geotécnica en presas

Raúl Mauricio Álvarez Álvarez¹
Carlos Andrés Ordóñez Ante²
Juan Camilo Parra Toro³

Cítese como: Álvarez-Álvarez, R. M., Ordóñez-Ante, C. A. y Parra-Toro, J. C. (2023). Estado del arte de la instrumentación geotécnica en presas. En F. C. Gómez-Meneses, L. M. Gómez-Melo, D. Valencia-Enríquez, S. Gómez-Herrera, J. M. López-Moreno y J. M. Villota-Paz (comps.), *Avances y desafíos en las ciencias y la ingeniería: nuevos conocimientos para un futuro sostenible* (pp. 139-162). Editorial UNIMAR. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.208.c357>

Resumen

En su mayoría, las presas son diseñadas con modelos y parámetros asumidos a partir de estudios, pruebas de laboratorio, criterios de expertos y experiencias en la construcción de otras presas, en la búsqueda por proyectar su comportamiento en la realidad, por lo cual los ingenieros instalan instrumentos en el cuerpo de la presa durante la construcción, para medir las variables que aseguren su operación, permitan contrastar el comportamiento real con los criterios de diseño y, evaluar su operación.

Bajo esta premisa y, contemplando la instrumentación como extensión de los sentidos que permite identificar rápida y expeditamente los comportamientos y estados de las presas, se pretende presentar una compilación de la instrumentación actual más usada para monitorear las variables más relevantes en las presas, que facilite el monitoreo continuo y remoto de estas y, a su vez, integrarse a un sistema de adquisición de datos, para su almacenamiento y transmisión a servidores con software de análisis y procesamiento.

Palabras clave: presa; variables; instrumentación geotécnica.

State of art of geotechnical instrumentation in dams

Abstract

Most dams are designed with models and parameters assumed from studies, laboratory tests, expert criteria, and experiences in the construction of other

¹ Ingeniero en Instrumentación y Control. Correo: raul_alvarez91111@elpoli.edu.co

² Magíster en Geotecnia. Correo: caordonez@elpoli.edu.co

³ Ph. D. en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Correo: jcparra@elpoli.edu.co



dams, in the search for projecting their behavior in reality, for which engineers install instruments in the body of the dams during construction to measure the variables that ensure their operation, allow contrasting the real behavior with the design criteria and evaluate their operation.

Based on this premise, and considering instrumentation as an extension of the senses that allows rapid identification of the behavior and status of dams, we intend to present a compilation of the most commonly used current instrumentation to monitor the most relevant variables in dams to facilitate their continuous and remote monitoring and, in turn, integrate them into a data acquisition system for storage and transmission to servers with analysis and processing software.

Keywords: dam; variable; geotechnical instrumentation.

Estado da arte da instrumentação geotécnica em barragens

Resumo

A maioria das barragens é projetada com modelos e parâmetros assumidos a partir de estudos, testes de laboratório, critérios de especialistas e experiências na construção de outras barragens, na busca de projetar seu comportamento na realidade, para o que os engenheiros instalam instrumentos no corpo das barragens durante a construção para medir as variáveis que garantem sua operação, permitem contrastar o comportamento real com os critérios de projeto e avaliar sua operação.

Com base nessa premissa, e considerando a instrumentação como uma extensão dos sentidos que permite a rápida identificação do comportamento e do estado das barragens, pretendemos apresentar uma compilação da instrumentação atual mais comumente utilizada para monitorar as variáveis mais relevantes nas barragens, a fim de facilitar seu monitoramento contínuo e remoto e, por sua vez, integrá-las a um sistema de aquisição de dados para armazenamento e transmissão a servidores com software de análise e processamento.

Palavras-chave: barragem; variável; instrumentação geotécnica.

Introducción

La estabilidad estructural y geotécnica de una presa resulta de vital importancia, pues asegura en gran medida la operación adecuada de un embalse, al tiempo que permite establecer los niveles de riesgo que existen sobre el sistema donde se encuentra y, en muchos casos, sobre otros embalses ubicados aguas abajo y que operan de manera encadenada, lo cual implica todo el rigor técnico posible en su diseño y construcción.

Actualmente, los métodos empíricos de construcción de presas han sido reemplazados o complementados con procedimientos analíticos de ingeniería,



tanto en diseño como en construcción. El rápido avance en la ingeniería geotécnica ha dado como resultado, el desarrollo de procedimientos que incluyen una selección de instrumentación cuidadosamente planeada y diseñada y sistemas de monitoreo (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2012). Sin embargo, una variedad de fallas en presas es atribuible a errores de instrumentación que, al menos en el caso de la presa Taum Sauk, por dar un ejemplo, contribuyó a una falla catastrófica, donde los sensores defectuosos y mal programados/colocados, no dieron las indicaciones adecuadas (Sharma y Kumar, 2013).

Razones como las anteriores, sumadas a una creciente comprensión y conciencia situacional de los gobiernos y las empresas sobre los riesgos a los cuales están sometidas las personas, el medio ambiente y la infraestructura aguas abajo de las presas, hacen necesario un frecuente seguimiento a las variables geotécnicas y sísmicas de las presas, para lo cual se requiere instrumentarlas y monitorearlas de manera remota y con la frecuencia adecuada de acuerdo con el programa de inspección y mantenimiento (CIRIA, 2013). Más aun, teniendo en cuenta que, diseñar y construir una presa no es un ejercicio que se ejecuta una sola vez y para siempre; su estructura requiere ser supervisada e inspeccionada continuamente durante toda su vida, para asegurar que se mantenga en buen estado.

Orientados en la importancia de un monitoreo continuo, adecuado y confiable, Newell et al. (2016) plantean que la seguridad de una presa depende en gran medida de la adecuada selección de la instrumentación, la cual debe ser técnicamente eficiente. Para ello, los instrumentos deben ser seleccionados en función de las características y requisitos especiales de cada proyecto y, tener suficiente compatibilidad con todos los requerimientos.

Desarrollo

En la búsqueda de una metodología para la adecuada selección de instrumentación geotécnica de una presa de tierra, se ausculta sobre el estado del arte de la instrumentación geotécnica en presas y se obtiene como resultado el presente artículo, en el que se ilustra sobre los instrumentos, equipos y esquemas de instrumentación actualmente utilizados en la ingeniería de presas y, se hace una reseña de la actualización de la presa Miraflores en 2022, perteneciente a Empresas Públicas de Medellín (EPM), ubicada en el departamento de Antioquia.

El flujo de la investigación parte de un recorrido por los tipos de presas según su clasificación; posteriormente, se identifica las variables más relevantes y, de manera consiguiente, los instrumentos más utilizados en la actualidad.

Clasificación de las presas

Las presas pueden ser clasificadas por su altura, volumen, capacidad de almacenamiento, tipología, hasta por las consecuencias y los riesgos que pueden presentar por la posibilidad de una rotura.



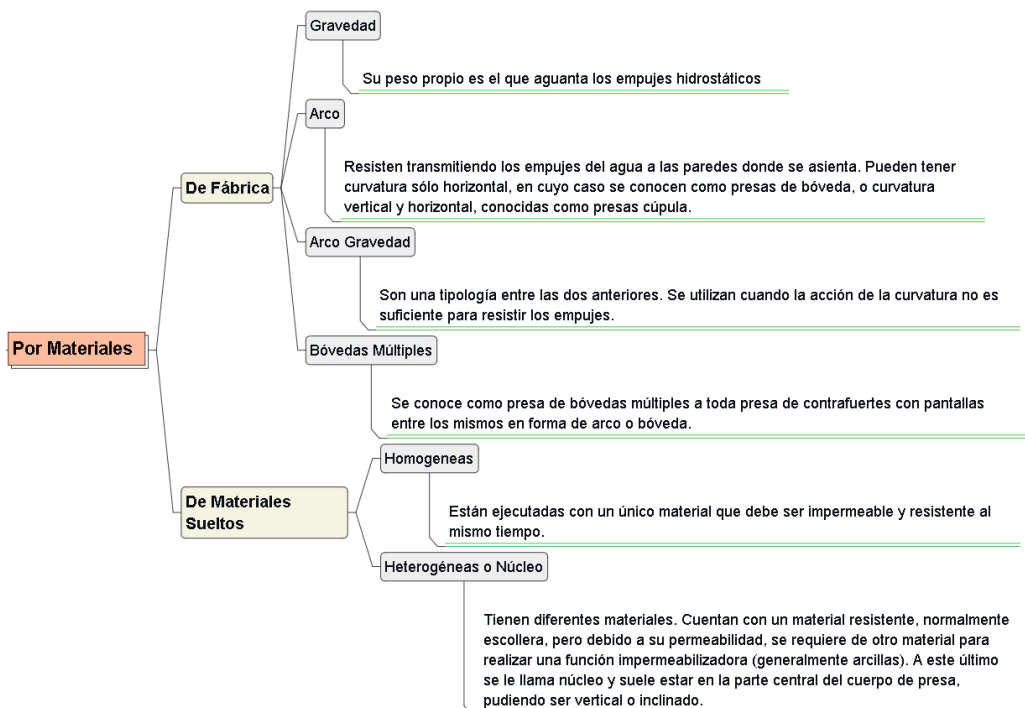
El Comité Nacional Español de Grandes Presas (2018) presenta una clasificación de presas de acuerdo con sus dimensiones, riesgo potencial, tipología, atendiendo diferentes factores. A continuación, se describe las más comunes, según:

- **Sus materiales:** se dividen en presas de gravedad u hormigón y presas de materiales sueltos (que pueden ser homogéneas, heterogéneas o de pantalla o diafragma)
- **Su forma de resistir los esfuerzos:** las presas de hormigón pueden clasificarse en presas de gravedad (macizas o aligeradas), presas arco (o bóveda), presas arco-gravedad y presas de bóvedas múltiples
- **Su normativa:** en función de su tamaño (pequeñas y grandes) o, en función del riesgo potencial.

Clasificación de las presas según sus materiales

Figura 1

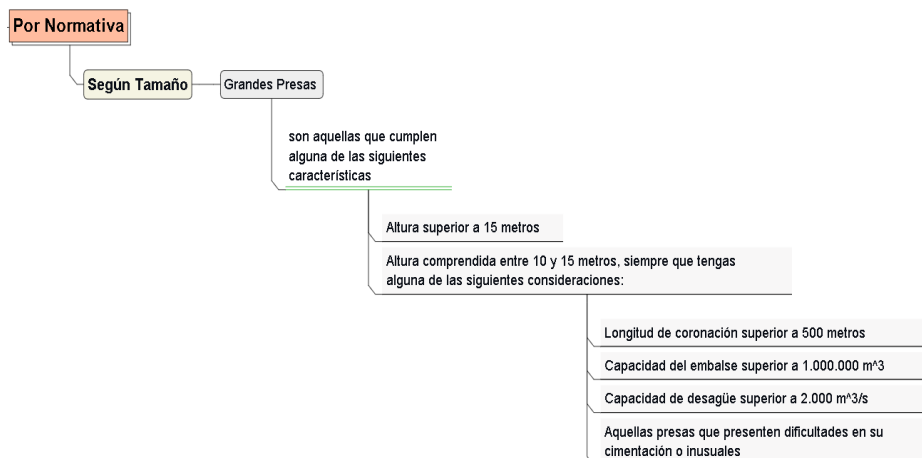
Clasificación de las presas según sus materiales



Clasificación de las presas por normativa

Figura 2

Clasificación de las presas según normatividad

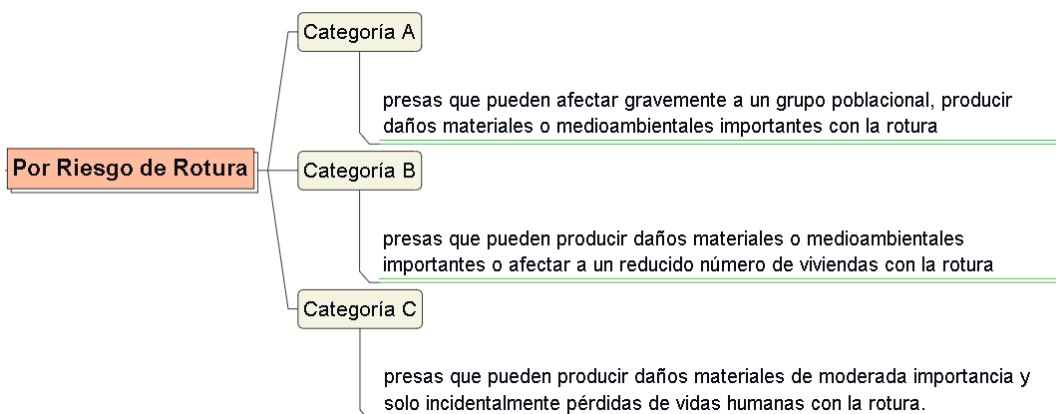


Riesgo potencial de rotura de las presas

Según Castillo y De Cos (1996, como se cita en Castillo y De Cos, 1997), las presas pueden ser clasificadas según las siguientes categorías:

Figura 3

Clasificación de las presas de acuerdo con el riesgo potencial de rotura



Metodologías actuales para la selección de instrumentación geotécnica de presas

En Ingeniería Geotécnica se ha hecho supuestos y aproximaciones y se ha utilizado soluciones teóricas simplificadas, con una variabilidad sustancial



asociada a los parámetros del suelo, donde se realiza diseños con base en datos limitados de laboratorio y de campo. Esto demanda asegurar las estructuras y verificar que los supuestos en los diseños sean correctos y, más aún, cuando son nuevos diseños y métodos constructivos, para lo cual es necesario el uso de algunos instrumentos para medir parámetros, como: piezómetros para medir presión de poros, celdas de carga para medir cargas en el suelo, inclinómetros y extensómetros para medir deformaciones, acelerógrafos para medir vibraciones y termómetros para medir temperatura (Das y Sivakugan, 2017).

Para la selección de una instrumentación adecuada de presas, es fundamental el conocimiento que se debe tener de las variables y particularidades constructivas y locativas de cada presa, pues, así como cada estructura tiene condiciones particulares, también las debe tener la instrumentación para monitorear su comportamiento (Masoumi et al., 2018).

En la mayoría de los casos de selección de instrumentación, los encargados de tomar las decisiones se basan en dos métodos: criterios de experto y funciones de probabilidad, métodos que, por lo general, son subjetivos y arrojan datos difusos en el proceso que no son tenidos en cuenta y que carecen de funciones matemáticas. Para mitigar esta subjetividad y facilitar la selección de los instrumentos apropiados de forma sistemática, se puede utilizar algunas técnicas como la de Toma de Decisiones Multi Atributo (MADM) junto con Procesos de Jerarquía Analítica (AHP) y Solución de Compromiso y Optimización de Criterios Múltiples (VIKOR) en la toma de decisiones (Masoumi et al., 2017).

Variables geotécnicas e instrumentación relevante para el monitoreo de presas

Cada presa cuenta con su propia jerarquización de variables e instrumentos y no se pretende, desde este artículo, establecer una jerarquía de variables ni de instrumentos de manera estandarizada; sin embargo, se busca de modo general, establecer las variables relevantes e instrumentos más utilizados actualmente en el monitoreo de presas, cuyas estructuras y fundaciones requieren de un control permanente de su comportamiento. Con este fin, debe conocerse las presiones, esfuerzos y movimientos que son generados en el relleno, los movimientos, deflexiones y esfuerzos que surgen en la cara de concreto, así como las posibles filtraciones a través de la presa y de su fundación (Díaz-Sepúlveda, 2014).

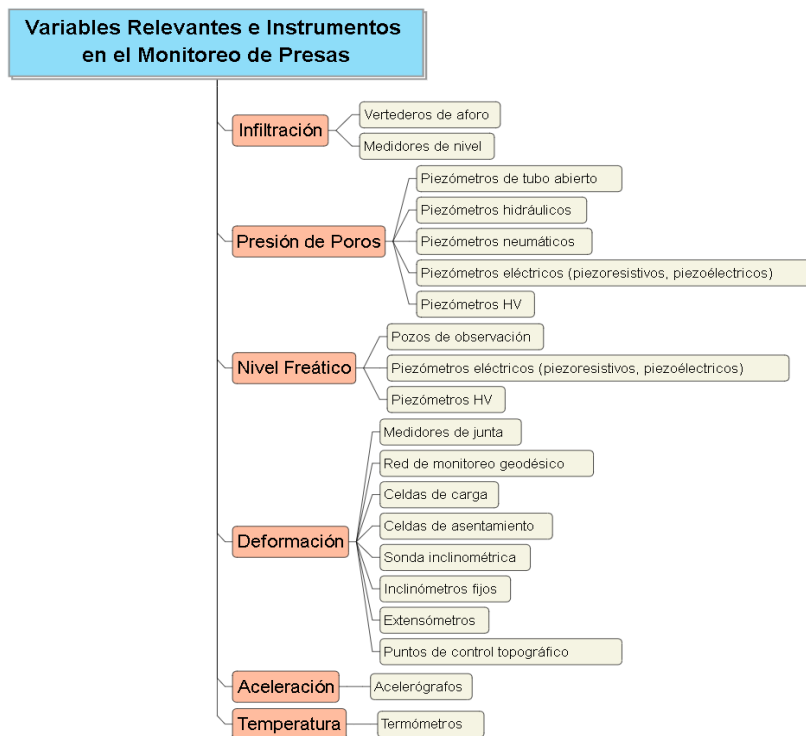
La instrumentación utilizada para monitorear deformaciones y esfuerzos se puede utilizar para confirmar si el comportamiento previsto de una presa es aceptable y es improbable que haya problemas o daños significativos, para proporcionar experiencia, para mejorar las predicciones futuras y para identificar alguna acción o construcción que pueda, potencialmente, llegar a un resultado inaceptable o, al desarrollo de una situación peligrosa (Bassett, 2012).



En este sentido, Canadian Dam Association (CDA, 2013) plantea que la instrumentación para el monitoreo de presas debe darse para proporcionar información que permita validar los supuestos de diseño, con relación a las variables relevantes de las presas, de acuerdo con sus características: asentamientos, presiones intersticiales, tensiones, desplazamientos, deformaciones y filtraciones, conceptos planteados igualmente por Tobón y Miranda (2008), además de otras variables relevantes, como: nivel freático, deformación, aceleración y temperatura, los cuales son compilados e ilustrados de manera esquemática en la Figura 4, en conjunto con los instrumentos típicos para medirlas:

Figura 4

Mapa de variables relevantes en presas con sus respectivos instrumentos



Estado del arte de la instrumentación geotécnica de presas

Los instrumentos son una herramienta para medir parámetros de ingeniería y cuantificar su magnitud. El diseño y uso de instrumentación geotécnica no es meramente la selección de instrumentos, sino un detallado paso a paso del proceso de ingeniería que comienza con una definición del objetivo, y finaliza con el análisis de los datos (Prasad y Naik, 2021), siendo propiamente en el aspecto del diseño donde Papachatzaki et al. (2009) plantean que la instrumentación tiene que ser simple y robusta, en la medida de las posibilidades, cuyo número y tipo de instrumentos instalados debe ajustarse a los recursos disponibles en el sitio durante la construcción y operación y, según la respuesta que se



busca resolver. Por lo tanto, es importante que el diseño y la instalación de instrumentación estén sujetos a un plan de instrumentación que garantice la existencia de las disposiciones, recursos y capacidades necesarias para lograr resultados seguros y sostenibles para la operación de las presas durante su vida útil, como expone el Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial (2021); además, de manera estructurada establece cuatro planes de seguridad para presas, así:

- Plan para la supervisión de la construcción y el aseguramiento de la calidad (PSCAC)
- Plan de instrumentación (PI)
- Plan de operación y mantenimiento (POM)
- Plan de preparación ante emergencias (PPE).

Por su parte, el Ministerio de Medio Ambiente de España (2001) resalta la importancia del plan de instrumentación dado que, una adecuada selección y ubicación de la instrumentación, garantiza la operación, mantenimiento y detección de anomalías que, asociadas a un correcto establecimiento de umbrales o indicadores cuantitativos y cualitativos, avalan una adecuada gestión del riesgo, que puede verse optimizada y expedita, si se integra con un sistema automatizado de la instrumentación, para el monitoreo más frecuente de los parámetros claves de seguridad de la presa, como el nivel del agua del embalse, los niveles piezométricos, los flujos de filtración y los niveles de turbidez, como sugiere CDA (2013), donde los requisitos de monitoreo y la instrumentación relevante instalada en la presa deben ser identificados por el diseñador de la presa y, posteriormente, por el ingeniero que realiza la revisión de seguridad (Government of Malaysia, 2017).

En la Figura 4 se evidencia de manera esquemática los diferentes tipos de instrumentos que se utiliza típicamente en las presas y, se describe a continuación, la función y el principio de funcionamiento de los instrumentos identificados como típicos, para medir las variables geotécnicas más relevantes y que permiten su fácil integración a un sistema de adquisición de datos o, en su defecto, se pueda adquirir con una consola o equipo de medición, para ser posteriormente analizada y procesada en un computador o servidor.

Medidor de infiltraciones

Desde la antigüedad, las civilizaciones han tenido que comprender este hecho y buscar formas efectivas de controlar las infiltraciones, en aras de evitar el deterioro de las obras de ingeniería, la fuerza de la naturaleza o la afectación a zonas de asentamientos humanos (Iglesias, 2010).

Para medir las infiltraciones en las presas de tierra se utiliza varios métodos, como: piezómetros o medidores de infiltración por medio de vertederos de aforo, que son estanques con sistema de regulación de vertimiento por medio de una cuchilla o vertedero en forma de V o triangular de 90°, con un sistema de medición de nivel que los constituye en un instrumento de medición de



caudales de filtración inferidos por nivel; estos están ubicados en la salida del colector de drenaje de la presa principal.

Sensores de nivel para vertederos de aforo

Los sensores pueden ser de diferentes especificaciones tecnológicas; por ejemplo:

- Tipo flotador de hilo vibrante
- Magnetostrictivos - señal de salida de 4-20Ma
- De presión sumergible tipo piezoeléctricos - señal de salida de 4-20mA, 0-5 volts o 0-10 volts
- De no contacto (Radar o Ultrasonido) - señal de salida de 4-20mA, 0-5 volts, 0-10 volts o SDI12.

Piezómetros

La medición de los niveles de agua y la presión de poro mediante el uso de piezómetros es fundamental para analizar el desarrollo del proceso de consolidación y el cálculo de los esfuerzos efectivos, combinando las mediciones con celdas de presión total, así como para estimar filtraciones y la efectividad de sistemas de drenaje (Vargas, 2019). Existen diferentes tipos de piezómetros:

- **Casagrande:** usados para detectar, medir y monitorear la presión de agua en terrenos de baja y media permeabilidad o rocas, específicamente en la profundidad instalada o en la punta del filtro; están compuestos por una unidad de filtro conectada a la superficie con un tubo simple o doble; pueden ser medidos a través de un sensor tipo piezómetro de hilo vibrante o semiconductor.
- **De tubo abierto:** usado para detectar, medir y monitorear el nivel freático en terrenos permeables. El filtro puede estar compuesto por un tubo ranurado en PVC con un filtro en geotextil externo o un simple filtro Casagrande no sellado con bentonita. Se puede medir a través de un sensor tipo piezómetro de hilo vibrante o semiconductor.
- **Hidráulicos:** es un instrumento de funcionamiento sencillo que sirve para conocer la subpresión existente en un punto. Su uso más común se ha dado en el estudio de presiones hidrostáticas en la cimentación de las presas; pueden ser complementados con transmisores de presión.
- **Semiconductores:** cuentan con electrónica interna típicamente piezorresistiva, cuyas señales de salida pueden ser de 0-5 volts o 4-20 mA, según requiera el usuario. Son utilizados típicamente para condiciones donde los sistemas de adquisición de datos no son compatibles con los sensores de hilo vibrante.
- **De hilo vibrante:** o de cuerda vibrante, consisten en un sensor de cuerda vibrante embebido en una carcasa de acero con filtro en un extremo. Los piezómetros VW ofrecen una excelente fiabilidad a largo plazo, como resultado del uso de los últimos desarrollos en tecnología de cuerda vibrante.



Deformaciones

- **Medidores de junta:** permiten controlar con precisión la apertura de juntas de dilatación, diaclasas, fisuras o cualquier otro elemento de separación que admita la colocación de dicho medidor y un posterior acceso a ellas para realizar las mediciones (Atinfo.net, 2023). Los medidores de junta pueden ser mecánicos, eléctricos o de hilo vibrante.
- **Monitoreo geodésico:** es un conjunto de puntos (estaciones) de monitoreo continuo de datos del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), distribuidos estratégicamente en un territorio, en los cuales se determina su posición geográfica (latitud, longitud y elevación).
- **Celdas de carga:** constan básicamente de dos platos de acero inoxidable separados por una delgada capa rellena con un fluido hidráulico, el cual, al ser sometido a la carga de material que la circunda, transfiere la presión hidráulica a un transductor, típicamente de hilo vibrante, que la traduce en señal eléctrica (Geokon, s.f.).
- **Celdas de asentamiento:** consisten en un sensor de hilo vibrante conectado a un plato de asentamiento en el punto de medición; el sensor, a su vez, está conectado de manera horizontal a través de dos tubos con líquido a un reservorio localizado en terreno estable. El sensor mide la cabeza hidráulica entre el sensor y el reservorio.
- **Inclinómetros:** constituyen uno de los principales métodos de investigación de los deslizamientos y, en general, de control de movimientos transversales a un sondeo. Son equipos que miden la inclinación de una tubería inclinométrica introducida en estratos de suelos o rocas, respecto a una línea vertical u horizontal y, mediante operaciones trigonométricas, determinan los desplazamientos correspondientes a dichos puntos de medición. Los inclinómetros son perforaciones, ya sea en roca o en un terraplén al cual se le instala una tubería con muesca tipo riel, con el objeto de guiar un torpedo que se le introduce para poder medir la deformación del punto donde se instaló. Pueden ser descritos como un sistema de cuatro elementos: sensor o torpedo, cable o carrete, consola de medición y tubería.
- **Inclinómetros fijos:** consisten en un grupo de sensores de hilo vibrante, sensores tipo MEMs (por sus siglas en inglés: Microelectromechanical system) o, de fibra óptica, los cuales son instalados de manera fija dentro de una tubería inclinométrica que se instala dentro de la zona de interés.
- **Extensómetros:** o, medidores de deformación, miden la expansión o compresión de un sistema de sensores anclados en diferentes puntos de una perforación, cuya distancia o separación es conocida (Morera, 2016). Existen también los extensómetros de hilo o largo rango, usados para medir deformación en taludes.
- **Puntos de control superficial:** son mojones de concreto con una varilla de hierro en la mitad, la cual tiene una perforación en el centro (centro punto) para garantizar que siempre que se haga seguimiento se tome el mismo punto de referencia; sirven para medir desplazamientos superficiales de la presa. Los puntos de control topográfico son leídos por medio de estaciones de topografía y prismas, pero pueden ser



adquiridos de forma automática por medio de una red geodésica con equipos GPS ubicados en el sitio de interés o, por medio de estaciones totales de topografía con prismas fijos.

- **Acelerógrafos:** están compuestos por una unidad de sensado o acelerómetro y una unidad de registro y digitalización o digitalizador. Permiten la obtención de un gráfico denominado acelerograma, que muestra la variación de aceleraciones en el lugar determinado y, el registro de los eventos sísmicos que posteriormente son procesados y analizados para determinar los valores de aceleración máxima y su escala de intensidad (Instituto Geofísico – EPN, 2023).

Termómetros

La temperatura es una variable importante para evaluar la influencia de los efectos térmicos en las mediciones y en la estructura que se monitorea, en especial en estructuras de concreto.

Los termómetros disponibles son de tipo RTD (Detector Resistencia térmica), termistor o, en sondas a cuerda vibrante, típicamente embebidos en cuerpo de acero inoxidable (Sisgeo, s.f.).

Caso de estudio: Presa Miraflores

Figura 5

Presa Miraflores



La presa Miraflores se encuentra ubicada sobre el río Tenche, en jurisdicción del municipio de Carolina del Príncipe, a 114 km al norte de la ciudad de Medellín, en el departamento de Antioquia (Colombia). La construcción se realizó entre los años 1958 y 1962, con actualizaciones en los años 1992 - 1994 y 2020 - 2022, como se ilustra en las figuras 6 y 7, más adelante. El embalse principal tiene un volumen aproximado a cota de máximo embalse de 149.26 hm^3 .



En cuanto a su geología, la presa está construida sobre el batolito antioqueño, de composición cuarzodiorítica; cerca de su contrafuerte pasa la falla Miraflores; se destaca que, aunque la falla no ha tenido incidencia directa sobre la estabilidad de la presa, sí se le atribuye una profunda meteorización de la roca en el estribo derecho y una excesiva circulación de agua subterránea, que hizo necesaria la construcción de una galería de drenaje en este estribo, cuyos caudales de infiltración son monitoreados permanentemente.

La presa Miraflores consiste en una estructura de tierra zonificada con núcleo impermeable compuesta por limo; tiene una altura máxima de 59m, una longitud de 240m (incluyendo los estribos), y un ancho de 15m en coronación con una cota de 2068 m s.n.m.

Figura 6

Sección de diseño original de la presa Miraflores

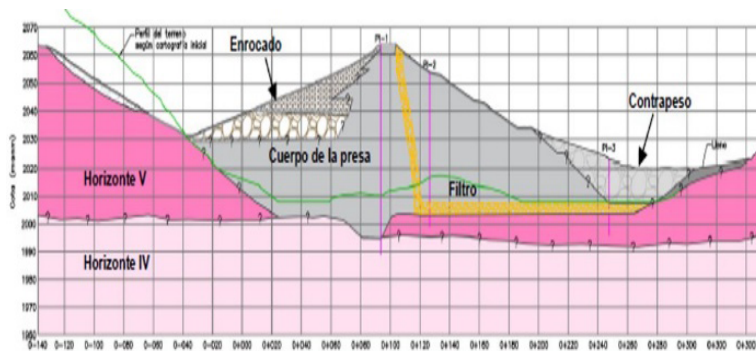
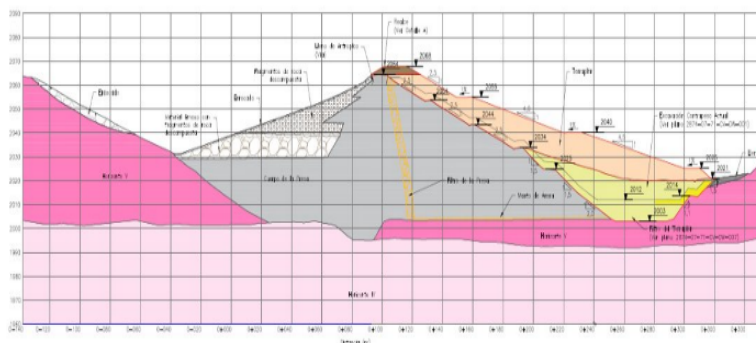


Figura 7

Sección de diseño actualizado en 2022 de la presa Miraflores



La presa Miraflores cuenta con la suficiente instrumentación para monitorear las variables más relevantes, como se describe en la Tabla 1.

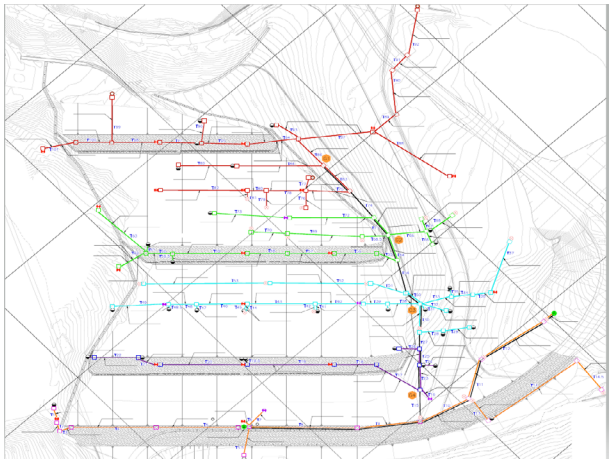


Tabla 1
Instrumentación presa Miraflores

Variables	Instrumento de medida	Operativas
Infiltraciones	Pozos de observación	21
	Piezómetros eléctricos	39
	Piezómetros Casagrande o tubo abierto	31
	Vertederos de aforo (MI)	3
Presiones	Piezómetros hidráulicos	31
Deformaciones	Inclinómetros	6
	Puntos de control superficial	53
Aceleraciones	Acelerógrafos	2
Adquisición y transmisión de datos	Tableros de instrumentación	4
Total Instrumentos		190

La instrumentación de la presa se encuentra distribuida en todo el cuerpo de la infraestructura, como se ilustra en la Figura 8, siguiendo las recomendaciones de los expertos, a raíz de los estudios de evaluación y los diseños de la actualización (EPM, 2021).

Figura 8
Distribución en planta de la red de instrumentación en la presa Miraflores



A continuación, se detalla las instalaciones y particularidades de la instrumentación, las cuales cuentan con el estado del arte en la materia.

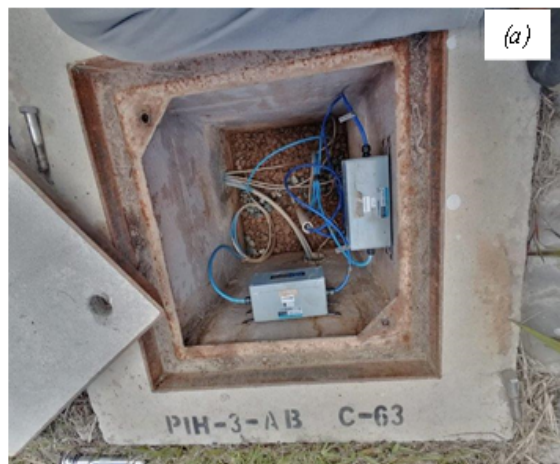


Instalación de piezómetros de hilo vibrante

Los 91 piezómetros de hilo vibrante son utilizados para monitorear los pozos de observación y los piezómetros Casagrande o de tubo abierto. En la superficie de la instalación se ejecutó obras civiles como cajas de empalme y cajas de paso en concreto, que permiten la adecuada conexión de los piezómetros con los sistemas de protección contra descargas eléctricas y empalmes necesarios para conectarlos con el sistema de adquisición de datos, como se ilustra en la Figura 9.

Figura 9

Adecuaciones para protección y conexión de los piezómetros en superficie



Medidores de infiltración

Los tres medidores de infiltración, compuestos por vertederos de aforo con cuchillas en V de 90° y una regleta, son monitoreados permanentemente por un sistema de medición de nivel con sensores tipo radar, cuya señal de 4-20mA se conecta a los sistemas de adquisición de datos en los tableros de instrumentación. Su configuración se ilustra en la Figura 10.



Figura 10

Medidores de infiltración con sistema de medición por radar



Piezómetros hidráulicos

La presa Miraflores cuenta, desde su construcción, con un sistema de piezómetros hidráulicos para monitorear las presiones intersticiales o presión de poros. El sistema de medición presentaba obsolescencia tecnológica en sus elementos de monitoreo, lo cual generaba incertidumbre en la exactitud de la variable que es considerada como variable relevante; por lo tanto, a partir de un análisis interno en EPM, se creyó oportuna y conveniente la actualización del sistema de medición, por ser una variable monitoreada desde el momento mismo de su construcción; así que, poder continuar con su monitoreo daría información de gran valor para conocer la evolución y el estado de la presa.

Los 31 piezómetros hidráulicos están concentrados en una caseta donde se cuenta con el sistema actualizado para su respectivo monitoreo. El sistema está compuesto por un módulo de purga y 31 módulos de medición (un módulo de medición por cada piezómetro); estos últimos están compuestos por un sistema redundante con dos manómetros y dos transductores de presión; los manómetros permiten verificar las medidas *in situ* por el inspector de campo; los transductores de presión son conectados a un sistema de adquisición de datos ubicado en la misma caseta. Adicionalmente, el sistema de purga permite calibrar y hacer limpiezas al sistema, según se establece en el plan metrológico.

Es importante mencionar que el sistema de monitoreo actual fue diseñado a partir de la experiencia en el campo de la instrumentación geotécnica, la adopción de conocimientos de instrumentación industrial y las recomendaciones de la Buró de Reclamación de los Estados Unidos de América, lo cual converge en un sistema altamente funcional, robusto y de fácil diagnóstico y mantenimiento.



El antes y después de la actualización del sistema de piezómetros hidráulicos se detalla en la Figura 11.

Figura 11

Antes (1962 a 2022) y después de la actualización del sistema de piezómetros hidráulicos

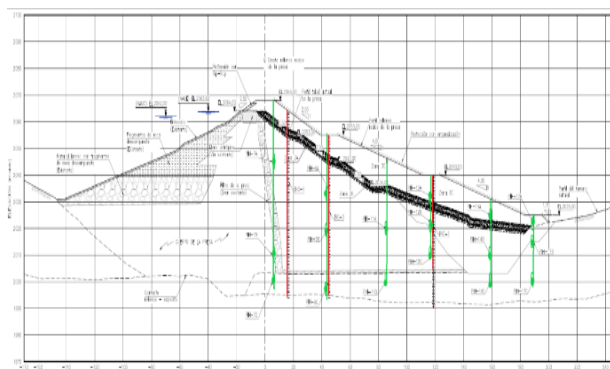


Inclinómetros

La presa cuenta con seis inclinómetros, de los cuales cinco están ubicados en el cuerpo de la presa y uno en el estribo derecho (Figura 12); la ubicación de tres de ellos está en la sección principal. Estos inclinómetros son de tipo sonda con consola y sus lecturas son realizadas manualmente, según el programa de lectura establecido desde el equipo Seguridad de Presas.

Figura 12

Ubicación de tres inclinómetros en la sección principal de la presa (líneas oscuras)



Puntos de control topográfico

La presa cuenta con 53 puntos de control topográfico, cuya ubicación en planta se ilustra en la Figura 13; los puntos son leídos a través de una estación total de topografía y prismas, con la participación de una comisión de topografía y de acuerdo con el programa de lectura establecido desde Seguridad de Presas. El ejemplo de la actividad es ilustrado en la Figura 14.

Figura 13

Distribución en planta de los puntos de control topográfico en la presa

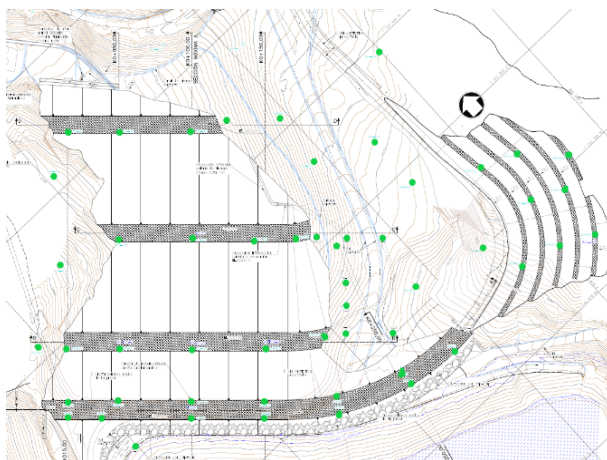


Figura 14

Comisión de topografía en la presa Miraflores



Acelerógrafos

La presa Miraflores cuenta con dos acelerógrafos, ubicados en casetas específicas diseñadas para su fin, como se ilustra en las figuras 15 y 16. Un equipo está instalado en la caseta ubicada en roca no intervenida (equipo de referencia) y otro en la caseta de la parte central de la cresta de la presa (zona con mayor grado de libertad), los cuales permiten el monitoreo de los sismos para verificar la frecuencia fundamental de vibración de la presa y su respuesta ante las solicitaciones sísmicas, de acuerdo con los criterios de diseño.

Figura 15

Caseta de acelerógrafo



Figura 16

Detalle de instalación de acelerógrafo



Sistemas de adquisición de datos

Está compuesto por equipos especiales para el monitoreo y gestión de variables geotécnicas e hidrometeorológicas, adecuados con sistemas de protección y regulación eléctrica para su óptimo funcionamiento, integrados en un tablero que cumple con especificaciones de protección física, electrónica y contra las



inclemencias del medio ambiente en la zona particular de la instalación, como se ilustra en la Figura 17. A continuación, se lista los equipos integrados en los tableros:

- Datalogger
- Protecciones eléctricas
- Sistema de iluminación
- Fuente y regulación de potencia
- Multiplexores
- Radios RF
- Interruptor de comunicaciones
- Conversor medio (transceiver) FO-ETH

Figura 17

Tablero de instrumentación geotécnica

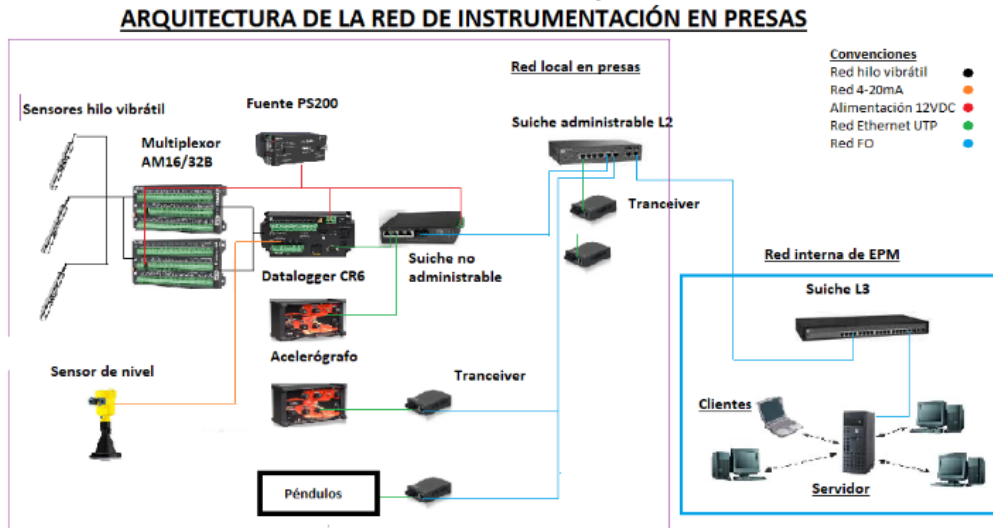


Finalmente, los sistemas integrados a este tablero se comunican con el centro de monitoreo técnico de Seguridad de Presas de EPM, formando una arquitectura de red estándar para la instrumentación geotécnica de presas de EPM (Figura 18) que permite monitorear las variables relevantes de las presas en tiempo real.



Figura 18

Arquitectura de red en presas y taludes de EPM



Recomendaciones básicas para la selección de instrumentos

Para la selección de los equipos que conformen el sistema de instrumentación geotécnica en presas, se debe tener en cuenta las siguientes características:

- Resistencia a la intemperie, humedad y corrosión
- Rango
- Confiabilidad a largo plazo
- Precisión y resolución
- Facilidad para la instalación
- Operación y mantenimiento
- Posibilidad de integrar a un sistema de adquisición de datos para telemetría
- Compatibilidad con los equipos y elementos existentes.

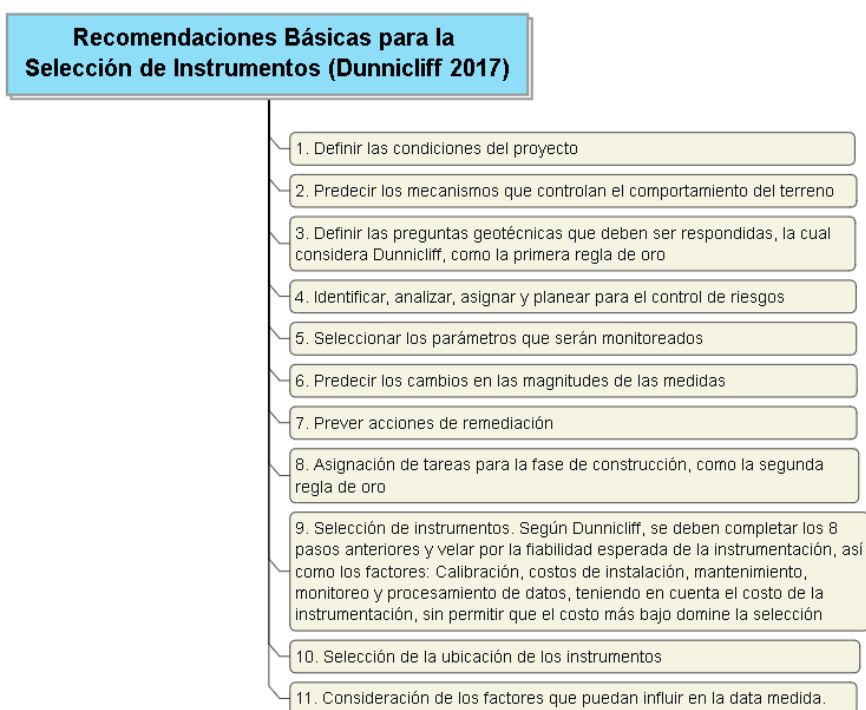
Seyed-Kolbadi et al. (2020) establecen el círculo general de gestión de riesgo en presas, seccionado en cinco elementos: identificación, análisis, planeación, monitoreo y control, los cuales convergen en un programa de inspección y mantenimiento basado en el monitoreo permanente de las variables más relevantes de una presa, con el fin de conocer su estado de salud y asegurar su correcto funcionamiento durante la construcción y durante toda su vida útil, así como la identificación, evaluación de los riesgos del proyecto y, las consecuencias que implicaría la materialización de estos riesgos. En consecuencia, algunos problemas o fallas en las presas están relacionados con el mal funcionamiento de la instrumentación, debido a falsas alarmas o, por no proporcionar alertas tempranas asociadas a inestabilidades que podrían ser evitables, al seguir los adecuados procedimientos en la selección

de instrumentación (Papachatzaki et al., 2009). Estos planteamientos sientan algunas bases que soportan la relevancia en la adecuada selección de instrumentación.

Dunnicliff (1982) plantea un concepto fundamental e integral en la selección de la instrumentación aún vigente: que cada instrumento en un proyecto debe ser seleccionado e instalado en un lugar específico, para dar respuesta a una pregunta específica: si no hay una pregunta, no debe haber un instrumento. Más adelante, entre 2012 y 2017, expone lo que se puede considerar como la metodología principal y típicamente usada para la adecuada selección de instrumentación, la cual es soportada en el criterio de expertos. Esta se compila en los siguientes once pasos de la Figura 19:

Figura 19

Recomendaciones básicas en la selección de instrumentación



Conclusiones

Se establece que, en el desarrollo de la ingeniería de presas es imperativo el seguimiento a la evolución de la instrumentación geotécnica, la electrónica y los sistemas de telecomunicaciones, de suerte que se pueda identificar y seleccionar los sistemas más adecuados para acondicionar las presas con una instrumentación que cumpla con las características requeridas por un proyecto en particular.



Resulta claro que, el estado del arte en la instrumentación geotécnica de presas abre la puerta en la búsqueda de una solución integral que establezca una metodología como soporte al geotecnista o instrumentista, en la obtención de los elementos necesarios para seleccionar la instrumentación más adecuada según sean los requerimientos.

Se ilustra el estado del arte en la instrumentación de presas, con el ejemplo reciente de la actualización de la presa Miraflores de EPM, la cual compila un importante grupo de instrumentos usados comúnmente para el monitoreo dinámico de presas.

La gestión integral del riesgo involucra, entre otros aspectos, la cuantificación de los riesgos particulares de cada estructura, además de aquellos que potencialmente son producidos y encadenados aguas abajo por fallos individuales. En tal sentido, resulta de particular importancia proveer y gestionar sistemas de instrumentación pertinentes para cada presa, pues ello conlleva una adecuada mitigación de riesgos estructurales, geotécnicos e hidráulicos sobre sistemas de embalses encadenados.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid y a EPM por facilitar la información de su archivo, necesaria para compilar este artículo.

Referencias

- Atinfo.net. (2023). Auscultación y Taller de Ingeniería. Jornada sobre auscultación presas y su cimiento. <https://www.atinfo.net/>
- Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial. (2021). *Nota sobre buenas prácticas: Seguridad de las presas*. Banco Mundial.
- Bassett, R. (2012). *A guide to field instrumentation in geotechnics: principles, installation, and reading*. Taylor & Francis Group, LLC.
- Canadian Dam Association (CDA). (2013). Dam Safety Guidelines 2007. <https://cda.ca/publications/cda-guidance-documents/dam-safety-publications>
- Castillo, L. G. y De Cos, O. (1997). Corrección de la fórmula del SMPDBK para el cálculo del caudal pico de rotura de presas. *VII Congreso Nacional de Hidráulica*. https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/congresos/Quito_CorreccionSMPDBK_1997.pdf
- CIRIA. (2013). *The International Levee Handbook*. CIRIA, Griffin Court.



- Comité Nacional Español de Grandes Presas. (2018). Legislación de Seguridad de Presas en España. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/03_-_escuder_bueno_legislacion_sp_espana.pdf
- Das, B. M. & Sivakugan, N. (2017). *Fundamentals of Geotechnical Engineering* (7th ed.). CENGAGE.
- Díaz-Sepúlveda, D. F. (2014). *Validación de un modelo numérico de diseño de presas de enrocado con cara de concreto a partir de la instrumentación geotécnica caso Porce III* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/52000>
- Dunnicliff, J. (1982). *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. National Research Council.
- Empresas Públicas de Medellín (EPM). (2021). EPM ejecuta obras de actualización y mejoramiento de la presa Miraflores. <https://cu.epm.com.co/clientesyusuarios/noticias-y-novedades/epm-ejecuta-obras-de-actualización-y-mejoramiento-de-la-presa-miraflores>
- Geokon. (s.f.). New satellite network loggers. <https://www.geokon.com/>
- Government of Malaysia. (2017). Malaysia Dam Safety Management Guidelines (MyDAMs). [https://www.water.gov.my/jps/resources/PDF/MyDAMS_2017_\(Free_Copy\).pdf](https://www.water.gov.my/jps/resources/PDF/MyDAMS_2017_(Free_Copy).pdf)
- Iglesias, C. A. (2010). *La instrumentación como medio de validación de diseños geotécnicos* [Tesis de Maestría, Universidad EAFIT]. <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/1224>
- Instituto Geofísico - EPN. (2023). Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC). <https://www.igepn.edu.ec/red-nacional-de-acelerografos>
- Masoumi, I., Ahangari, K., & Noorzad, A. (2017). Reliable monitoring of embankment dams with optimal selection of geotechnical instruments. *Structural Monitoring and Maintenance*, 4(1), 85-108. <https://doi.org/10.12989/smm.2017.4.1.085>
- Masoumi, I., Ahangari, K., & Noorzad, A. (2018). Integrated fuzzy decision approach for reliability improvement of dam instrumentation and monitoring. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 3(2), 114-125. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/24705314.2018.1461546>
- Ministerio de Medio Ambiente. (2001). Guía técnica para la elaboración de los planes de emergencia de presas. https://www.miteco.gob.es/es/agua/publicaciones/guia_planes_emergencia_tcm30-216054.pdf



- Morera, G. (2016). *Instrumentación y monitorización geotécnica del nuevo túnel "El Melón"* [Tesis de Pregrado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía]. https://oa.upm.es/42989/1/PFG_Gonzalo_Morera-de_la_Vall_Gonzalez.pdf
- Newell, S., Hajdukiewicz, M., & Goggins, J. (2016). Real-time monitoring to investigate structural performance of hybrid precast concrete educational buildings. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 1(4), 147-155. <https://doi.org/10.1080/24705314.2016.1240525>
- Papachatzaki, Z., Anastasopoulos, K., Oikonomidis, C., & Siachou, S. (2009). Experiences from the installation of geotechnical instruments in dams. En *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (pp. 2021-2024). M. Hamza et al. (eds.). IOS Press.
- Prasad, B. & Naik, S. R. (2021). Importance of Instrumentation in Hydropower Projects. *Journal of Geological Research*, 3(2), 53-59. <https://doi.org/10.30564/jgr.v3i2.3018>
- Seyed-Kolbadi, S. M., Hariri-Ardebili, M. A., Mirtaheri, M., & F. Pourkamali-Anaraki, F. (2020). Instrumented Health Monitoring of an Earth Dam. *Infrastructures*, 5(3), 26. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5030026>
- Sharma, R. P. & Kumar, A. (2013). Case Histories of Earthen Dam Failures International. Seventh International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. <https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3092&context=icchge>
- Sisgeo. (s.f.). Instrumentación para geotecnia y monitoreo estructural. <https://www.sisgeo.com/es/>
- Tobón, A. y Miranda, R. (eds.). (2008). *Ingeniería de presas en Empresas Públicas de Medellín*. Empresas Públicas de Medellín.
- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2012). Colorado River Basin water supply and demand study. https://www.usbr.gov/lc/region/programs/crbstudy/finalreport/Study%20Report/StudyReport_FINAL_Dec2012.pdf
- Vargas, A. (2019). Experiencias en el desarrollo de la instrumentación geotécnica y del método observacional en las grandes presas construidas para generación hidroeléctrica en México y la factibilidad de implementarse en presas de relaves mineros (residuos mineros). En *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges* (pp. 1918-1928). 10.3233/STAL190250. <https://ebooks.iospress.nl/publication/53461>

