



**Universidad
Europea**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**APLICACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN
LA AUSCULTACIÓN DE UN DESLIZAMIENTO
DE LADERA EN UN EMBALSE**

Escuela de Arquitectura, Ingeniería y Diseño

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Autor:

Rodolfo Javier Herrero Martín

Dirigido por:

D. Marcos Rodríguez Serrano

D. Carlos Henche Guijarro

Co-Director:

D. Juan Manuel Alameda Villamayor

Madrid, 2026

DEDICATORIA

A mi mujer, Anabel.

Este TFM habla de laderas que se mueven, de presas que exigen respeto y de datos que, si no se ordenan bien, no sirven para proteger nada. Pero, por encima de todo, este trabajo también habla de ti. Porque mientras yo intentaba poner “en carga” un modelo BIM, series temporales, controles de calidad, alertas— tú has sido el elemento más estable de todo el proyecto: mi punto de referencia.

Cuando el tiempo se me iba entre campañas, umbrales y gráficos, tú asumiste en silencio la parte que no aparece en ninguna tabla: los planes aplazados, los días sin salir, la casa convertida en oficina y el cansancio de verme encerrado con el portátil. Y aun así, me sostuviste como una red de control bien asentada: sin hacer ruido, evitando que cualquier pequeña deriva se convirtiera en un error grande.

Si este proyecto busca trazabilidad, la mía empieza y termina en ti. Si el modelo necesita un “*AssetID*” que lo conecte todo, el mío eres tú: la clave que enlaza esfuerzo con sentido. Y si en una ladera el agua puede cambiarlo todo, tu apoyo ha sido justo lo contrario: el drenaje sereno que ha mantenido a raya la presión cuando más apretaba.

Este TFM lleva mi nombre en la portada, pero su estabilidad —la de verdad— ha sido cosa tuya.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a mi hijo, por estar ahí siempre que lo he necesitado y por saber soportar mi mal humor en los momentos más complicados. A mis padres, por enseñarme desde siempre que las cosas importantes se consiguen con esfuerzo y sacrificio, y que nadie regala nada. A mis suegros y cuñadas, porque sin su ayuda nunca hubiera estado donde estoy ahora. A mis compañeros de trabajo, por cubrirme las espaldas y hacerme más fácil el camino mientras yo dedicaba tiempo a estudiar. A mis tres tutores, Marcos, Carlos y Juan Manuel, por todos los consejos para que este TFM haya llegado a buen puerto. A mi exjefe, Jesús, por todo lo que me enseñó y por el apoyo que me brindó en una etapa muy importante de mi vida profesional. Y, por último, aunque seguramente sea la persona más determinante en esta historia, a mi jefe, Luis, gracias a quien —o quizá por culpa suya— me embarqué en esta aventura; por confiar en mí como no lo ha hecho nadie en toda mi carrera y porque cada día sigo aprendiendo algo de él. A todos ellos, gracias de corazón por apoyarme, ayudarme y aguantarme en este camino.

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Máster desarrolla una propuesta aplicada para integrar, gestionar y explotar la auscultación de un deslizamiento de ladera situado en la cola de un embalse mediante la combinación de un entorno BIM, una base de datos de series temporales y herramientas de analítica avanzada. El punto de partida del trabajo es una problemática muy habitual en este tipo de infraestructuras: la información existe, pero aparece dispersa en tablas, documentos, campañas de auscultación y representaciones parciales, lo que dificulta su lectura conjunta, su trazabilidad y su utilización operativa para la toma de decisiones.

A partir de ese diagnóstico, la investigación se estructura en tres bloques complementarios. En primer lugar, se reconstruye el marco geológico, geotécnico e instrumental del caso de estudio y se ordena el histórico del deslizamiento I-13. En segundo lugar, se analizan las principales técnicas de auscultación disponibles —piezometría, topografía de alta precisión, inclinometría y aforo de filtraciones— y se proponen umbrales operativos de aviso y alarma obtenidos a partir del comportamiento real de las series históricas. En tercer lugar, se implanta una cadena de explotación digital basada en la integración entre InfraWorks y Power BI, a la que se añade posteriormente una capa adicional de prealerta mediante Azure Machine Learning.

El resultado alcanzado no debe entenderse como un simple cuadro de mando ni como un modelo predictivo aislado, sino como una estructura de trabajo coherente en la que el territorio, el histórico de auscultación, el estado actual y la anticipación prudente quedan conectados entre sí. InfraWorks actúa como visor territorial y punto de acceso espacial al sistema; Power BI concentra la lectura histórica, los estados y la explotación analítica; y Azure Machine Learning se incorpora como un apoyo a la priorización de revisiones, sin sustituir en ningún caso el criterio técnico del analista. De este modo, el TFM demuestra que la combinación entre BIM, gestión del dato y analítica puede mejorar de forma tangible la explotación de la auscultación en laderas inestables asociadas a embalses y dejar preparada una base sólida para futuras ampliaciones del sistema.

ABSTRACT

This Master's Thesis develops an applied proposal to integrate, manage and utilise monitoring data from a landslide located at the tail end of a reservoir, by combining a BIM environment, a time-series database and advanced analytical tools. The starting point for this work is a very common problem in this type of infrastructure: the information exists, but it is scattered across tables, documents, monitoring campaigns and partial representations, which makes it difficult to interpret as a whole, trace and use operationally for decision-making.

Based on this diagnosis, the research is structured into three complementary sections. Firstly, the geological, geotechnical and instrumental framework of the case study is reconstructed and the history of the I-13 landslide is organised. Secondly, the main monitoring techniques available—piezometry, high-precision surveying, inclinometry and seepage measurement—are analysed, and operational warning and alarm thresholds are proposed, derived from the actual behaviour of the historical data series. Thirdly, a digital monitoring chain is implemented based on the integration of InfraWorks and Power BI, to which an additional pre-alert layer is subsequently added using Azure Machine Learning.

The result achieved should not be understood as a simple dashboard or as an isolated predictive model, but rather as a coherent working framework in which the territory, the monitoring history, the current status and prudent anticipation are interconnected. InfraWorks acts as a territorial viewer and spatial access point to the system; Power BI consolidates historical data, current statuses and analytical operations; and Azure Machine Learning is incorporated to support the prioritisation of inspections, without in any way replacing the analyst's technical judgement. In this way, the Master's thesis demonstrates that the combination of BIM, data management and analytics can tangibly improve the use of monitoring on unstable slopes associated with reservoirs and lay a solid foundation for future system expansions.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	4
3	ESTADO DEL ARTE	6
3.1	TIPOLOGÍAS DE DESLIZAMIENTOS	6
3.1.1	Marco de clasificación	7
3.1.2	Tipologías principales por modo de movimiento	9
3.1.3	Tipología por material y nomenclatura práctica	14
3.1.4	Descriptor complementarios (peligro y comportamiento)	15
3.1.5	Esquema de decisión para clasificar un caso	15
3.1.6	Guía rápida de diagnóstico (observables → tipología probable)	16
3.2	TIPOLOGÍAS DE PRESAS	16
3.2.1	Tipologías por material y tipología estructural	17
3.2.2	Tipologías por método constructivo	21
3.2.3	Clasificación normativa y de seguridad	22
3.2.4	Tabla comparativa de tipologías (resumen)	22
3.3	GEOLOGÍA, GEOTECNIA E HIDROLOGÍA	24
3.3.1	Condicionantes geológicos	24
3.3.2	Comportamiento geotécnico y mecanismos de rotura	25
3.3.3	Métodos de análisis de estabilidad	25
3.3.4	Hidrogeología. Influencia del agua y del embalse	26
3.3.5	Implicaciones para la metodología BIM y la auscultación	28
3.4	AUSCULTACIÓN	30
3.4.1	Tecnología GPS – DGPS/DGNSS	31
3.4.2	Inclinometría	33
3.4.3	Piezometría abierta (<i>standpipe</i>)	35
3.4.4	Topografía de alta precisión con Estación Total	37
3.4.5	Auscultación de laderas en entorno BIM	41
3.4.6	Integración de IA en auscultación y sistemas de predicción	42
4	PROPUESTA DE METODOLOGÍA	45

4.1	METODOLOGÍA	46
4.1.1	Visión general de la arquitectura.....	46
4.1.2	Estandarización de la información.....	47
4.1.3	Sistema centralizado de gestión	48
4.1.4	Integración BIM ↔ Base de datos.....	50
4.1.5	Interpretación de datos con IA	51
4.1.6	Predicción, escenarios y alertas	52
4.1.7	Presentación y explotación.....	54
4.2	IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA Y RESULTADOS ESPERADOS.....	54
4.2.1	Implementación del inventario y plantillas de campaña.....	54
4.2.2	Implementación del modelo BIM.....	55
4.2.3	Implementación del CDE	56
4.2.4	Base de datos y API.....	56
4.2.5	Resultados de QA/QC	56
4.2.6	Interpretación con IA.....	57
4.2.7	Predicción, escenarios y alertas	58
4.2.8	Síntesis y limitaciones.....	59
4.3	GLOSARIO DE ABREVIATURAS.....	59
5	APLICACIÓN A ESTUDIO DE DESLIZAMIENTO EN UN EMBALSE (CON DATOS REALES)	60
5.1	INTRODUCCIÓN.....	60
5.2	HISTÓRICO DEL ENTORNO	60
5.2.1	Cronología del deslizamiento I-13	68
5.3	AUSCULTACIÓN EXISTENTE	68
5.3.1	Piezometría.....	69
5.3.2	Topografía de alta precisión	70
5.3.3	Inclinometría	71
5.3.4	Aforo de filtraciones	72
5.4	OBTENCIÓN DE UMBRALES DE AVISO Y ALARMA.....	77
5.4.1	Base de datos analizada	78
5.4.2	Procedimientos para definición de umbrales.....	79

5.4.3	Resultados del análisis por técnica.....	80
5.4.4	Conclusión	81
5.5	ESTUDIO DE DESLIZAMIENTO. INTEGRACIÓN INFRAWORKS – POWER BI.....	81
5.5.1	Integración Infracworks – Power BI.....	81
5.5.2	Encaje del bloque dentro de la metodología general.....	82
5.5.3	Criterios de diseño adoptados antes de construir las páginas	84
5.5.4	Organización del CDE y preparación de la base de datos de trabajo	86
5.5.5	Construcción del modelo en InfraWorks y definición de los objetos sensor.....	88
5.5.6	Estrategia de enlace entre InfraWorks y Power BI mediante <i>AssetID</i>	90
5.5.7	Construcción del modelo analítico en Power BI Desktop.....	92
5.5.8	Desarrollo de la página CONTROL como puerta de entrada al cuadro de mando	95
5.5.9	Desarrollo de las páginas GRAFICAS_HIT y ALERTAS_HIT.....	96
5.5.10	Desarrollo de las páginas GRAFICAS_ICL y ALERTAS_ICL	98
5.5.11	Desarrollo de las páginas GRAFICAS_PZA y ALERTAS_PZA.....	100
5.5.12	Secuencia real de validación desde el modelo territorial	103
5.5.13	Resultado alcanzado, aportación al TFM y limitaciones observadas	104
5.5.14	Valor de la integración para la explotación del deslizamiento y criterios para su reproducción	106
5.5.15	Decisiones de maquetación y lectura visual del cuadro de mando	107
5.5.16	Control de calidad del dato y coherencia técnica del panel.....	109
5.5.17	Secuencia de uso prevista para un técnico de explotación.....	111
5.5.18	Síntesis comparada de las tres familias de páginas y lectura conjunta del sistema 112	
5.5.19	Discusión técnica: ventajas de la integración frente a una consulta puramente documental o tabular	114
5.5.20	Condiciones necesarias para mantener el sistema operativo en campañas futuras 115	
5.5.21	Cierre del bloque y transición al desarrollo posterior.....	116
5.6	ESTUDIO DE DESLIZAMIENTO. PREDICCIÓN CON IA. INTEGRACIÓN AZURE MACHINE LEARNING – POWER BI.....	117

5.6.1	Continuidad con el apartado 5.5 y razón de ser del bloque predictivo.....	118
5.6.2	Objeto del capítulo y criterio general adoptado	119
5.6.3	Condiciones de partida, datos disponibles y restricciones reales del proyecto	120
5.6.4	Primeros ensayos de <i>AutoML</i> y detección de una perfección artificial.....	123
5.6.5	Segundo entrenamiento y revisión crítica de las variables disponibles.....	124
5.6.6	Reformulación temporal del objetivo: construcción de EstadoRiesgo_sig	125
5.6.7	Ensayo multiclase a campaña siguiente y constatación del desbalance extremo....	126
5.6.8	Simplificación binaria del objetivo y comparación entre métricas de optimización	127
5.6.9	Decisión final sobre el papel de la IA: motor de prealerta y no decisor único.....	129
5.6.10	Registro del modelo y primeros intentos de despliegue <i>batch</i>	131
5.6.11	Incidencias de la vía <i>batch</i> y razones para no mantenerla como solución principal	132
5.6.12	Replanteamiento de la arquitectura de intercambio y adopción de Azure SQL Database	132
5.6.13	Creación y validación inicial de la base de datos Azure SQL	133
5.6.14	Reconocimiento de la granularidad real del modelo y consecuencias para el panel	134
5.6.15	<i>Notebook</i> de <i>Azure Machine Learning</i> y lectura del histórico real	136
5.6.16	Construcción de la tabla final <code>dbo.PrediccionesIA_Grupo</code> y carga masiva	137
5.6.17	Importación en Power BI y reconstrucción de la lógica operativa	137
5.6.18	Desarrollo de la página PREDICCIÓN IA en Power BI	138
5.6.19	Criterio de navegación desde CONTROL y necesidad de apertura limpia.....	139
5.6.20	Validación técnica de la cadena completa	140
5.6.21	Resultado alcanzado y aportación del bloque al seguimiento del deslizamiento	141
5.6.22	Discusión técnica: ventajas, límites y lectura crítica del sistema	141
5.6.23	Condiciones necesarias para su mantenimiento y posibles mejoras futuras	142
5.6.24	Conclusiones	143
6	CONCLUSIONES	145
7	FUTURAS LÍNEAS DE MEJORA E INVESTIGACIÓN	151

7.1	LÍNEAS FUTURAS EN EL ÁMBITO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y DE LA GESTIÓN DEL DATO	151
7.2	LÍNEAS FUTURAS EN EL ÁMBITO DE POWER BI Y DE LA EXPLOTACIÓN OPERATIVA.....	152
7.3	LÍNEAS FUTURAS DE carácter GENERAL, GEOTÉCNICO Y DE INTEGRACIÓN DIGITAL ...	153
8	BIBLIOGRAFÍA	155

ANEXOS

- ANEXO N.º 1. TABLAS
 - ANEXO N.º 2. FIGURAS
 - ANEXO N.º 3. DIAGRAMAS E ILUSTRACIONES RELEVANTES
-

1 INTRODUCCIÓN

Un deslizamiento es un movimiento en masa de roca, tierras o detritos que se desplazan ladera abajo, provocado por la combinación de varios factores:

- Condiciones geológicas.
- Agua en el terreno.
- Lluvias.
- Sismos.
- Erosión.
- Cambios en las condiciones de contorno de la ladera.

En las infraestructuras hidráulicas, la oscilación del nivel del embalse puede llegar a modificar las presiones intersticiales, incrementando de esta manera la susceptibilidad a la inestabilidad en determinadas zonas del vaso (U.S. Geological Survey (USGS), 2025).

En presas y embalses, la estabilidad de las laderas tiene una relación directa con la seguridad. Un movimiento de cierta magnitud puede afectar a:

- Capacidad útil del embalse.
- Calidad del agua (turbidez).
- Operatividad de caminos y servidumbres.
- Generación de oleaje con implicaciones sobre estructuras y márgenes.

La auscultación y vigilancia son componentes esenciales en la gestión de la seguridad, orientadas a detectar comportamientos anómalos y apoyar la toma de decisiones (ICOLD/CIGB, 2018) (Federal Energy Regulatory Commission (FERC), 2024). En España, estas actividades se enmarcan en un contexto normativo que fija responsabilidades y procedimientos de control de la seguridad en presas y embalses (España, 2021).

Auscultación es el conjunto de observaciones sistemáticas y mediciones realizadas sobre el comportamiento de una obra y su entorno, se apoya en instrumentación geotécnica y topográfica (inclinómetros, piezómetros, control de deformaciones, aforos, etc.), combinada con inspecciones visuales y análisis ingenieril. Distintas guías coinciden que el valor de la instrumentación no solo

reside en medir, sino en disponer de series constantes, criterios de calidad de los datos y de un proceso de interpretación que conecte las lecturas con hipótesis de comportamiento y modos potenciales de fallo (ICOLD/CIGB, 2018) (Federal Energy Regulatory Commission (FERC), 2024).

El verdadero reto es cuando la información proviene de diferentes fuentes (equipos de medida, hojas de cálculo, planos, informes, bases de datos, fotografías, etc.), con distintos criterios de identificación y trazabilidad. Esta heterogeneidad complica la explotación de los datos, la comparación entre diferentes campañas y la generación de productos claros. En este Trabajo Fin de Máster se aborda este problema proponiendo una arquitectura que integre datos de auscultación y contexto en un repositorio coherente, orientado a la explotación de la infraestructura y a la toma de decisiones.

En los últimos tiempos se ha venido consolidando el uso de *Building Information Modelling* (BIM), no solo como modelo geométrico, sino como un marco de información durante toda la vida de la infraestructura. La serie ISO 19650 formaliza los procesos de gestión y entrega de información en entornos colaborativos, apoyándose en una Entorno Común de Datos (CDE) como fuente única para compartir y controlar el flujo de información de forma ordenada y coherente (ISO, 2018a) (ISO, 2018b). Los enfoques *openBIM* promueven una interoperabilidad entre distintas herramientas mediante estándares abiertos como es el IFC (*Industry Foundation Classes*), que es el principal esquema internacional para el intercambio de información en un entorno BIM (ISO, 2024) (buildingSMART International, s.f.).

Para las series temporales y datos de sensores (auscultación), conviene apoyarse en estándares de intercambio y acceso. Existen especificaciones (*OGC SensorThings API* o *ETSI NGSI-LD API*) que proporcionan modelos e interfaz web normalizada para gestionar observaciones de sensores y sus datos, con lo que se facilita la integración de múltiples fuentes IoT y el consumo por aplicaciones externas.

Sobre una base de datos perfectamente estructurados, la analítica puede aportar controles de calidad, detección de valores atípicos y reconocimiento de patrones que en combinación con criterios ingenieriles pueden ayudar a priorizar revisiones y reducir tiempos de respuesta. Existe bibliografía técnica en detección de anomalías que describe enfoques estadísticos y de aprendizaje para identificar comportamientos extraños en la serie de datos (Chandola, et al., 2009). Además, en

contextos relacionados con la seguridad es importante incorporar principios de gobernanza, transparencia y gestión del riesgo del uso de IA, tal y como recogen marcos de referencia institucionales (National Institute of Standards and Technology (NIST), 2023).

El presente trabajo propone un sistema BIM + Analítica para integrar la auscultación existente en un deslizamiento de ladera situado en la cola de un embalse, conectando el modelo BIM con una base de datos de series temporales y una serie de procesos de control/alerta.

2 OBJETIVOS

Los objetivos del presente Trabajo Fin de Máster se plantean para dar respuesta al problema de integración, trazabilidad y explotación de datos de auscultación, agrupando la solución con actuaciones reconocidas de vigilancia e instrumentación y con estándares de gestión e interoperabilidad de información.

Objetivo general:

Definir e implantar un sistema basada en un modelo BIM y una analítica de datos con el que se pueda integrar, gestionar y explotar la auscultación existente de un deslizamiento de ladera en un embalse, consiguiendo trazabilidad, visualización y apoyo a la detección temprana de comportamientos anómalos.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar el sistema de auscultación existente (instrumentación, ubicación, variables medidas, frecuencias, etc.).
2. Definir requisitos de información y la estructura de identificación (IDs) para garantizar trazabilidad entre instrumentos, ubicaciones y series de datos.
3. Elaborar un modelo BIM orientado a la explotación que represente el entorno, la instrumentación y los elementos relevantes.
4. Justificar técnicamente el mecanismo de inestabilidad.
5. Incorporar una metodología de cálculo para traducir el comportamiento esperado del deslizamiento a indicadores medibles y criterios límite. No se trata solamente de conocer valores, sino de disponer de umbrales y niveles de actuación coherentes y con verificaciones de estabilidad en distintos escenarios. De este modo, será posible conectar la auscultación con hipótesis de fallo y criterios de decisión.
6. Establecer un flujo de interoperabilidad basado en IFC para el intercambio del modelo y sus propiedades asociadas.
7. Diseñar una arquitectura de datos para las series temporales, incluyendo procesos de introducción de datos y de consulta, apoyándose en un estándar de acceso a las observaciones.

8. Implementar rutinas de control de calidad de los datos para detectar valores atípicos, tendencias y cambios de régimen de las series temporales.
9. Definir criterios de alerta y productos de salida para facilitar la revisión por el personal responsable.
10. Incorporar consideraciones de uso responsable de IA.
11. Validar el funcionamiento del sistema con datos históricos y de nueva adquisición, documentando resultados, limitaciones y propuestas de mejora.

3 ESTADO DEL ARTE

En este apartado se va a hacer un estudio del conocimiento existente en los temas que conciernen a la ladera que será objeto de aplicación del sistema que se propondrá en los próximos capítulos.

Estos temas se han dividido en varios apartados en función del entorno físico que nos encontraremos en la ladera de estudios o de los distintos sistemas de auscultación de los que disponemos datos para su análisis.

3.1 TIPOLOGÍAS DE DESLIZAMIENTOS

En ingeniería, el término “deslizamiento de ladera” (*landslide*), se utiliza normalmente para describir movimientos en masa. Una buena definición es la que hace Cruden: *Un deslizamiento es el movimiento de una masa de roca, tierra o detritos ladera abajo* (Cruden, 1991).

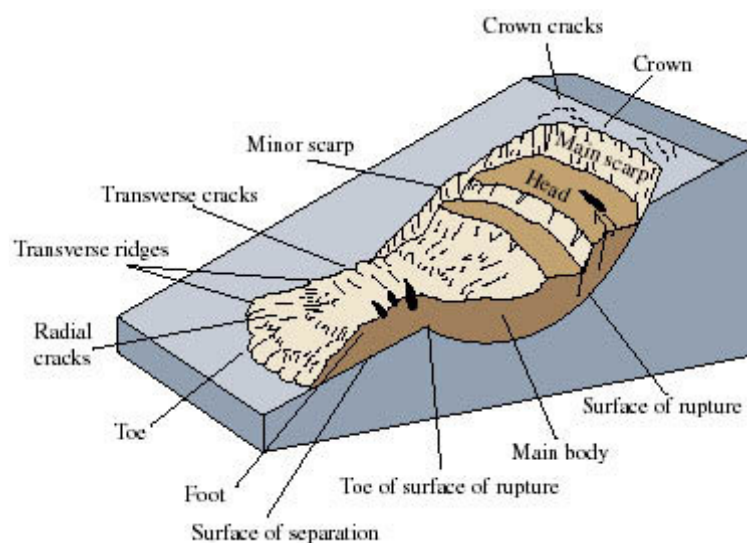


Ilustración 1 Nomenclatura de las partes de un deslizamiento tipo slump–earthflow (corona, eskarpe, cuerpo, pie, etc.).
Fuente: U.S. Geological Survey (Highland, 2004), Fig. 1.



Ilustración 2. Ejemplo de deslizamiento/earthflow en La Conchita (California, EE. UU.). Fuente: U.S. Geological Survey (Highland, 2004), fotografía de R.L. Schuster (USGS)

3.1.1 Marco de clasificación

El sistema de clasificación de deslizamientos es el derivado de Varnes (1978) y su consolidación en Cruden y Varnes (1996), donde se clasifican por:

1. Tipo de movimiento (criterio principal).
2. Tipo de material (criterio secundario).

Según esto, existen cinco familias (Varnes, 1978) (Cruden, D. M y Varnes, D. J., 1996):

- Caídas (*falls*).
- Vuelcos (*topples*).
- Deslizamientos (*slides*).
- Extensiones laterales (*spreads*).
- Flujos (*flows*).

Tabla 1. Matriz tipo de movimiento × tipo de material (versión abreviada de Varnes, 1978). Fuente: U.S. Geological Survey (Highland, 2004), Fig. 2.

TYPE OF MOVEMENT		TYPE OF MATERIAL		
		BEDROCK	ENGINEERING SOILS	
			Predominantly coarse	Predominantly fine
FALLS		Rock fall	Debris fall	Earth fall
TOPPLES		Rock topple	Debris topple	Earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	Rock slide	Debris slide	Earth slide
	TRANSLATIONAL			
LATERAL SPREADS		Rock spread	Debris spread	Earth spread
FLOWS		Rock flow (deep creep)	Debris flow (soil creep)	Earth flow
COMPLEX Combination of two or more principal types of movement				

La actualización que proponen (Hungar, O.; Leroueil, S.; Picarelli, L., 2014) mantiene el sistema de clasificación, pero ajusta la terminología ofreciendo definiciones más acordes con la terminología geotécnica y geológica. Además, recomienda clasificar los casos con mecanismos combinados mediante terminología compuesta (ej. “*rotational slide-earthflow*”) para no tratar así “*complex*” como una categoría cerrada.

3.1.2 Tipologías principales por modo de movimiento

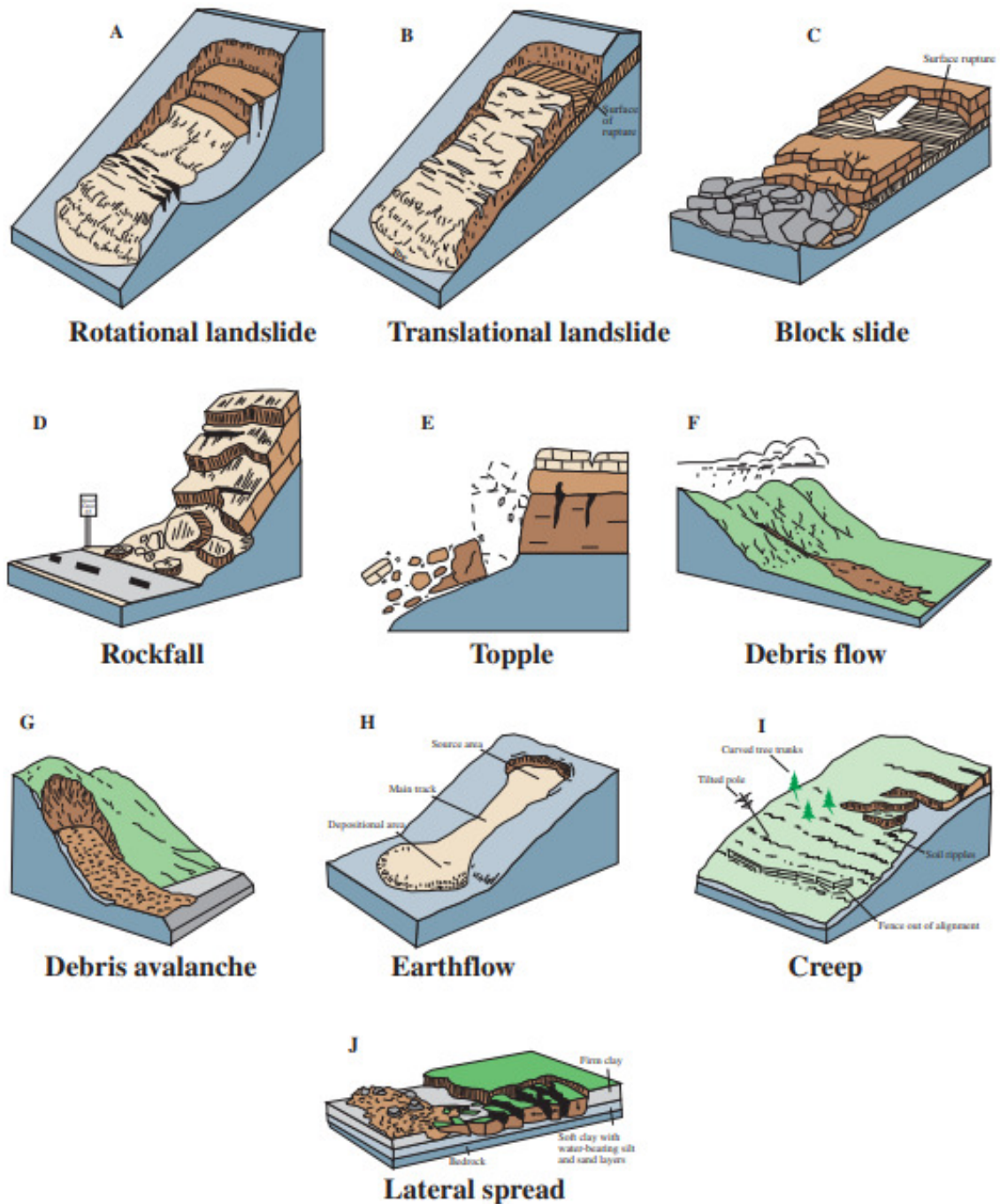


Ilustración 3. Esquemas de tipos principales de movimientos en ladera. Fuente: U.S. Geological Survey (Highland, 2004), Fig. 3

3.1.2.1 Caídas (Falls)

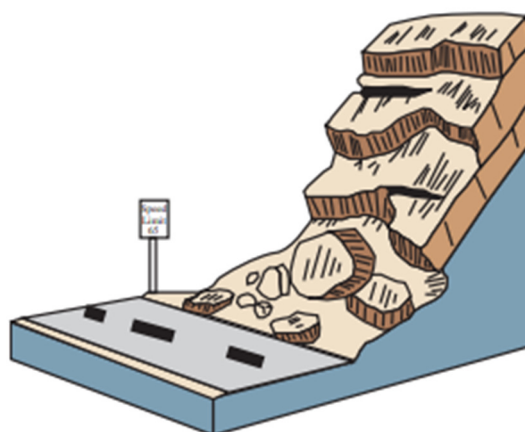
Separación desde un escarpe o talud muy inclinado con descenso por caída libre, rebote o rodadura. Suelen tener elevadas velocidad y energía de impacto (Highland, 2004).

Indicadores habituales:

- Cicatriz fresca en coronación y/o pérdida de bloques.
- Acumulación de bloques angulosos al pie y marcas de rebote o rodadura.
- Trayectorias dominadas por gravedad con posible fragmentación en el descenso.

La nomenclatura habitual es (Cruden, D. M y Varnes, D. J., 1996):

- *Rock fall* (caída de roca).
- *Debris fall* (caída de detritos).
- *Earth fall* (caída de tierra)



Rockfall

Ilustración 4. Fuente: U.S. Geological Survey (Highland, 2004), Fig. 3

La peligrosidad viene dada principalmente por la energía de impacto y su alcance. Las medidas habituales de mitigación suelen estar orientadas a la protección y control de las trayectorias (saneamiento, bulonado, mallas, bermas y barreras dinámicas) con definición previa de las zonas de caída y *runout* (Highland, L. M.; Bobrowsky, P., 2008).

3.1.2.2 Vuelcos (Topples)

Rotación hacia delante de un bloque o de un paquete de material, alrededor de un punto o eje situado en la base. Es habitual en macizos rocosos con discontinuidades (estratificación, diaclasas o fallas) que favorecen la inestabilidad por basculamiento (Cruden, D. M y Varnes, D. J., 1996) (Highland, 2004).

Es más habitual en roca (*rock topple*). El vuelco, en algunos casos, puede evolucionar a caída o a deslizamiento cuando se pierde el apoyo basal o cuando se produce una rotura adicional (Cruden, D. M y Varnes, D. J., 1996).

Son característicos los bloques inclinados hacia el vacío, grietas de tracción subparalelas a coronación y separación progresiva de columnas o lajas. En fotogrametría, pueden verse alineaciones de grietas y escalones asociados a la rotación de los bloques (Highland, L. M.; Bobrowsky, P., 2008).

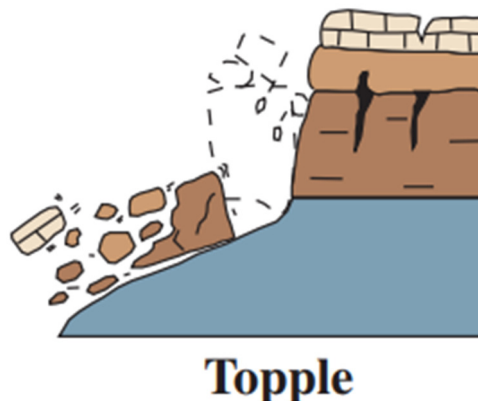


Ilustración 5. Fuente: U.S. Geological Survey (Highland, 2004), Fig. 3

Se debe realizar un control geológico-estructural (Highland, L. M.; Bobrowsky, P., 2008):

- Orientación de discontinuidades.
- Meteorización.
- Socavación del pie.
- Presiones de agua en fracturas.
- La estabilización debe combinar drenaje y soluciones estructurales (anclajes, bulones) más protección frente a caídas secundarias.

3.1.2.3 Deslizamientos (Slides)

Desplazamiento de una masa sobre una superficie de cizalla relativamente bien definida (que separa el material movido del estrato más estable). Se clasifican, según la geometría de la superficie de rotura en rotacional / (curva) o traslacional (aproximadamente planar) (Cruden, D. M y Varnes, D. J., 1996).

Se pueden definir varios subtipos según el material: deslizamiento de roca (*rock slide*), de detritos (*debris slide*) o de tierra (*earth slide*) (Highland, 2004).

En deslizamientos rotacionales son frecuentes el escarpe principal curvo, terrazas internas, bloques “hacia atrás” en cabecera y abombamiento del pie. En traslacionales se pueden observar cicatrices más rectilíneas y masas relativamente coherentes con control por planos estructurales o estratificados (Highland, L. M.; Bobrowsky, P., 2008).

Los deslizamientos están conectados directamente con el análisis de estabilidad y son muy sensibles a la variación de la presión intersticial, cambios de carga, excavaciones y erosión del pie. La identificación de superficies potenciales y el control del agua son elementos principales del diseño (Cruden, D. M y Varnes, D. J., 1996) (Highland, L. M.; Bobrowsky, P., 2008).

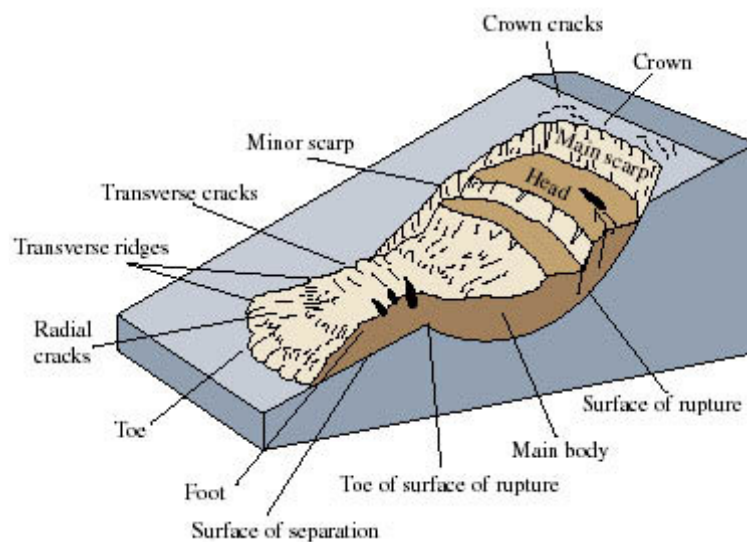


Ilustración 6. Ejemplo de deslizamiento rotacional que puede evolucionar a flujo de tierra (*slump-earthflow*). Fuente: USGS, Highland (2004)

3.1.2.4 Extensiones laterales (Lateral spreads)

Se caracterizan por una deformación dominada por extensión y fracturación con desplazamientos laterales. Se pueden dar en pendientes suaves o terrenos prácticamente llanos y están asociados a la pérdida de resistencia en un estrato subyacente, principalmente por licuefacción en materiales sueltos (Highland, 2004) (Highland, L. M.; Bobrowsky, P., 2008).

Existen subtipos en función del material dominante (*rock spread*, *earth spread* o *debris spread*), aunque el mecanismo de debilitamiento basal, como puede ser la licuefacción, puede ser la clave para su interpretación (Highland, 2004).

Es común que se observen grietas de tracción, escalones y bloques separados que se desplazan lateralmente. En planta, la deformación suele ser extensa y afectar a grandes superficies (Highland, L. M.; Bobrowsky, P., 2008).

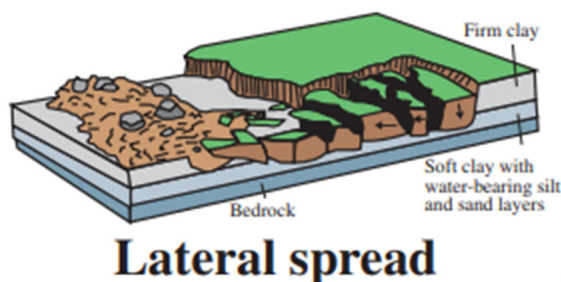


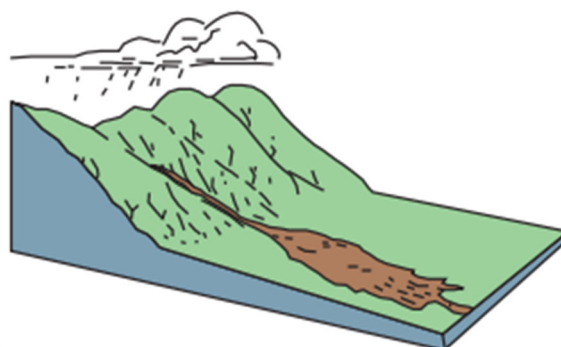
Ilustración 7. Fuente: U.S. Geological Survey (Highland, 2004), Fig. 3

Las medidas se orientan a mejorar el terreno, controlar las filtraciones de agua y cimentación o contención (Highland, L. M.; Bobrowsky, P., 2008).

3.1.2.5 Flujos (Flows)

La deformación interna es distribuida y el material se comporta como un fluido viscoso. Suelen existir múltiples superficies de cizalla, ser efímeras o no quedar preservadas. Pueden existir tipologías entre *Slides* y *Flows*, pasando de un tipo a otro en función de las condiciones (ej: contenido de agua) (Cruden, D. M y Varnes, D. J., 1996) (Highland, 2004).

Existen subtipo en función del material (*debris flow*, *earth flow* y *mudflow* (flujo de lodo) y su denominación se basa en el material dominante y la movilidad. Es frecuente su canalización por vaguadas y cauces (Highland, L. M.; Bobrowsky, P., 2008).



Debris flow

Ilustración 8. Ilustración 7. Fuente: U.S. Geological Survey (Highland, 2004), Fig. 3

Se pueden observar lenguas, depósitos lobulados y en algunos casos *levées* laterales. La mezcla de suele ser heterométrica y el agua condiciona la movilidad. La huella puede seguir redes de drenaje (Highland, L. M.; Bobrowsky, P., 2008).

Debido a su velocidad y alcance, suele ser necesaria la zonificación del *runout*, el control de escorrentías y medidas de protección como diques o cuencos de retención. También es aconsejable ocuparse de la ordenación del territorio (Highland, L. M.; Bobrowsky, P., 2008).

3.1.2.6 Movimientos compuestos y transicionales

En la práctica, la mayoría de los casos se combinan o evolucionan por fases. La clasificación actualizada de Hungr, Leroueil y Picarlli (2014) recomienda describir estos casos mediante combinaciones (ej: *slump-earthflow*) y evitar tratar “*complex*” como una categoría cerrada cuando el fenómeno se puede describir de una manera más clara como una secuencia de fenómenos.

3.1.3 Tipología por material y nomenclatura práctica

En inventarios y documentos técnicos, se construye el nombre tipológico como:

[material dominante] + [tipo de movimiento]. Este enfoque es consistente con la matriz material-movimiento de Varnes y Crudes-Varnes (Varnes, 1978) (Cruden, D. M y Varnes, D. J., 1996).

3.1.4 Descriptores complementarios (peligro y comportamiento)

3.1.4.1 Actividad

Para homogeneizar la caracterización del movimiento, la WP/WLI (UNESCO) propone describir el fenómeno en tres dimensiones: estado, distribución y estilo (UNESCO WP/WLI, 1993). Esta estructura aporta consistencia a los inventarios y seguimientos y diagnóstico de reactivaciones.

3.1.4.2 Velocidad

La IUGS *Working Group on Landslides* propone velocidades desde “extremadamente lenta” (< 16 mm/año) hasta “extremadamente rápida” (> 5 m/s). La velocidad se relaciona con el potencial de daño (IUGS/WG, 1995)

3.1.5 Esquema de decisión para clasificar un caso

Paso 1. Identificar el material dominante:

- Roca (rock): masa originalmente intacta, control por discontinuidades.
- Tierra (*earth*): suelos con predominio de finos y comportamiento cohesivo/plástico.
- Detritos (*debris*): mezcla con predominio de fracción gruesa (gravas/bloques).

Paso 2. Identificar el tipo de movimiento dominante:

- Caída.
- Vuelco.
- Deslizamiento.
- Extensión lateral.
- Flujo.

Paso 3. Asignar el nombre tipológico:

- [material] + [movimiento] y, si aplica, tipo compuesto (p. ej., *rotational slide– earthflow*).

Paso 4. Añadir descriptores de actividad y velocidad:

- Actividad: estado, distribución y estilo (UNESCO WP/WLI, 1993).
- Velocidad: clase normalizada (IUGS/WG, 1995).

3.1.6 Guía rápida de diagnóstico (observables → tipología probable)

Tabla 2. Guía rápida de diagnóstico (observables - tipología probable)

Observable principal (campo / fotointerpretación / MDT)	Interpretación cinemática	Tipología probable
Escarpe muy vertical; bloques angulosos al pie; marcas de rebote	Movimiento por caída/rodadura	<i>Rock fall / Debris fall</i> (Highland, 2004)
Bloques basculados; grietas detrás de coronación; columnas inclinadas	Rotación alrededor de eje/pivote	<i>Topple</i> (Cruden, D. M y Varnes, D. J., 1996)
Escarpe curvo; terrazas internas; abombamiento en pie	Superficie curva con rotación	<i>Rotational slide / slump</i> (Highland, 2004)
Escarpe rectilíneo; masa coherente; control por planos/estratos	Superficie planar/subplanar	<i>Translational slide</i> (Cruden, D. M y Varnes, D. J., 1996)
Pendiente suave; grandes grietas; desplazamiento lateral; daños lineales	Extensión lateral (a menudo por debilitamiento basal)	<i>Lateral spread</i> (Highland, L. M.; Bobrowsky, P., 2008)
Lenguas/canales; levées; depósitos lobulados; alta movilidad	Deformación interna tipo fluido	<i>Debris flow / Earthflow</i> (Highland, 2004)

Nota: La tabla sintetiza rasgos diagnósticos. El fenómeno real puede ser compuesto o transicional (Hungry, O.; Leroueil, S.; Picarelli, L., 2014)

La denominación final debe acompañarse, cuando sea relevante, de descriptores de actividad y velocidad para mejorar la trazabilidad del peligro y la comparabilidad entre casos (UNESCO WP/WLI, 1993) (IUGS/WG, 1995).

3.2 TIPOLOGÍAS DE PRESAS

Existen diferentes métodos de clasificar las presas. Los más utilizados son:

- Por material y tipología estructural: presas de hormigón/mampostería (gravedad, arco, contrafuertes) y presas de materiales sueltos (tierra, escollera) (ICOLD, s. f.)
- Por función y explotación: abastecimiento, riego, energía hidroeléctrica, laminación de avenidas, recreo/navegación, control de sedimentos, etc (ICOLD, s. f.).
- Por método constructivo: hormigón en masa, hormigón compactado con rodillo (RCC), terraplén zonificado u homogéneo, escollera, etc. (ICOLD, s. f.) (USACE, 2000).
- Por impermeabilización y control de filtraciones (*embankment*): núcleo de arcilla, núcleo inclinado aguas arriba, pantallas (hormigón/asfalto) o soluciones compuestas (USACE, 2004) (Serrano).
- Por impacto potencial (seguridad): por consecuencias de fallo o mal funcionamiento (FEMA, 2004).

3.2.1 Tipologías por material y tipología estructural

3.2.1.1 Presas de hormigón o mampostería

Las presas de hormigón, mampostería o fábrica se caracterizan por una alta rigidez, baja deformabilidad y transferencia de esfuerzos por compresión. Tres tipologías principales (ICOLD, s. f.):

- Presas de gravedad.
- Presas de arco.
- Presas de contrafuertes

Existe un cuarto tipo, intermedio entre gravedad y arco, denominadas arco-gravedad.

Presas de gravedad:

Resiste el empuje del agua fundamentalmente por su propio peso. Suelen necesitar cimentaciones competentes y control del levantamiento (*uplift*) y estabilidad al deslizamiento y vuelco. Pueden ejecutarse con hormigón en más o mediante hormigón compactado con rodillo (RCC) (ICOLD, s. f.).

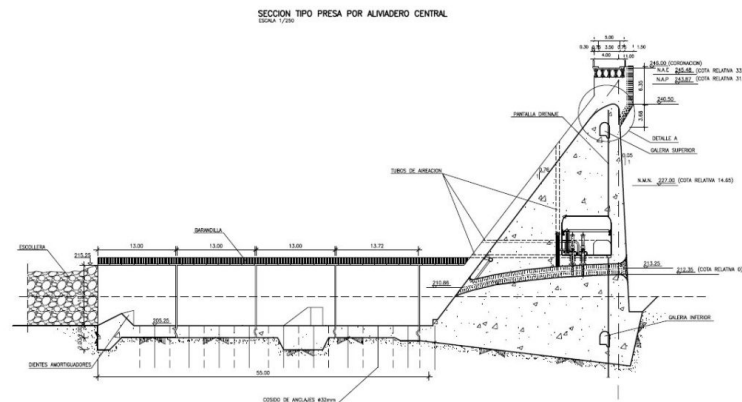


Ilustración 9. Sección típica de la presa de la Rambla del Judío. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura a través de www.eselagua.com

Presas de arco:

Estructura curvada aguas arriba que transmite la carga hidrostática hacia los estribos. Adecuada en cerradas estrechas, exigiendo macizos rocosos competentes.

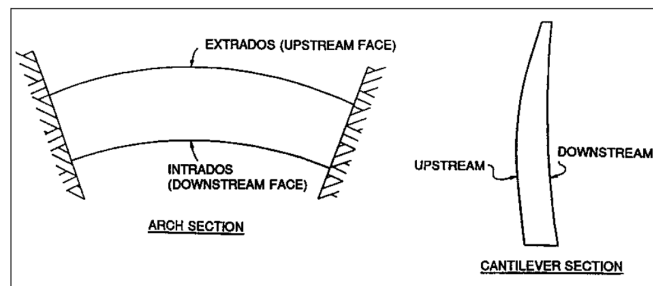


Ilustración 10. Esquema conceptual de sección en arco y sección en ménsula (presas de arco). Fuente: USACE (1994) EM 1110-2-2201, Fig. 1-1

El manual del USACE acota su ámbito a configuraciones con geometría definida mediante arcos circulares y/o tramos rectos combinados en secciones horizontales y verticales (USACE, 1994)

Presas de arco-gravedad:

Tipo de presa intermedia entre gravedad y presa de arco. Posee un espesor y peso significativo (gravedad) pero incorpora curvatura en planta de forma que una parte del empuje hidrostático se transmite a los estribos (arco). Se emplea cuando la cerrada es relativamente estrecha y existen estribos rocosos competentes, pero se requiere una solución más robusta que una bóveda pura por las posibles incertidumbres del macizo rocoso (ICOLD, s. f.).



Ilustración 11. Presa de Monte Aragón (Huesca). Fuente: Elaboración propia

Presas de contrafuertes:

La presa posee una serie de elementos resistente (contrafuertes) en el paramento de aguas abajo que sostienen una pantalla de aguas arriba (losa, arcos múltiples, cúpulas, etc.). Reducen el volumen de hormigón respecto a las presas de gravedad, pero con una mayor complejidad geométrica y de

detalles constructivos. En el análisis de riesgo, el USBR define este tipo de presas como estructuras con dos características básicas: barrera impermeable aguas arriba y contrafuertes (USBR, 2019)

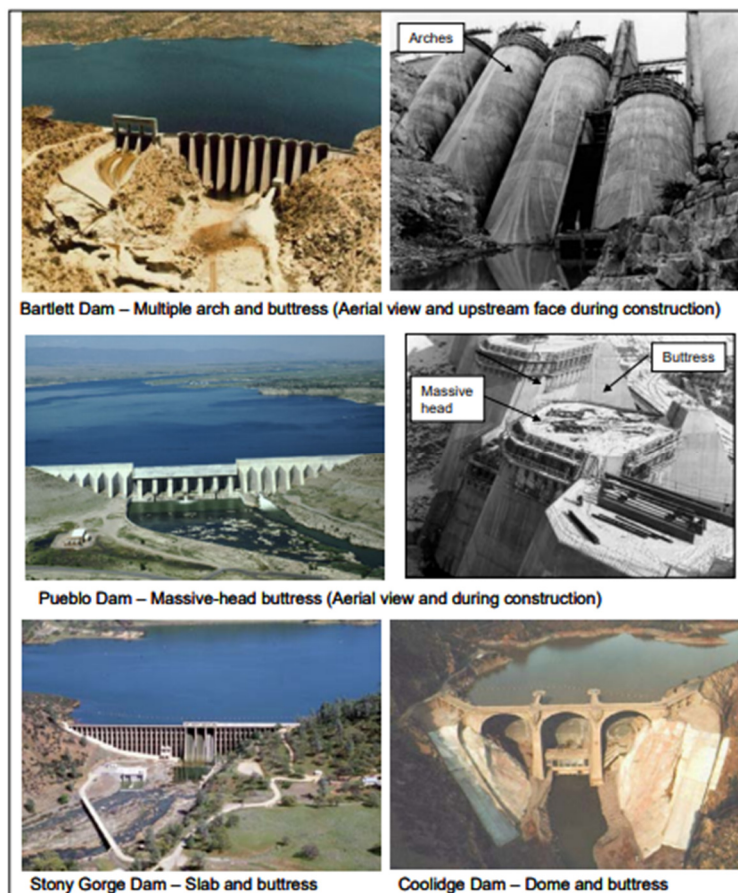


Ilustración 12. Ejemplos representativos de presas de contrafuertes (variantes y modificaciones). Fuente: USBR y USACE (2019), *Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis*, Cap. E-5, Fig. E-5-

3.2.1.2 Presas de materiales sueltos

Este tipo de presas se ejecutan con suelos o escolleras compactadas. Su estructura se basa en la estabilidad por rozamiento y el control de las filtraciones mediante núcleos, pantallas y filtros. Según ICOLD, el 75% de las presas existentes en el mundo son de esta tipología, en gran medida por la disponibilidad de materiales y su competitividad en grandes secciones (ICOLD, s. f.).

Presas de tierra:

Estas presas pueden ser homogéneas (un único material con drenajes y filtros) o zonificadas (materiales diferenciados para núcleo, espaldones, filtros y drenajes). En presas zonificadas, el

USACE identifica dos esquemas de zonificación impermeable: núcleo central impermeable y núcleo inclinado aguas arriba, complementados con filtros y drenajes para asegurar su integridad frente al *piping* y la erosión interna (USACE, 2004).

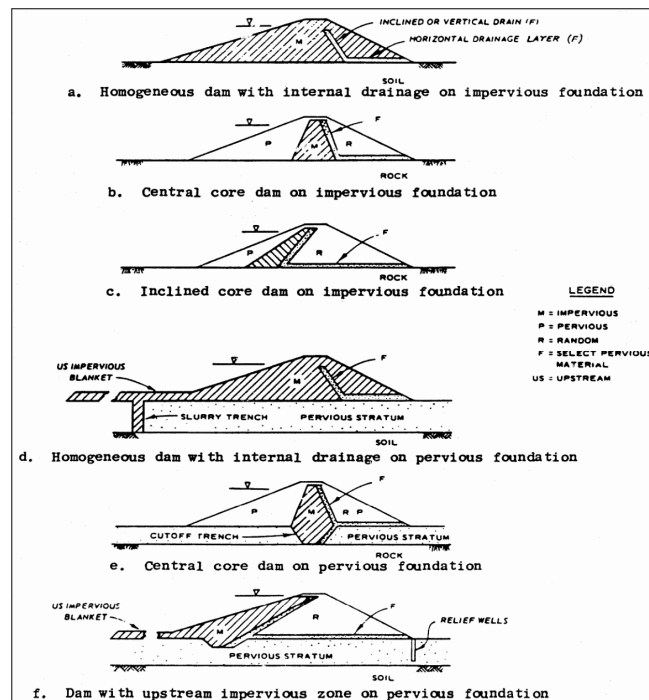


Ilustración 13. Secciones típicas de presas de tierra (homogéneas y con núcleo). Fuente: USACE (2004), EM 1110-2-2300, Fig. 2-1

Presas de escollera con núcleo o pantalla:

El relleno de roca aporta resistencia y buen comportamiento en cimentaciones deformables. La impermeabilización se consigue por medio de un núcleo o mediante una pantalla aguas arriba. Un caso especial es la presa con relleno de roca con pantalla de hormigón (CFRD) (Serrano).

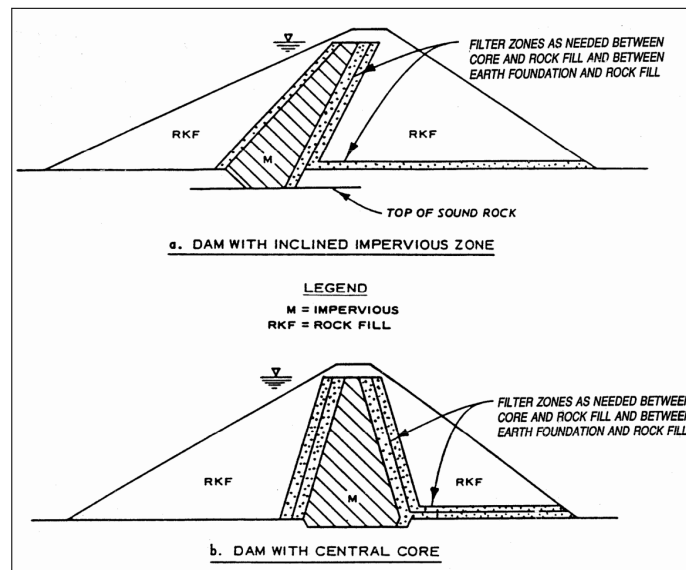


Ilustración 14. Días configuraciones típicas de presas de enrocamiento (zona impermeable inclinada y núcleo central). Fuente: USACE (2004), EM 1110-2-2300, Fig. 2-2

3.2.1.3 Tipologías especiales

Existen otras estructuras de contención con objetivos específicos. Cabe destacar los diques de almacenamiento de estériles (*tailing storage facilities* (TSF)) en minería, que son básicamente presas de materiales sueltos que se elevan progresivamente. La guía SGU (Suecia) define tres formas de recrecimiento: aguas arriba, aguas abajo y por el eje (SGU, s. f.).

3.2.2 Tipologías por método constructivo

El método constructivo condiciona planificación, costos, control de calidad y comportamiento de la presa a largo plazo.

En presas de hormigón destacan las de hormigón compactado con rodillo (RCC), empleándose mayormente en presas de gravedad por rapidez de ejecución y menor consumo de cemento respecto a otro tipo de hormigones convencionales. El manual EM 1110-2-2006 del USACE adopta la definición del ACI: hormigón compactado mediante rodillo en fresco, capaz de soportar el rodillo durante la compactación (USACE, 2000).

3.2.3 Clasificación normativa y de seguridad

3.2.3.1 Referencias en España: normas técnicas de seguridad

El Real Decreto 264/2021, de 13 de abril, por el que se aprueban las normas técnicas de seguridad para las presas y sus embalses, establece, entre otros aspectos el concepto de “Gran Presa” y un sistema de categorización por riesgo potencial (Categorías A, B y C) en función de las consecuencias asociadas a un eventual fallo (España, 2021).

3.2.3.2 Clasificación por potencial de daños (enfoque internacional)

Las guías federales de EE.UU. (FEMA 333) proponen una clasificación del daño potencial (*Hazard potential*) basada en las consecuencias de un fallo o mal funcionamiento. La categoría “alta” se asocia a pérdida probable de vidas humanas, mientras que la categoría “significativa” no implica pérdida de vidas humanas, pero si presencia de daños económicos, ambientales o afecciones a infraestructuras importantes (FEMA, 2004).

Tabla 3. Tabla de clasificación del potencial de daño (hazard potential) para presas. Fuente: FEMA (2004), *Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification System for Dams*, Tabla de clasificación (p. 6)

Hazard Potential Classification	Loss of Human Life	Economic, Environmental, Lifeline Losses
Low	None expected	Low and generally limited to owner
Significant	None expected	Yes
High	Probable. One or more expected	Yes (but not necessary for this classification)

3.2.4 Tabla comparativa de tipologías (resumen)

Tabla 4. Comparativa cualitativa de tipologías de presas (material–mecanismo–condicionantes). Elaboración propia

Tipología	Material principal	Mecanismo resistente (resumen)	Ventajas típicas	Limitaciones / requisitos	Usos frecuentes
Gravedad (hormigón en masa)	Hormigón / fábrica	Estabilidad por peso propio; esfuerzos dominantes de compresión.	Robustez; facilidad relativa de modelización; adecuada para valles anchos.	Gran volumen; cimentación competente; control de levantamiento y juntas.	Regulación, laminación, usos múltiples.
Gravedad (RCC)	RCC	Idem presa de gravedad;	Rapidez; reducción de	Requiere control estricto de juntas	Regulación; rehabilitación/sustituc

Tipología	Material principal	Mecanismo resistente (resumen)	Ventajas típicas	Limitaciones / requisitos	Usos frecuentes
		construcción por tongadas compactadas.	costos; menor calor de hidratación (según dosificación).	de construcción y compactación.	ión de estructuras hidráulicas.
Arco	Hormigón	Transferencia de empujes a estribos; compresión en el arco.	Menor volumen de hormigón; idónea en cañones estrechos.	Necesita estribos y cimentación rocosos; geometría y análisis exigentes.	Regulación e hidroeléctrica en valles encajados.
Contrafuertes	Hormigón armado / mixto	Pantalla aguas arriba apoyada en contrafuertes.	Ahorro de hormigón frente a gravedad; menor empuje en cimentación.	Detalles constructivos complejos; sensibilidad a acciones transversales (sismo).	Salto hidráulicos, presas medias, rehabilitaciones puntuales.
Tierra zonificada	Suelos (arcillas, arenas, gravas)	Estabilidad por rozamiento; impermeabilización por núcleo (central o inclinado) + filtros/drenajes.	Aprovecha materiales locales; buena respuesta deformacional.	Control de filtraciones crítico; sensibilidad a erosión interna si mal diseñada.	Regulación, riego, laminación.
Escollera compactada con núcleo	Escollera compactada + núcleo de tierra	Espaldones de escollera resistentes; núcleo impermeable interno.	Alta resistencia; buen comportamiento sísmico relativo.	Mayor complejidad de filtros/transiciones; necesidad de materiales adecuados.	Regulación e hidroeléctrica.
CFRD (pantalla de hormigón)	Escollera + losa de hormigón aguas arriba	Impermeabilización por losa; estabilidad por escollera compactada.	Secciones competitivas; ejecución rápida de relleno; baja necesidad de núcleo arcilloso.	Sensibilidad a asientos diferenciales; detalle de juntas y plinto (<i>plinth</i>) determinantes.	Grandes alturas; regulación e hidroeléctrica.
TSF (dique de estériles)	Terraplén (suelos/escollera) + estériles	Estructura de contención con recrecimientos sucesivos.	Flexibilidad de crecimiento por fases.	Riesgos elevados si control geotécnico deficiente; interacción con lodos y drenaje.	Almacenamiento de residuos mineros.

Tabla 5. Clasificación de potencial de daños (hazard potential) según FEMA 333. (FEMA, 2004)

Clase	Pérdida probable de vidas	Daños económicos/ambientales y afectación a "lifelines"
Baja	No esperada	Baja; generalmente limitada a la propiedad del titular.
Significante	No esperada	Sí: pérdidas económicas, daño ambiental y/o disrupción de infraestructuras críticas.
Alta	Probable (una o más)	Sí (no necesariamente para asignar la categoría).

3.3 GEOLOGÍA, GEOTECNIA E HIDROLOGÍA

3.3.1 Condicionantes geológicos

3.3.1.1 Litología, alteración y heterogeneidad

Le grado de alteración y la litología condicionan la deformabilidad y resistencia de un macizo. En suelos, y depósitos coluviales/aluviales, la presencia de estratos con finos (limos y arcillas) y contactos estratigráficos pueden llegar a favorecer superficies de deslizamiento con respuestas muy sensibles a cambios de presión intersticial. En roca, la estabilidad está gobernada por las discontinuidades (estratificación, diaclasas, fallas, etc.) y su orientación respecto del talud, con lo que se favorecen mecanismos planares, en cuña o de vuelco (AYALA CARCEDO, y otros, 2006) (DUNCAN, et al., 2014).

3.3.1.2 Estructura geológica y geometría de los estratos

La posibilidad de deslizamientos traslacionales y la cinemática del movimiento es controlada por la orientación de los estratos y las discontinuidades respecto al talud. También es habitual que cuando existe una superficie heredada debilitada con resistencia residual inferior a la resistencia pico se reactiven deslizamientos antiguos (SKEMPTON, et al., 1969).

3.3.1.3 Geomorfología y evolución del valle

En embalses es frecuente que exista interacción entre la propia morfología del vale, los depósitos fluviales previos, la sedimentación reciente y los procesos erosivos en el pie de la ladera. Todos estos factores influyen en la estratigrafía, la permeabilidad y la distribución de las presiones intersticiales, aspectos que son cruciales en la estabilidad del talud (SCHUSTER, 1979) (AYALA CARCEDO, y otros, 2006).

3.3.2 Comportamiento geotécnico y mecanismos de rotura

3.3.2.1 Resistencia al corte y selección de parámetros

La definición de parámetros de resistencia apropiados al material y al estado del drenaje con siempre necesarios en el análisis de estabilidad. En suelos y macizos alterados se usan parámetros como son la cohesión efectiva (c') y el ángulo de rozamiento interno efectivo (ϕ'), para condiciones drenadas a largo plazo y la resistencia no drenada (S_u) en procesos donde no hay disipación de presiones intersticiales durante la movilización (DUNCAN, et al., 2014) (ABRAMSON, et al., 2001). La diferencia entre resistencia pico y residual en deslizamientos reactivados puede llegar a ser determinante en deslizamientos reactivados (SKEMPTON, et al., 1969).

3.3.2.2 Drenaje, consolidación y tiempos característicos

La comparación entre la velocidad del proceso y la capacidad de drenaje del terreno es importante porque de ella depende la elección entre hipótesis drenada o no drenada. En materiales finos y poco permeables, los cambios de carga hidráulica, como puede ser la variación en el nivel del embalse, pueden generar respuestas transitorias. La auscultación piezométrica es primordial para interpretar el régimen real (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2003) (DUNCAN, et al., 2014).

3.3.2.3 Rotura progresiva y superficies heredadas

En laderas naturales, lo más habitual es que la rotura se desarrolle de manera progresiva, con localización gradual de deformaciones y evolución hacia la superficie de rotura. La relación entre estructura geológica, evidencias geomorfológicas, ensayos y auscultación es importante para construir un modelo de comportamiento consistente (SKEMPTON, et al., 1969).

3.3.3 Métodos de análisis de estabilidad

3.3.3.1 Equilibrio límite y factor de seguridad

El método de equilibrio límite (LEM) es la herramienta más utilizada para evaluar la estabilidad de taludes ya que permite estimar factores de seguridad para diferentes superficies de rotura y escenarios de carga. Para su aplicación es necesaria una caracterización geotécnica adecuada y una representación correcta y realista de las presiones intersticiales (mediante piezometría o mediante modelos de filtración) (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2003) (DUNCAN, et al., 2014).

3.3.3.2 Incertidumbre, sensibilidad y enfoques probabilísticos

Diferentes guías técnicas destacan que el factor de seguridad debe interpretarse junto a la incertidumbre de los parámetros y la consecuencia del fallo. Es recomendable hacer un análisis de sensibilidad y enfoques probabilísticos (cuando proceda) para cuantificar la variabilidad de la estabilidad y apoyar las decisiones de la gestión del riesgo (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2003) (FELL, et al., 2008).

3.3.3.3 Modelos numéricos como complemento

Métodos numéricos como pueden ser elementos o diferencias finitos pueden resultar muy útiles cuando la geometría es muy compleja, hay una heterogeneidad estratificada o acoplamiento hidromecánico. Estos métodos aportan información sobre deformaciones y redistribución de tensiones, complementando el método de equilibrio límite (LEM). También requieren un mayor trabajo de calibración y validación (DUNCAN, et al., 2014) (ABRAMSON, et al., 2001).

Tabla 6. Condicionantes geológicos e hidrogeológicos y su traducción a variables geotécnicas (síntesis a partir de (SCHUSTER, 1979), (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2003), (Highland, L. M.; Bobrowsky, P., 2008), (AYALA CARCEDO, y otros, 2006) y (DUNCAN, et al., 2014).

Condicionante	Efecto esperado en la estabilidad	Variables/observables recomendados
Niveles finos (arcillas/limos), contactos estratigráficos	Favorecen superficies de rotura y reducción de resistencia con saturación	c' , ϕ' (o S_u), límites de Atterberg, k ; inclinometría para profundidad activa
Discontinuidades en roca (estratos, diaclasas, fallas)	Control cinemático (planar, cuña, vuelco)	Orientación y persistencia; RQD/RMR/GSI según proceda; mapeo estructural
Elevación del nivel del embalse	Aumento de u y de peso; posible reactivación	Piezometría; correlación con nivel del embalse; deformación incremental
Descenso rápido del embalse	u interna alta con menor contención exterior (escenario crítico)	Escenarios de <i>rapid drawdown</i> en cálculo; piezometría transitoria
Erosión o socavación en el pie	Pérdida de soporte y aumento de pendientes locales	Seguimiento geométrico; inspecciones; topografía y batimetría si aplica

3.3.4 Hidrogeología. Influencia del agua y del embalse

3.3.4.1 Nivel freático, presión intersticial y tensiones efectivas

En la gran mayoría de los deslizamientos, el agua es un factor desestabilizador ya que aumenta la presión intersticial (u), reduce las tensiones efectivas y por lo tanto disminuye la resistencia al corte. Esta relación es interpretada mediante el principio de tensiones efectivas y el criterio de Mohr-Coulomb en términos efectivos (TERZAGHI, et al., 1996) (DUNCAN, et al., 2014).

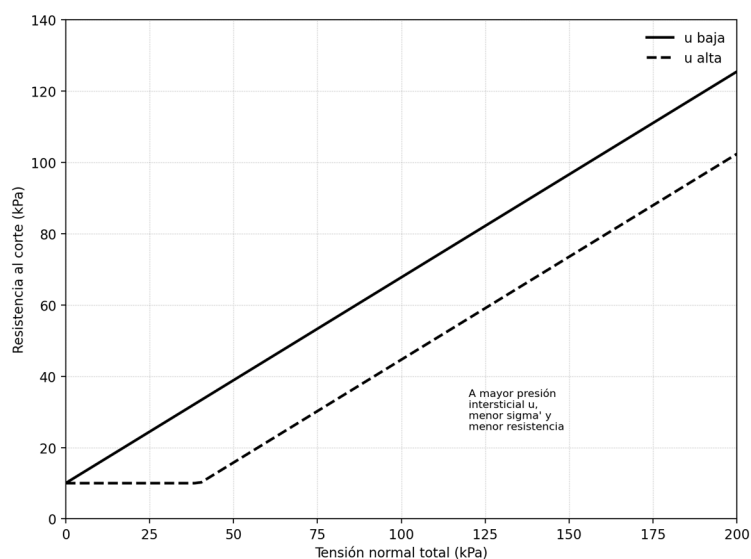


Ilustración 15. Influencia conceptual de la presión intersticial en la resistencia al corte (tensiones efectivas). Basado en (TERZAGHI, et al., 1996) y (DUNCAN, et al., 2014)

3.3.4.2 Fluctuaciones del embalse y escenarios críticos

Existe bibliografía que habla que los embalses pueden llevar a inducir o reactivar movimientos por elevación del nivel freático, filtración de agua en el talud y cambios en el gradiente hidráulico, especialmente en ciclos de llenado y vaciado (SCHUSTER, 1979). El descenso rápido de nivel del embalse (*rapid drawdown*) es un escenario especialmente crítico ya que el nivel exterior desciende más rápido de lo que drena el interior del talud, manteniendo presiones elevadas en el terreno mientras que se reduce la contención exterior. Varias guías tratan este caso como una combinación específica y recomiendan hacer verificaciones propias (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2003).

3.3.4.3 Suelos parcialmente saturados y succión

En suelos no saturados puede llegar a existir succión (presiones negativas), con lo que se aumenta la resistencia aparente. Sin embargo, este efecto se puede perder rápidamente por infiltración de lluvia o cambios del régimen hidráulico. Por este motivo, se recomienda ser prudente en el análisis de la seguridad al considerar contribuciones estabilizadoras por succión si no se encuentran bien caracterizadas (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2003) (DUNCAN, et al., 2014).

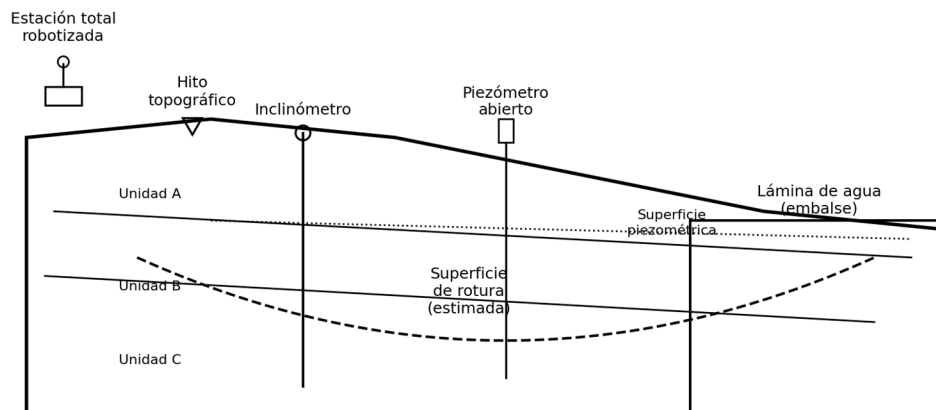


Ilustración 16. Esquema conceptual de ladera en cola de embalse con superficie de rotura e instrumentación (inclínómetro, piezómetro abierto y control topográfico). Basado en criterios de observación y modelización de estabilidad de taludes (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2003) y en discusiones sobre laderas inducidas por embalses (SCHUSTER, 1979)

3.3.5 Implicaciones para la metodología BIM y la auscultación

El modelo BIM centralizado puede actuar como repositorio de geometría, estratigrafía, hipótesis y resultados, independientemente de que el cálculo geotécnico se realice con herramientas específicas. Conviene estructurar el deslizamiento como un conjunto de objetos (unidades geotécnicas, superficie de rotura, instrumentación, etc.) con propiedades y vínculos a series temporales, ensayos y escenarios de cálculo (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2003) (FELL, et al., 2008).

Además de servir como repositorio de geometría, en la metodología BIM se debe gestionar la información con un flujo controlado:

- Definir qué información se necesita.
- Cuando y quien proporciona esa información.
- Nivel de detalle de la información.

La ISO 19650 contempla este enfoque para todo el ciclo de vida del activo, con el apoyo de un CDE (Entorno Común de Datos) para controlar:

- Los estados.
- Revisiones.
- Aprobaciones.
- Trazabilidad.

En el ámbito AECO, más particularmente en el infraestructuras hidráulicas, esta gobernanza es extrapolable a un deslizamiento en la cola de un embalse porque puede separar con claridad:

1. El modelo de referencia (topografía, estratigrafía, instrumentación).
2. Las evidencias (campañas, informes, ensayos, nubes de puntos, fotografías).
3. Los resultados (calibraciones, escenarios, umbrales, alertas).

Una manera práctica de “bajar” BIM a un programa de auscultación es estructurar el cambio de información con unos requisitos que sean verificables: usar openBIM/IFC como formato de intercambio y definir los requisitos de entrega mediante IDS (*Information Delivery Specification*), con lo que podemos comprobar automáticamente si el IFC contiene los objetos y las propiedades exigidas (identificadores, unidades, metadatos, etc).

Para las series temporales, es habitual mantener el modelo BIM “ligero” y enlazar con una base de datos que contenga las observaciones. En este punto encaja bien un patrón del tipo *OGC Sensor Things API*, donde cada instrumento se modela como “*Thin/Sensor*” y cada lectura como “*Observation*”, de forma que el modelo BIM queda como el mapa (índice espacial) y la base de datos como el histórico completo.

Algunos casos de éxito muestran que este enfoque ya se está aplicando en presas y en activos hidráulicos:

- a. LA Confederación hidrográfica del Guadiana impulsó la digitalización de un conjunto de presas, apoyándose en escaneo láser (TLS) y drones para obtener nubes de puntos y fotografías 360º.
- b. Implantación de gemelo digital para operación y mantenimiento de presas (Ej. Presa de Triano).
- c. Actualmente se encuentra en vigor el **“Contrato de servicios para el desarrollo, coordinación, implementación y formación de la metodología BIM en las presas estatales, en el Marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR)”**. En este contrato se están realizando modelos BIM de más de 50 de presas en todo el territorio nacional.

Por su parte, la empresa OFITECO posee una plataforma denominada *Dam-Data*, la cual se presenta como una solución que cubre el ciclo completo del dato (captura-gestión-evaluación-decisión), lo

que equivale conceptualmente al modelo digital que se persigue con el BIM cuando se integra instrumentación analítica.

Tabla 7. Parámetros geotécnicos y su relación con el análisis y la instrumentación (síntesis a partir de (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2003), (TERZAGHI, et al., 1996), (DUNCAN, et al., 2014) y (ABRAMSON, et al., 2001).

Parámetro / variable	Uso en el análisis	Obtención habitual	Relación con auscultación
c', ϕ'	Resistencia al corte drenada (largo plazo)	Ensayos triaxiales/corte directo; correlaciones con SPT/CPT donde proceda	Cambios de FS correlacionables con u y deformación
S_u	Resistencia no drenada (corto plazo/transitorio)	Vane test, triaxial UU, correlaciones con plasticidad	Útil en interpretaciones de respuesta rápida a cargas
k (permeabilidad)	Filtración, disipación de u , escenarios de <i>drawdown</i>	Ensayos in situ/laboratorio; back-analysis	Coherencia con piezometría temporal
u / nivel piezométrico	Tensiones efectivas y estabilidad	Piezómetros abiertos o de cuerda vibrante	Serie temporal; clave para correlación con movimientos
Desplazamientos y deformaciones	Calibración/validación del modelo; identificación de profundidad activa	Inclinometría; control topográfico/estación total	Detección de aceleraciones, cambios de cinemática y zonas activas

3.4 AUSCULTACIÓN

Con la auscultación de laderas inestables en el vaso de un embalse se persigue caracterizar el movimiento de esta, identificar los condicionantes y desencadenantes (especialmente la presión intersticial, su relación con las precipitaciones y las variaciones del nivel del embalse), y proporcionar criterios operacionales para la gestión de los riesgos asociados (umbrales, alarmas, protocolos). El valor de un sistema depende tanto de los sensores empleados como de la planificación, las mediciones, el control de calidad y la correcta y sistemática interpretación de las series temporales. (DUNNICLIFF, 1993) (DUNNICLIFF, 1998).

Con la modelización y gestión de la información en un modelo BIM se consigue evolucionar hacia un gemelo digital del deslizamiento, un modelo que integrará geometría, estratigrafía, instrumentación y series temporales, con control de versiones, responsabilidades y trazabilidad, según la ISO 19650 (ISO, 2018a) (ISO, 2018b).

Tabla 8. Resumen de técnicas de auscultación consideradas y variable principal

Técnica	Dominio	Variable(s) principal(es)	Aporte al modelo del deslizamiento
DGNSS/RTK	Superficial	Posición 3D (serie temporal)	Desplazamiento superficial absoluto / tendencias

Técnica	Dominio	Variable(s) principal(es)	Aporte al modelo del deslizamiento
Estación total robotizada	Superficial	Ángulos + distancias a prismas	Desplazamientos relativos de alta precisión / redundancia
Inclinometría	Subsuperficial	Deformación lateral vs. profundidad	Localización de zona(s) de cizalla / mecanismo
Piezometría abierta	Subsuperficial	Nivel piezométrico (carga hidráulica)	Condición hidrogeológica / correlación con aceleraciones

3.4.1 Tecnología GPS – DGPS/DGNSS

El sistema GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite) es una constelación de satélites que transmiten señales de posición, navegación y tiempo a receptores en la Tierra. Con este sistema se puede obtener la ubicación exacta de cualquier objeto. En auscultación de laderas, hace posible obtener series temporales continuas de los desplazamientos, que son útiles para la caracterización cinemática y para la detección temprana de cambios.

3.4.1.1 Principios de DGPS/DGNSS y RTK

El sistema o tecnología diferencial DGPS/DGNSS basa su funcionamiento en el uso de una estación base con coordenadas conocidas y varios receptores móviles (*rovers*). La estación base estima en tiempo real o en posproceso las correcciones asociadas a errores de orbitas, relojes, ionosfera y troposfera y las trasmite al rover, mejorando así la precisión respecto a un posicionamiento autónomo ((ESA), 2011).

En instrumentación y topografía se usan habitualmente dos familias:

- DGNSS, con correcciones de pseudodistancia.
- RTK (Cinemática en Tiempo Real), que explota la fase de la portadora y logra precisiones centimétricas, con tiempos de convergencia y robustez que dependen de la geometría satelital y del entorno (*multipath, obstrucciones*) ((ESA), 2011).

3.4.1.2 Formatos y transporte de correcciones

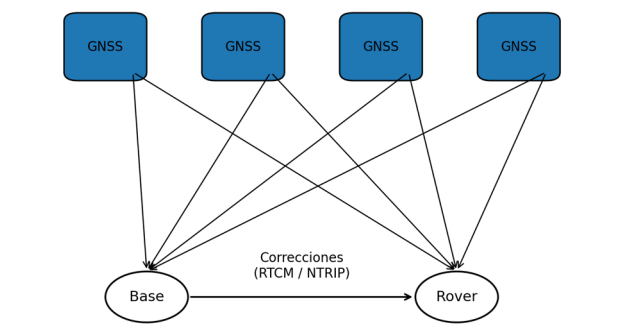
Las correcciones diferenciales se transmiten utilizando estándares RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*), que incluyen servicios para RTK en tiempo real y redes de estaciones de referencia. Para el tráfico de datos por internet, NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) en un estándar RTCM que permite envía datos GNSS en *streaming*.

3.4.1.3 Productos precisos y control de calidad

En posproceso, y para control de calidad, los productos proporcionados por servicios internacionales permiten disminuir sesgos sistemáticos y evaluar la consistencia temporal. El *international GNSS Service* (IGS) posee productos abiertos que son muy usados en geodesia y aplicaciones de deformación ((IGS), 2020).

3.4.1.4 Aplicación a auscultación de deslizamientos

Se han evaluado configuraciones DGNSS para deslizamientos lentos comparándolas con receptores multifrecuencia. Existe evidencia de que, con el diseño adecuado del sistema, se hace posible obtener precisiones milimétricas y centimétricas, lo que habilita el análisis de tendencias y apoyo a umbrales de alerta (RODRIGUEZ, Jorge; DEANE, Emily; HENDRY, M. Trevor; MACCIOTTA, Renato; EVANS, Tad; GRÄPEL, Chris; SKIRROW, Roger, 2021).



Esquema conceptual DGNSS/RTK: observaciones GNSS y transmisión de correcciones desde una base a un rover.

Ilustración 17. Esquema conceptual de una solución DGNSS/RTK con transmisión de correcciones (RTCM/NTRIP)

Tabla 9. Variables críticas de calidad en series GNSS para auscultación

Aspecto	Riesgo típico	Medidas de mitigación
Multipath / obstrucciones	Sesgos y ruido; pérdida de fijación de ambigüedades	Antena en emplazamiento despejado; radomos; filtros y QC
Referenciación	Inconsistencias entre campañas o sensores	Red de referencia estable; ITRF/ETRS; controles con IGS/posproceso
Integridad de enlaces	Gaps; latencias; pérdida de correcciones	Telemetría redundante; registro local; monitorización de estado
Sincronización temporal	Errores en correlación con lluvia/nivel embalse	NTP/GNSS time; marcas de tiempo unificadas; auditoría

3.4.2 Inclinometría

La inclinometría es una técnica para medir deformaciones laterales internas en suelos y macizos, siendo especialmente útil en deslizamientos, donde se requiere localizar la(s) zona(s) de cizalla, estimar el mecanismo y separar deformación superficial de deformación profunda (DUNNICLIFF, 1998) (DUNNICLIFF, 1993).

3.4.2.1 Instrumentación y modos de lectura

Un inclinómetro está compuesto por una tubería ranurada dentro de un sondeo cementado para garantizar el acoplamiento con el terreno. Las lecturas pueden hacerse de forma periódica mediante una sonda portátil o de forma continua con cadenas *in-place* (*in-place inclinometers*), cuando el objetivo es disponer de series de alta frecuencia.



Ilustración 18. Equipo de tomas de datos de Inclinometría. Fuente: PROESZA, S.L. (Elaboración propia)

3.4.2.2 Interpretación de datos

El resultado de una inclinometría es un perfil de desplazamiento acumulado y/o incremental con la profundidad y referido a una base fija. La interpretación de los datos se centra en:

- Identificar profundidades con gradientes de deformación elevados (indicadores de cizalla).
- Coherencia entre campañas.
- Compatibilidad con modelos geotécnicos y con observaciones superficiales.

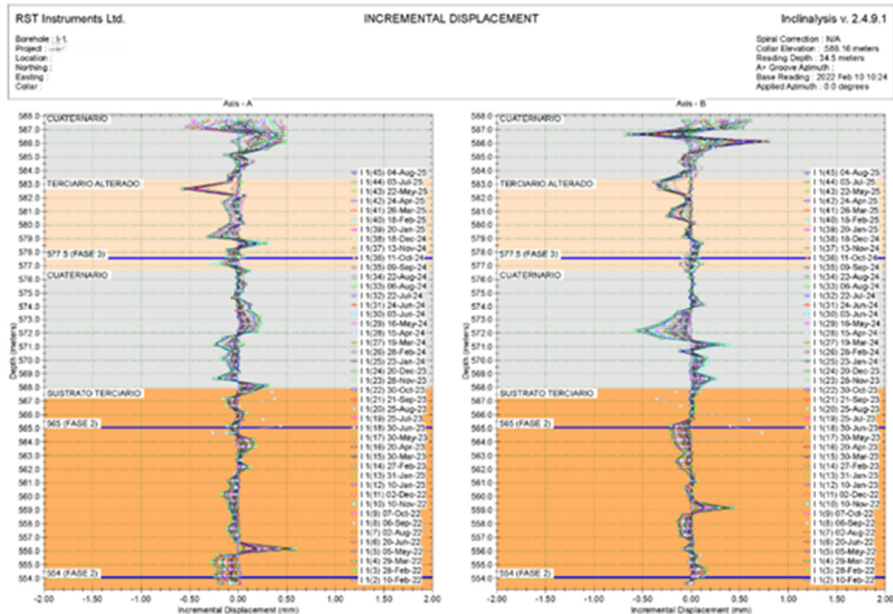


Ilustración 19. Gráfico inclinometría (incremental). Fuente: PROESZA, S.L. (Elaboración propia)

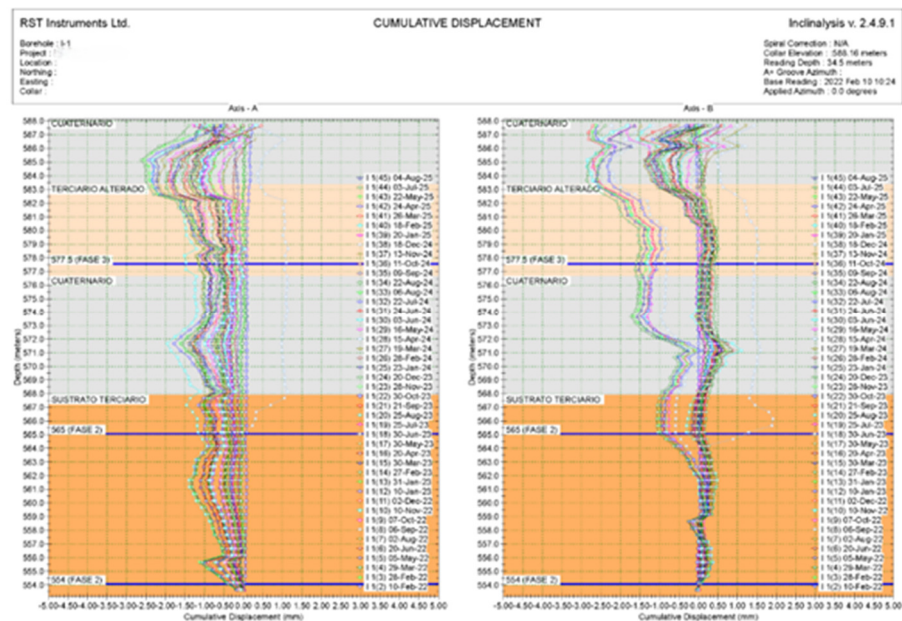


Ilustración 20. Gráfico inclinometría (acumulativo). Fuente: PROESZA, S.L. (Elaboración propia)

3.4.2.3 Buenas prácticas y normalización

La norma ASTM D6230 proporciona un guía sobre tipo de instrumentos, procedimiento de instalación, operación, mantenimiento y fórmulas de obtención de datos (ASTM International, 2021).

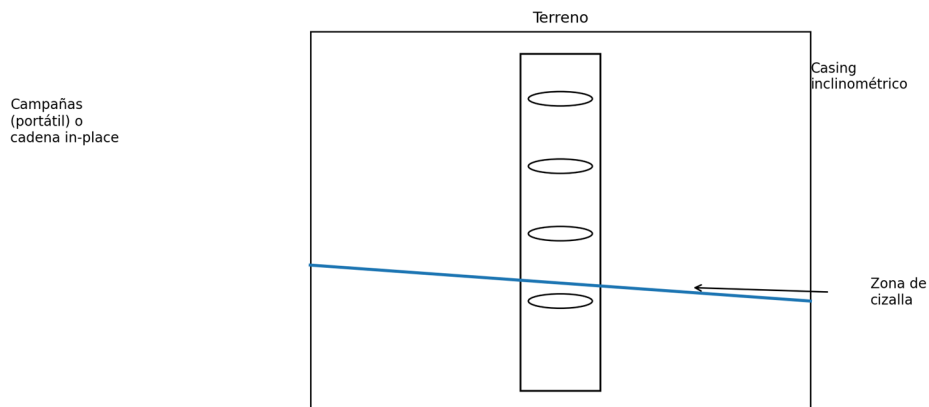


Ilustración 21. Inclinometría: medición de deformación lateral versus profundidad y localización de zona de cizalla (esquema). Fuente: internet

Tabla 10. Checklist técnico mínimo para inclinometría en deslizamientos

Elemento	Criterio / recomendación (síntesis)
Ubicación del sondeo	Cruzando la zona esperada de cizalla y representando subzonas del movimiento
Instalación del tubo	Centrado; ranuras orientadas; sellado superior; <i>grout</i> compatible para buen acoplamiento
Frecuencia de lectura	Mayor en fases críticas; ajuste en función de aceleraciones y objetivos de alerta
Control de calidad	Repeticiones; verificación de <i>offsets</i> ; control de temperatura/operador; trazabilidad
Procesamiento	Separación incremental/acumulado; detección de cambios bruscos; coherencia intercampañas

3.4.3 Piezometría abierta (*standpipe*)

Uno de los principales factores a controlar en la estabilidad de taludes, especialmente en laderas con materiales fino y discontinuidades permeables es la presión intersticial. La piezometría abierta es una solución fiable y de bajo coste con la que estimar la carga hidráulica en profundidad partiendo de la lectura del nivel del agua dentro de un tubo filtrante (DUNNICLIFF, 1998) (DUNNICLIFF, 1993).



Ilustración 22. Sondeo de medición para piezometría abierta. Fuente: PROESZA, S.L. (Elaboración propia)

3.4.3.1 Principio de funcionamiento

El piezómetro abierto es un tubo ranurado rodeado de material filtrante. El nivel del agua dentro del tubo se mide manualmente o con sodas y representa la carga hidráulica.

La principal limitación es el tiempo que tarda en equilibrarse el nivel del agua dentro del tubo. Este tiempo puede ser lento en suelos de baja permeabilidad o con filtros mal diseñados, lo que reduce la capacidad de capturar variaciones rápidas. Por esto, es necesario considerar la hidrodinámica local y, si el objetivo es detectar variaciones rápidas, hay que evaluar otras soluciones como pueden ser piezómetros neumáticos o de cuerda vibrante, y siempre manteniendo la coherencia con el programa de auscultación (DUNNICLIFF, 1998) (DUNNICLIFF, 1993).

3.4.3.2 Integración con eventos hidráulicos de un embalse

En deslizamientos en laderas de embalses, correlacionar la carga hidráulica en el piezómetro con las variaciones de nivel del embalse y con las precipitaciones es clave porque permite diferenciar respuestas por infiltración, por oscilaciones del embalse o por drenaje. La consistencia temporal y una sincronización de series correcta es fundamental para decidir sobre mecanismos y umbrales.

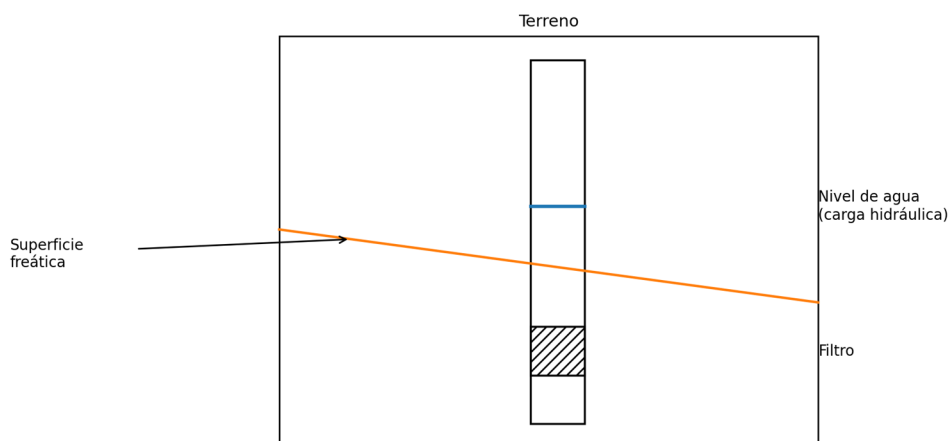


Ilustración 23. Piezometría abierta: lectura del nivel de agua en el standpipe para estimar la carga hidráulica (esquema).
Fuente: internet

Tabla 11. Piezometría abierta: ventajas, limitaciones y usos recomendados.

Ventajas	Limitaciones	Usos recomendados
Robusta, económica; simple de operar	Tiempo de respuesta potencialmente alto	Tendencias estacionales o de largo plazo
Fácil verificación in situ	Sensibilidad a colmatación del filtro	Correlación con nivel de embalse en fases cuasi-estacionarias
Compatible con lectura manual o con sensor	Representa un intervalo, no punto	Calibración/validación de modelos hidrogeológicos

3.4.4 Topografía de alta precisión con Estación Total

La estación total robotizada (RTS) constituye un estándar en la monitorización de deformaciones cuando se necesita alta precisión y automatización en la medida de prismas instalados sobre el terreno. Su utilidad en laderas de embalses radica en que proporciona desplazamientos relativos con bajo incertidumbre, control de redundancia geométrica y con posibilidad de alta frecuencia de observación.

La evaluación de precisión y repetibilidad en estaciones totales está formalizada en la ISO 17123-5, la cual define procedimientos de campo para determinar la precisión de mediciones coordinadas y su incertidumbre (ISO, 2018c).



Ilustración 24. Estación total robotizada. Fuente: PROESZA, S.L. (Elaboración propia)

3.4.4.1 Diseño de puntos de referencia y geometría

Se recomienda establecer una red de referencia estable (pilares/estaciones) y objetivos sobre la superficie potencialmente móvil. La estabilidad de la red es contrastada por medio de las observaciones redundantes y el análisis de consistencia (detectar puntos inestables), apoyándose en ajustes fiables y el control de valores atípicos.

3.4.4.2 Correcciones atmosféricas y refracción

En mediciones de largo alcance, la refracción atmosférica puede llegar a introducir sesgos importantes en ángulos y distancias. Existen trabajos recientes que muestran el impacto de la refracción en la monitorización continua y que describen algunas estrategias para la corrección cuando no existe instrumentación meteorológica completa (ZHOU, et al., 2021).

En España, en el caso de Cortes de Pallás, se ha descrito un enfoque avanzado basado en una red de sensores meteorológicos para construir un modelo 3D de refractividad y mitigar efectos atmosféricos, verificando consistencia mediante una estación total robotizada y puntos de coordenadas conocidas (GARCÍA-ASENJO, y otros, 2025)

3.4.4.3 Procesamiento y ajuste con software

El procesamiento de la auscultación topográfica necesita:

1. Ajuste de las observaciones (mínimos cuadrados, estimadores fiables).
2. Trazabilidad de la configuración (instrumentos, prismas, constantes).
3. Generación de informes replicables.

Para el caso que ocupará el apartado nº 5 de este trabajo (APLICACIÓN A ESTUDIO DE DESLIZAMIENTO EN UN EMBALSE (CON DATOS REALES)), se ha utilizado el software *mInCalc*, que

es un paquete modular orientado al cálculo y monitorización topográfica (CONSOL GEO TECHNOLOGIES, 2022).

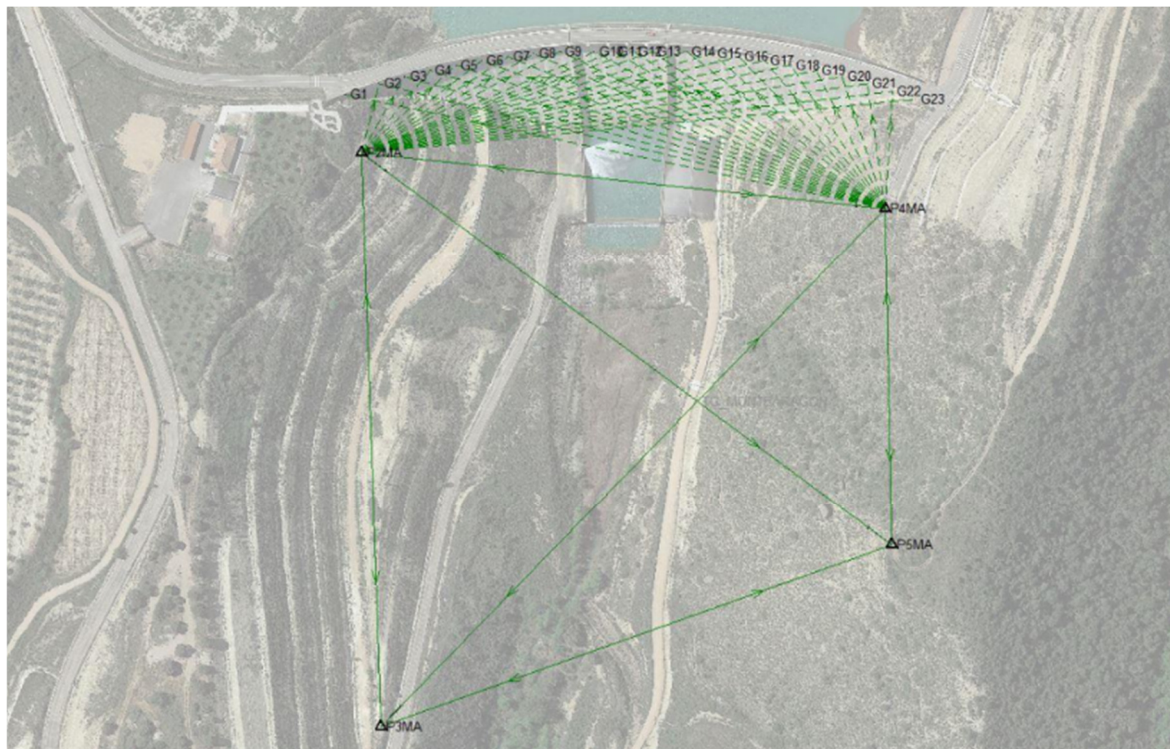


Ilustración 25. Esquema de monitorización con estación total robotizada. Fuente: PROESZA, S.L. (Elaboración propia)

Tabla 12. Fuentes habituales de incertidumbre en monitorización con RTS y medidas de control

Fuente	Efecto	Control / mitigación
Refracción atmosférica	Sesgo en ángulos/distancias; deriva diaria	Sensores meteo; modelos; ventanas horarias; redundancia
Constantes instrumentales	Error sistemático en distancia	Calibración; verificación periódica; ISO 17123-5
Estabilidad de referencia	Falsa deformación	Red redundante; tests de estabilidad; ajuste robusto
Colimación/centrado/prismas	Sesgos locales	Protocolos de instalación; inspección; prismas adecuados
Calidad de seguimiento automático	Pérdidas de puntería; outliers	Filtros; reintentos; umbrales QC; alarmas de estado

En laderas de geometría compleja, la estación total (RTS) aporta una serie temporal muy precisa en puntos discretos (prismas), pero no describen por si sola la deformación continua de la superficie.

El escáner láser terrestre (TLS) permite capturar nubes de puntos densas, que son útiles para:

- Cartografiar cicatrices y escarpes.
- Cuantificar volúmenes movilizados.

- Detectar información fuera de los prismas.

La calidad del TLS depende de:

1. Una buena estrategia de estaciones y solapes que minimicen sombras.
2. Control geométrico de dianas y/o puntos de control.
3. Registro robusto entre campañas.

Para poder cuantificar cambios se pueden utilizar comparaciones nube a nube o nube a malla, siendo el método M3C2 (*Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison*) uno de los enfoques más extendidos para obtener desplazamientos con significación estadística y umbrales.

Cuando la superficie es muy extensa o se requiere una visión de conjunto de la ladera y su entorno, la teledetección con drones aporta rapidez y cobertura. Con fotogrametría se pueden obtener ortofotos y modelos digitales (DSM/DTM) que permiten comparar campañas y detectar movimientos centimétricos o decimétricos, muy útiles en deslizamientos rápidos o con cambios morfológicos visibles. En escenarios con vegetación o con necesidad de penetración, los sensores LIDAR en dron mejoran la representación del terreno.

Un programa de auscultación mixto es razonable utilizar RTS/GNSS para seguimiento continuo y TLS/UAV para campañas de actualización geométrica tras episodios de lluvias intensas, vaciados rápidos o incidencias. De este modo se mantiene el control estable de tendencias y se dispone de superficies comparables para el análisis volumétrico.

Otra forma es la utilización de drones nido (dron-in-a-box) para cartografía sucesiva y captura automática. Con este sistema se automatizan vuelos repetitivos desde una base fija y planificación estandarizada, carga automática y operación remota. De esta manera se reduce la dependencia de campañas manuales y se obtienen series de nubes y ortofotos con la misma geometría de vuelo (alturas, solapes, trayectorias), mejorando la comparabilidad temporal.

El producto final (E57-LAS-LAZ para nubes de puntos y superficies) es fácilmente integrable en entornos BIM (mediante *ReCap*, *Infraworks*, *Civil 3D*) lo que permite generar superficies por cada campaña y comparar deslizamientos y volúmenes, manteniendo la trazabilidad de cada entrega en el CDE.

3.4.5 Auscultación de laderas en entorno BIM

La integración de la auscultación en un entorno BIM va más allá de la simple representación de los instrumentos. Implica requisitos de información, vinculación de objetos con metadatos y series temporales y asegurar la trazabilidad y el control de versiones. La ISO 19650 proporciona un marco de gestión bajo entorno BIM, donde además se incluyen conceptos y principios básicos para la fase de entrega (ISO, 2018a) (ISO, 2018b).

3.4.5.1 Estándar openBIM

Para interoperabilidad, el IFC (*Industry Foundation Classes*) es un estándar abierto. La edición actual ISO 16739-1:2024 amplía su cobertura de información para infraestructuras (puentes, carreteras, ferrocarriles, etc), lo que resulta de gran utilidad en ingeniería civil (IFC4.3 Add2 — ISO 16739-1:2024).

3.4.5.2 Requisitos de información y validación automática

La definición y verificación de los requisitos de información puede basarse en IDS (*Information Delivery Specification*), que es un estándar de *buildingSMART* donde se describen los requisitos de forma interpretable por ordenador y realizar comprobaciones de conformidad sobre modelos IFC (*buildingSMART INTERNATIONAL*, s.f.-a).

3.4.5.3 Diccionarios y normalización terminológica

Para evitar que existan ambigüedades en la propiedades (unidades, denominaciones, etc), bSDD (*buildingSMART Data Dictionary*) posee un servicio de diccionarios de datos para compartir definiciones y propiedades asociadas a objetos del entorno (*buildingSMART INTERNATIONAL*, s. f.-b).

3.4.5.4 Patrón de integración: BIM + Bases de datos de series temporales

En auscultación, el mejor método debe separar dos cosas:

1. El modelo BIM: fuente principal de información sobre ubicación, identificadores, configuración e historial.
2. Repositorio de datos con las observaciones realizadas en diferentes momentos, conectado mediante identificadores permanentes.

De esta manera se evita que el IFC se llene de demasiados datos y facilita un análisis más avanzado.

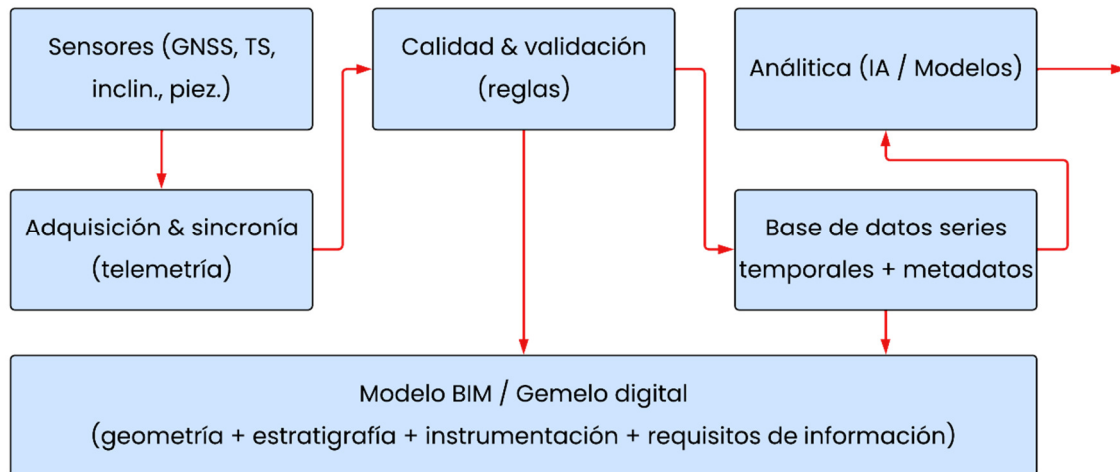


Ilustración 26. Arquitectura típica de integración de auscultación en gemelo digital: sensores, control de calidad, datos, analítica y enlace al modelo BIM. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Matriz de información recomendada para objetos de instrumentación en un modelo BIM

Objeto BIM	Identificación	Propiedades clave	Enlace a datos
Inclinómetro (sondeo)	ID único; código sondeo	Coordenadas; cota boca; profundidad; orientación ranuras; fecha instalación	URI/ID serie; campaña; QC
Piezómetro abierto	ID; intervalo filtrante	Cotas; tramo filtrante; sellos; método de lectura; unidad	ID serie nivel; metadatos sensor
Hito topográfico/prisma	ID; punto	Tipo prisma; constante; soporte; foto; estado	ID serie RTS; indicadores de calidad
Receptor GNSS	ID; estación base/rover	Antena; altura; referencia; enlace comunicaciones; firmware	ID serie GNSS; correcciones
Evento (embalse/lluvia)	ID evento	Fuente; resolución temporal; unidad; control de calidad	ID serie; API / dataset

3.4.6 Integración de IA en auscultación y sistemas de predicción

Con la integración de IA en auscultación se pueden conseguir varias cosas:

- Mejorar la integración de anomalías.
- Fusión multisensor.
- Predicción de desplazamientos.
- Gestión de la incertidumbre.

La bibliografía en deslizamientos muestra un rápido crecimiento en enfoques basados en aprendizaje automático, tanto en datos de monitorización in situ como con teledetección (AKOSAH, et al., 2024).

3.4.6.1 IA para detección, control de calidad y diagnóstico

Una parte importante del esfuerzo en trabajos habituales se concentra en asegurar la calidad de los datos (detección de *outliers* (valores atípicos), gaps, deriva instrumental, etc.). La IA puede ayudar a realizar estos trabajos mediante modelos de detección de anomalías y clasificación de estados de los sensores, integrándolos con reglas deterministas y auditorías humanas evitando así automatismos no trazables.

3.4.6.2 IA, gemelos digitales y pronóstico de estabilidad

Una línea de investigación emergente es la de acoplar monitorización IoT, datos meteorológicos y modelización numérica dentro del gemelo digital y de esta manera conseguir indicadores de estabilidad (p. ej., factor de seguridad) y habilitar pronósticos. Piciullo et al. Proponen un enfoque operacional basado en IoT y gemelo digital, integrando variables meteorológicas e hidrológicas con modelización hidrológica y geotécnica, construyendo así modelos de pronóstico y alerta (PICIULLO, et al., 2024).

En infraestructuras lineales también se han propuesto marcos de gemelos digitales impulsados por IA para la monitorización del riesgo de inestabilidad en taludes de carreteras, integrando inventario digital, modelos 3D y algoritmos de aprendizaje (XU, et al., 2025). Un ejemplo propuesto en dicha publicación es una red viaria, donde el gemelo digital se construye a partir de cuatro etapas:

1. Inventario digital d taludes y terraplenes obtenido automáticamente a partir de modelos LiDAR/ DEM.
2. Estimación del riesgo a escala regional con modelos de aprendizaje (*random forest*) y selección de zonas prioritarias.
3. Generación de un modelo 3D del subsuelo (tipo de suelo y nivel freático) a partir de datos históricos usando redes neuronales.
4. Integración de esas condiciones en modelos de filtraciones y estabilidad (FoS) forzados por previsiones de lluvia, para emitir avisos.

Este mismo esquema podría adaptarse al objeto del presente TFM sustituyendo los condicionante meteorológicos por escenarios combinados (precipitación + nivel del embalse) y alimentando al gemelo digital con las series de piezometría, inclinometría y topografía de alta precisión.

3.4.6.3 Sistemas de alerta temprana y gobernanza

La predicción se debe incorporar dentro de un sistema de alerta temprana (EWS) que contenga:

- Umbrales.
- Niveles de aviso.
- Comunicación.
- Acciones asociadas y verificación.

Los análisis de sistemas geográficos de alerta destacan la necesidad de métricas de desempeño, transparencia y revisión continua de supuestos (GUZZETTI, et al., 2020)

Además, algunas guías enfatizan la definición de roles, procedimientos y comunicación de incertidumbre como componentes tan importantes como el modelo predictivo (SHEAR KNOWLEDGE BROKERS TEAM, 2021).

Tabla 14. Técnicas de IA aplicables a auscultación: objetivos, entradas y consideraciones

Objetivo	Técnicas habituales	Entradas típicas	Riesgos a gestionar
Detección de anomalías/QC	<i>Isolation Forest; autoencoders; reglas híbridas</i>	Series GNSS/RTS/piezómetros; estados	Falsos positivos; deriva de distribución
Fusión multisensor	Kalman; modelos bayesianos; redes multimodales	GNSS+RTS+inclinómetros+piezómetros	Consistencia de referencias; sincronía
Predicción desplazamientos	LSTM/GRU; CNN-1D; Conv-LSTM	Desplazamientos + lluvia + nivel embalse	<i>Overfitting; extrapolación; interpretabilidad</i>
Clasificación de estados de riesgo	Random Forest; XGBoost; SVM	<i>Features</i> (pendientes, tasas, presiones)	Dependencia de umbrales; desbalance de clases
Gemelo digital + pronóstico estabilidad	Modelos físicos + ML (<i>surrogates</i>)	Meteo/hidrología + modelos numéricos	Propagación de incertidumbre; calibración

4 PROPUESTA DE METODOLOGÍA

En este capítulo se propone una metodología y un plan de implementación con resultados esperables para integrar la auscultación de un deslizamiento existente en la cola de un embalse en un entorno BIM y con el complemento de IA para interpretación de datos, predicción, escenarios y alertas. El objetivo es que las mediciones de campo se almacenen de forma ordenada, se revisen automáticamente para detectar posibles errores y se obtengan alertas cuando existan señales de riesgo.

Se consideran cuatro fuentes de datos:

- Topografía de alta precisión con estación total robotizada (RTS).
- Inclínometría.
- Piezometría abierta.
- Aforo de lectura manual.

La propuesta se apoya en:

1. Gestión de la información según ISO 19650.
2. Interoperabilidad BIM mediante IFC / ISO 16739-1.
3. Gestión de las series temporales mediante un estándar tipo *OGC SensorThing*.
4. Guías de instrumentación y gestión del desempeño en presas y de medición de caudales.

Aunque el enfoque aquí dado es para el Trabajo Fin de Máster, también es útil para administración, explotación de infraestructuras y equipos de seguridad porque contempla:

- Qué se mide.
- Cómo se guarda.
- Cómo se revisa.
- Cómo se avisa.
- Cómo se actúa.

4.1 METODOLOGÍA

4.1.1 Visión general de la arquitectura

La metodología se divide en cuatro grandes bloques:

1. Captura de datos (campañas) y ordenar la información.
2. Ingestión y QA/QC (ETL): Guardarla en un sistema central.
3. Almacenamiento centralizado (BD+API): Interpretar las mediciones con IA.
4. BIM + analítica/IA + alertas: Hacer predicción y alertas con IA.

Las mediciones disponibles se toman semanal, quincenal o mensualmente, dependiendo del tipo de sensor y del estado del embalse (si está en proceso de llenado o en proceso de vaciado), por lo que se priorizan métodos robustos y fáciles de explicar.

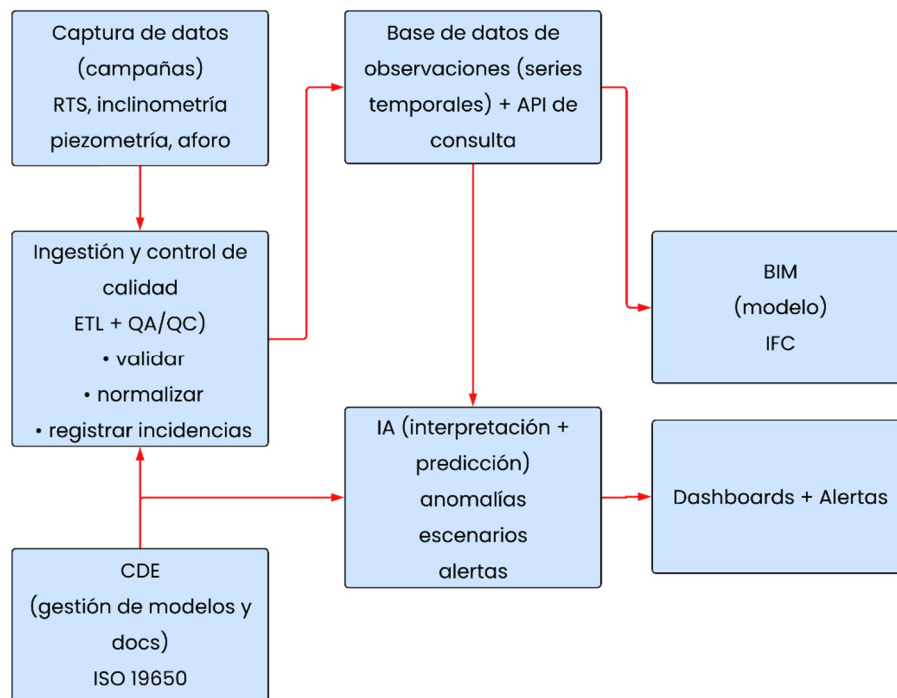


Ilustración 27. Arquitectura BIM–BD–IA–Alertas (esquema). Elaboración propia.

El objetivo es separar tres cosas (todas ellas conectadas):

- El modelo BIM, que sirve para ubicar cada punto o instrumento.
- La base de datos, donde se guardan todas las lecturas a lo largo del tiempo.

- La IA trabajará con la base de datos y devolverá resultados (tendencias, avisos) que se visualizarán en paneles.

4.1.2 Estandarización de la información

Antes de poder analizar los datos, hay que asegurarse que estos están bien organizados:

- Mismos nombres.
- Mismas unidades.
- Mismas reglas.
- Etc.

Si no se realiza este paso, pueden aparecer errores difíciles de detectar.

Para la gestión y entrega de datos se sigue la ISO 19650 (conceptos, CDE y control de estados).

Para interoperabilidad y transferencia del modelo se adopta IFC según ISO 16739-1 y la guía *buildingSMART*.

Para series temporales se propone un estándar compatible con *OGS SensorThings API*.

4.1.2.1 Diccionario de datos

Se define un diccionario de datos único para asegurar:

- Unidades homogéneas.
- Campos mínimos.
- Trazabilidad al origen de la lectura.
- Información de calidad por observación.

Tabla 15. Diccionario de datos mínimo. Elaboración propia.

Tipo	Variable principal	Unidad	Campos mínimos	Notas QA/QC (ejemplos)
RTS	Coordenadas 3D / desplazamiento	m (coord), mm (desp)	AssetID, Fecha, X, Y, Z, Residual	Salto aislados; coherencia con puntos cercanos; control de unidades
Inclinometría	Desplazamiento vs profundidad	mm	AssetID, Fecha, Profundidad, Desp, Sentido	Repetibilidad; detección de "offset"; consistencia del perfil

Tipo	Variable principal	Unidad	Campos mínimos	Notas QA/QC (ejemplos)
Piezometría abierta	Nivel piezométrico	m	AssetID, Fecha, Nivel medido, Cota boca, Referencia	Lecturas con observación de campo; saltos por error de referencia
Aforo manual	Caudal	l/min	AssetID, Fecha, Q, Método, Condición	Registrar método y condiciones; repetir si hay incertidumbre alta

4.1.2.2 Identificación y ubicación de instrumentos (georreferenciación)

Todos los instrumentos o puntos de datos deben tener un ID único (AssetID) (p.ej. E0XXHUICLI01). Este ID se usará en BIM y en la base de datos para que siempre se pueda cruzar información entre ellos.

La georreferenciación se documenta (CRS y datum vertical) y se aplica en BIM, base de datos y ficheros de campaña.

Tabla 16. Modelo de tabla de georreferenciación. Elaboración propia.

AssetID	Tipo	X	Y	Z	Frecuencia	Estado
E077UI13RT01	RTS	...	...	...	15 días	Activo
E077UI13IN01	Inclinómetro	...	...	...	Mensual	Activo
E077UI13PZ01	Piezómetro	...	...	...	Mensual	Activo
E077UI13AF01	Aforo	...	...	...	Mensual	Activo

4.1.3 Sistema centralizado de gestión

4.1.3.1 CDE y Base de Datos

Se utilizarán dos repositorios principales:

- Un CDE para modelos y documentos (con control de versiones).
- Una base de datos para lecturas.

Un CDE con estados *WIP*, *Shared*, *Published* y *Archive*. Esto permite la trazabilidad de versiones de modelos, documentos y resultados, con revisión y aprobación según ISO 19650.

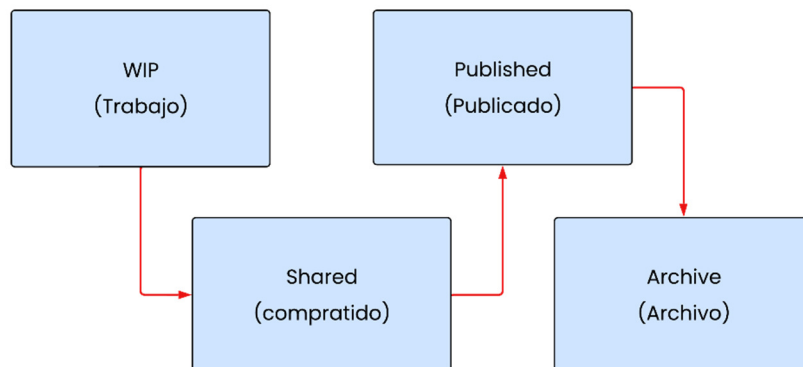


Ilustración 28. Estados típicos del CDE (WIP–Shared–Published–Archive). Elaboración propia.

Las series temporales se almacenarán en una base de datos con separación de dato en crudo y dato normalizado. Se registrarán también derivados (indicadores), umbrales y eventos/alertas. Esta estructura facilitará auditorías y permitirá evolucionar el sistema sin alterar el modelo BIM.

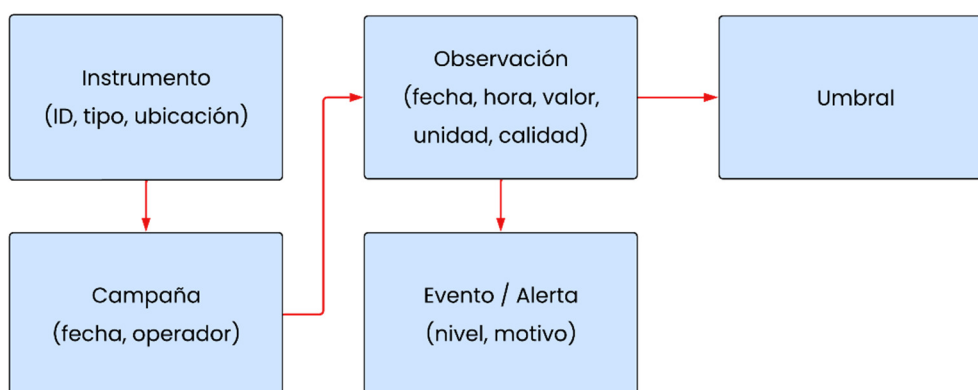


Ilustración 29. Modelo de datos simplificado (entidades principales). Elaboración propia.

4.1.3.2 API de consulta (estándar SensorThings)

Para estandarizar el acceso a las observaciones se propone una API compatible con el estándar OGC SensorThing, de manera que *dashboard*, *scripts* y modelos de IA puedan hacer consultas por instrumento, variable, rango temporal y calidad.

Tabla 17. Consultas típicas de la API (patrón SensorThings)

Recurso/consulta	Descripción	Ejemplo (conceptual)
GET /Instruments	Listado de instrumentos y metadatos	Filtrar por tipo=RTS
GET /Observations?AssetID=...	Serie temporal de un instrumento	Rango temporal + calidad=OK
GET /Derivatives?AssetID=...	Indicadores calculados	Velocidad entre campañas
GET /Events?level=...	Eventos/alertas registrados	Nivel=Amarillo en último mes

4.1.3.3 Flujo ETL y control de calidad (QA/QC)

ETL quiere decir cargar los datos, comprobarlos y guardarlos de manera ordenada. Es recomendable guardar tanto el dato en crudo como el dato limpio (normalizado), para poder auditar cambios.

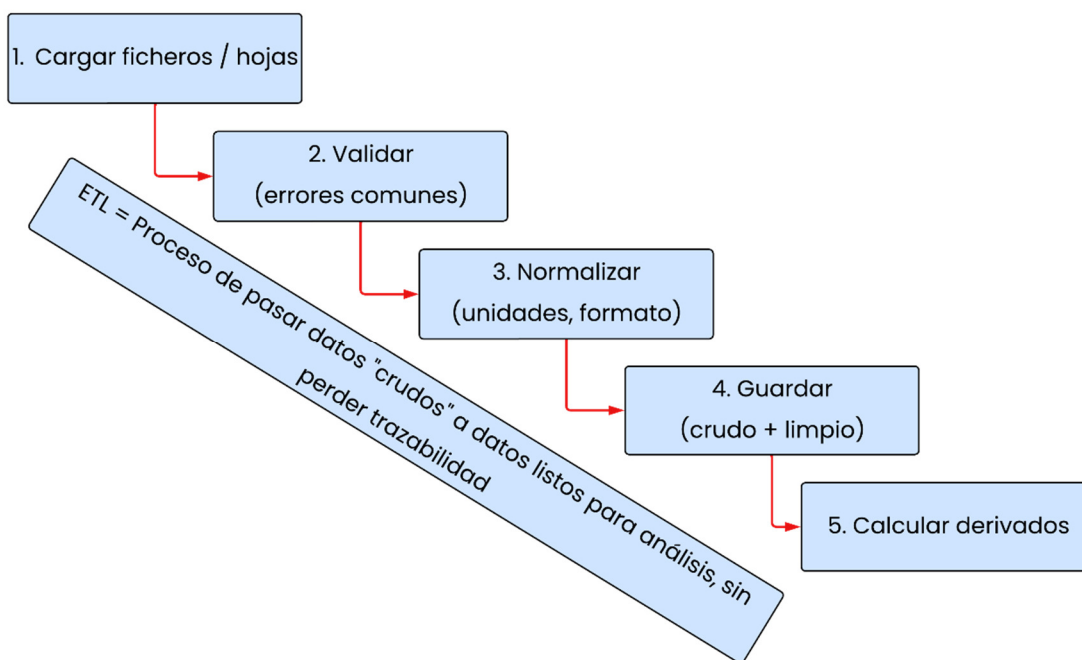


Ilustración 30. Flujo ETL/QA-QC por campañas. Elaboración propia.

Tabla 18. Reglas QA/QC

Variable	Regla simple	Qué evita	Qué hacer si falla
Desplazamiento RTS	Salto aislado sin confirmación en puntos vecinos	Errores de lectura o prisma	Revisar campaña y repetir si procede
Piezometría	Cambio brusco no compatible con histórico	Lecturas mal tomadas (referencia)	Revisar cota de boca y repetir lectura
Inclinometría	Perfil incoherente entre campañas consecutivas	Error de sonda o referencia	Repetir medición / revisar procedimiento
Aforo	Valor sin método/condiciones	Datos poco comparables	Completar hoja de campo y estandarizar método

4.1.4 Integración BIM ↔ Base de datos

El modelo BIM se utilizará como mapa de información (informará de la ubicación y tipo de cada elemento). Las lecturas se guardarán en la Base de Datos. El enlace entre ambos es el *AssetID* vía API.

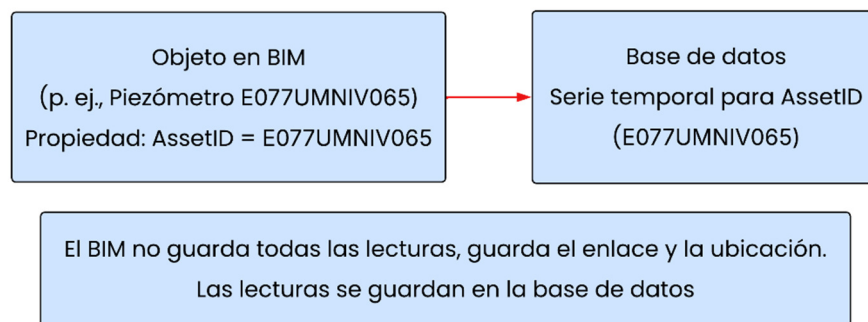


Ilustración 31. Enlace BIM–Base de datos mediante AssetID. Elaboración propia.

Tabla 19. Propiedades BIM mínimas por objeto de instrumentación. Elaboración propia.

Propiedad	Tipo	Ejemplo	Uso
AssetID	Texto	E0XXHUICLI01	Clave única para enlazar BIM y BD
InstrumentType	Texto	HIT / ICL / PZA / AFM	Filtrado y vistas por tipo
Coordinates	Números	X,Y,Z	Verificación geométrica y trazabilidad
ReadingFrequency	Texto	15 días / Mensual	Planificación de campañas
DataLink	URL/Texto	https://.../Observations?AssetID=...	Acceso a serie temporal desde el visor
Status	Texto	Activo/Inactivo	Gestión de inventario

4.1.5 Interpretación de datos con IA

La IA se utilizará para dos tareas principales:

1. Detectar lecturas que probablemente sean errores.
2. Combinada con reglas de ingeniería, detectará cambios de tendencia que pueden indicar que el deslizamiento se está activando.
 - a. Regla de persistencia temporal.
 - b. Regla de coherencia espacial.
 - c. Regla de coherencia multisensor.
 - d. Regla de compatibilidad con el mecanismos de rotura conocido.
 - e. Regla de coherencia hidrogeológica.
 - f. Regla de prudencia específica para piezometría abierta.
 - g. Regla de validación humana (obligatoria).

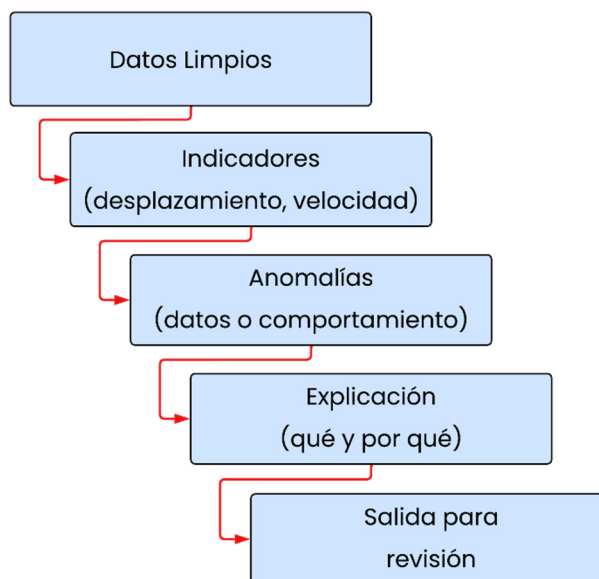


Ilustración 32. Cadena de interpretación con IA (conceptual). Elaboración propia.

Tabla 20. Indicadores derivados (features) para interpretación y predicción. Elaboración propia.

Fuente	Indicador derivado	Definición simple	Ventana	Uso
RTS	Desplazamiento 3D	Distancia entre campañas	Entre campañas	Tendencia y velocidad
RTS	Velocidad	Desplazamiento / Δt	2-3 campañas	Detección de aceleración
Inclinometría	Zona activa	Profundidad con mayor cambio	Campaña	Localizar plano/cizalla
Piezometría	Tendencia	$\Delta \text{nivel} / \Delta t$	2-3 campañas	Correlación con movimientos
Aforo	Variación	$\Delta Q / \Delta t$	2-3 campañas	Indicio de cambios hidráulicos

4.1.6 Predicción, escenarios y alertas

En esta fase, la IA intentará predecir el comportamiento del deslizamiento en el futuro. Con campañas de lecturas quincenales o mensuales, se priorizarán modelos que funcionen con pocas observaciones y que expresen incertidumbre.

Se propone el uso de modelos en espacio de estados y filtro de Kalman (Welch, et al., 2006) (KalmanFilter.net, s,f), y como alternativa probabilística procesos Gaussianos (GP) (Rasmussen, et al., 2006). La predicción se organiza por escenarios operativos y se traduce a probabilidad de superar los umbrales.

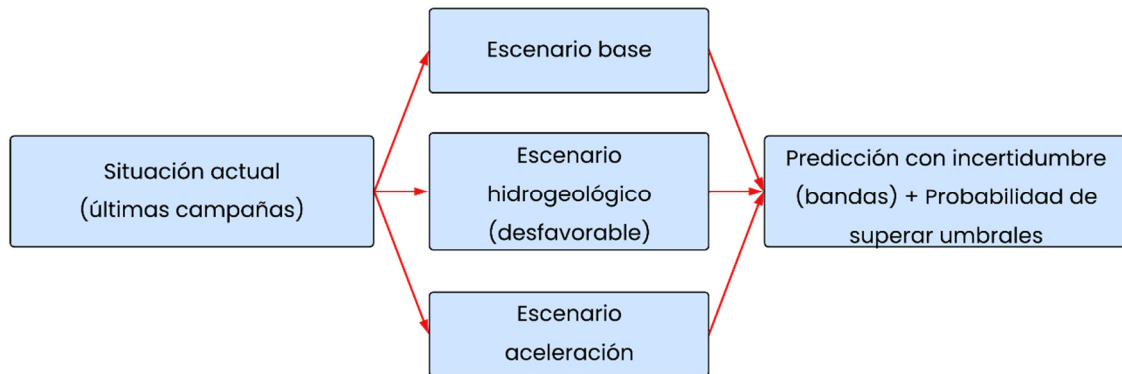


Ilustración 33. Motor de escenarios y predicción con incertidumbre. Elaboración propia.

Tabla 21. Definición de escenarios operativos. Elaboración propia.

Escenario	Supuesto	VARIABLES afectadas	Salida
Base	Continuidad de tendencia reciente	RTS, piezometría, aforo	Predicción + IC
Desfavorable hidrogeológico	Incremento sostenido de niveles	Piezometría, desplazamientos	Prob. de umbral
Aceleración	Aumento progresivo de velocidad	RTS, inclinometría	Predicción de velocidad
Estabilización	Reducción gradual de velocidad	RTS, inclinometría	Tendencia a la baja

El sistema de alerta se complementará con niveles Verde/Amarillo/Rojo, persistencia (histéresis) y un protocolo asociado para reducir las falsas alarmas.

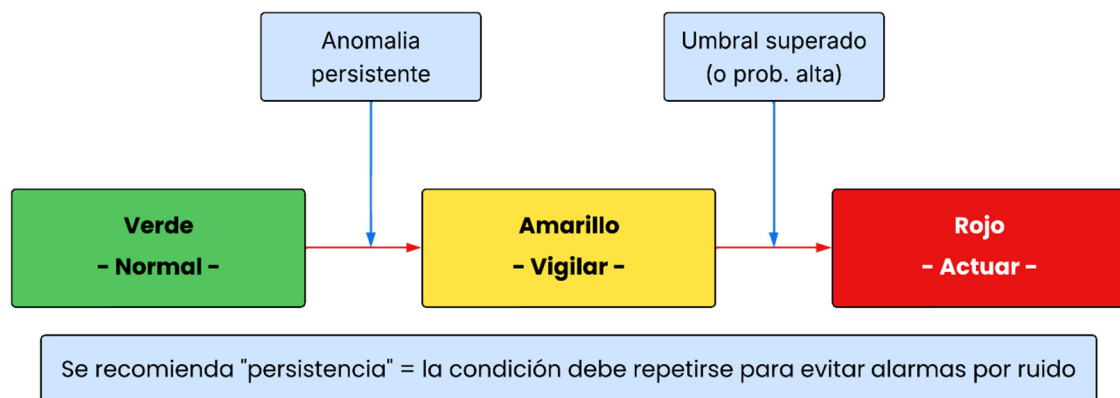


Ilustración 34. Niveles de alerta con persistencia. Elaboración propia.

Tabla 22. Matriz de alertas y acciones asociadas. Elaboración propia.

Nivel	Condición (ejemplo)	Persistencia	Verificación	Acción
Verde	Dentro de rango y sin cambio significativo	N/A	Rutina	Continuar campañas
Amarillo	Anomalía confirmada o cambio de tendencia	2 campañas	Revisión técnica	Reforzar control / campaña extra
Rojo	Umbral superado o probabilidad alta de superación	1 campaña (o inmediata)	Validación urgente	Activar protocolo y medidas

4.1.7 Presentación y explotación

La explotación se apoyará en un panel (*dashboard*) que integrará:

- Mapa.
- Series temporales por instrumento.
- Estado por nivel de alerta.
- Registro de eventos.

El objetivo es que un técnico pueda pasar de una alerta a la evidencia en pocos pasos.

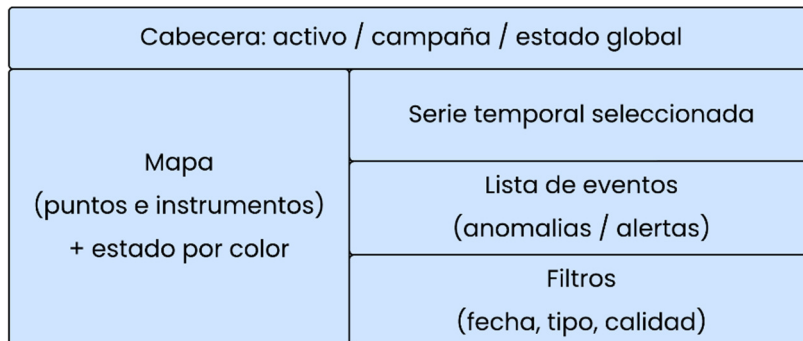


Ilustración 35. Ejemplo de panel para explotación. Elaboración propia.

4.2 IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA Y RESULTADOS ESPERADOS

4.2.1 Implementación del inventario y plantillas de campaña

Se crea un inventario de todos los instrumentos. Este inventario es la referencia para enlazar BIM y BD. Además, se crea una plantilla que se rellena con los datos de cada campaña para cargarla en el sistema.

Tabla 23. Inventario maestro. Elaboración propia.

AssetID	Tipo	X	Y	Z	Frecuencia	Estado
EOXXHUHIT001	RTS	717290,294	4677524,388	652,830	Mensual/Semanal	Activo
EOXXHUHIT002	RTS	717311,176	4677451,529	650,714	Mensual/Semanal	Activo
EOXXHUICLI01	Inclinómetro	717211,379	4677267,815	588,316	Mensual/Quincenal	Activo
EOXXHUPZA001	Piezómetro	717.309,428	4.677.457,632	650,180	Mensual/Quincenal	Activo

4.2.2 Implementación del modelo BIM

En el modelo BIM se plasma el entorno (terreno y elementos relevantes) y se sitúan los objetos de auscultación. Cada objeto lleva asociado su *AssetID*, lo que permite que cualquier usuario pueda pinchar sobre el punto y ver sus lecturas en el panel.

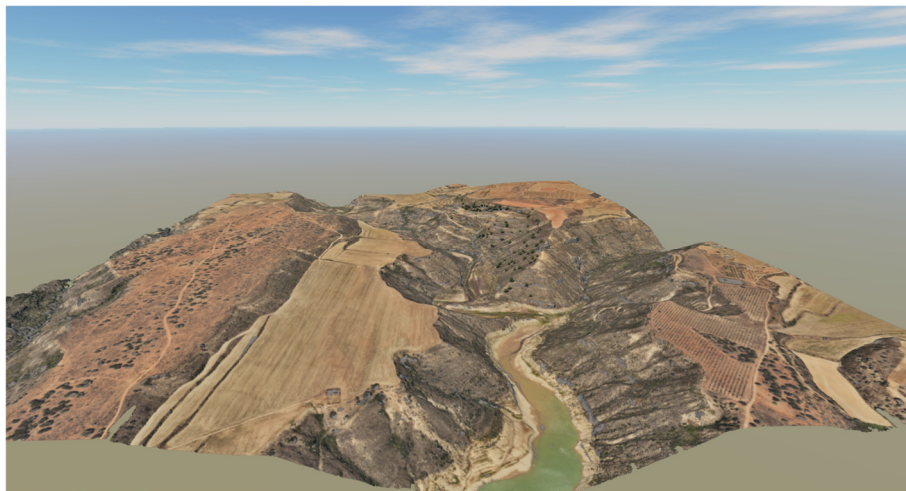


Ilustración 36. Vista general del modelo BIM en Infracworks. Elaboración propia



Ilustración 37. Vista de la ladera en Infracworks. Elaboración propia

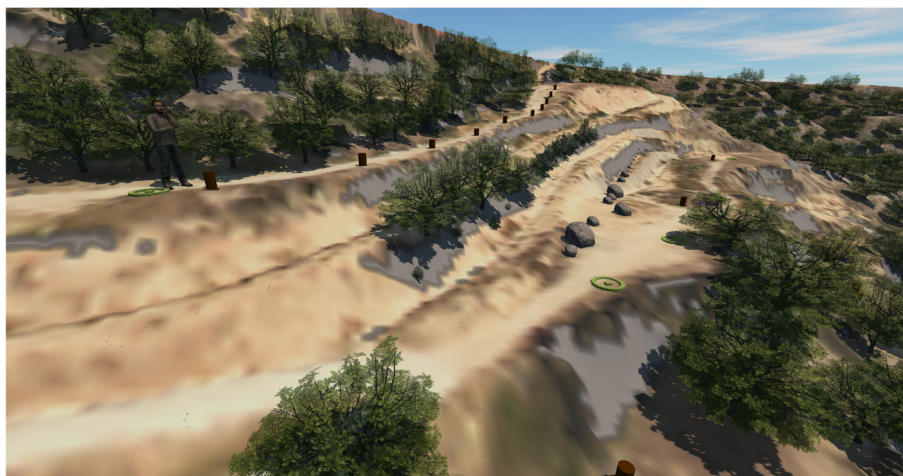


Ilustración 38. Vista de detalle con Hitos Topográficos y Piezómetro en Infracworks. Elaboración propia

4.2.3 Implementación del CDE

Se configura un CDE para guardar modelos, documentos, informes de campañas y resultados de IA, con control de versiones. Esto permite conocer qué versión del modelo y qué versión de datos se utilizaron para generar una alerta.

4.2.4 Base de datos y API

La base de datos almacena las series temporales. A través de una API se consultan:

- Lecturas.
- Indicadores.
- Alertas.

Tabla 24. Ejemplos de consultas. Elaboración propia.

Consulta típica	Qué devuelve	Para qué se usa
Lecturas de un AssetID (rango fechas)	Serie temporal (valores + calidad)	Graficar evolución
Indicadores de un AssetID	Velocidad/tendencia/etc.	Detectar cambios
Eventos/alertas de un periodo	Lista de alertas con motivo	Seguimiento y decisiones

4.2.5 Resultados de QA/QC

Se incluye un resumen por campaña:

- Porcentaje de observaciones OK / Dudoso / Inválido.

- Incidencias típicas.
- Correcciones.

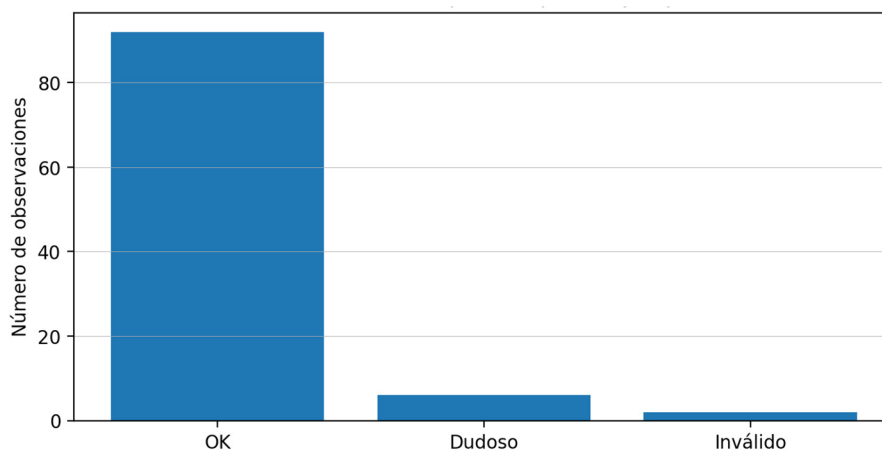


Ilustración 39. Resumen QA/QC por campaña. Elaboración propia.

Tabla 25. Resultados de QA/QC por tipo de dato. Elaboración propia.

Tipo	OK	Dudoso	Inválido	Nota
RTS	48	2	0	Dos lecturas revisadas por salto aislado
Inclinometría	12	1	0	Perfil no repetible en una campaña
Piezometría	24	2	1	Una lectura descartada por referencia errónea
Aforo	8	1	1	Dos mediciones con alta incertidumbre

4.2.6 Interpretación con IA

Se presentarán de manera gráfica:

- Indicadores derivados.
- Anomalías detectadas

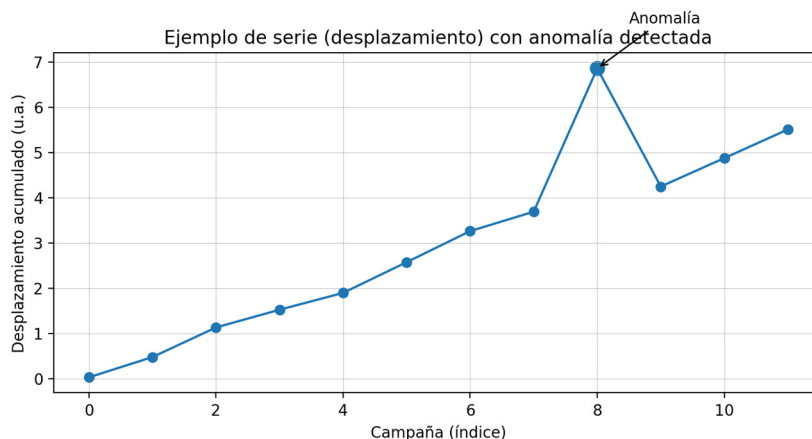


Ilustración 40. Serie temporal con anomalía detectada (ejemplo con datos sintéticos). Elaboración propia.

4.2.7 Predicción, escenarios y alertas

En lugar de dar una cifra, se muestra una predicción con banda de incertidumbre y una probabilidad de superar el umbral.

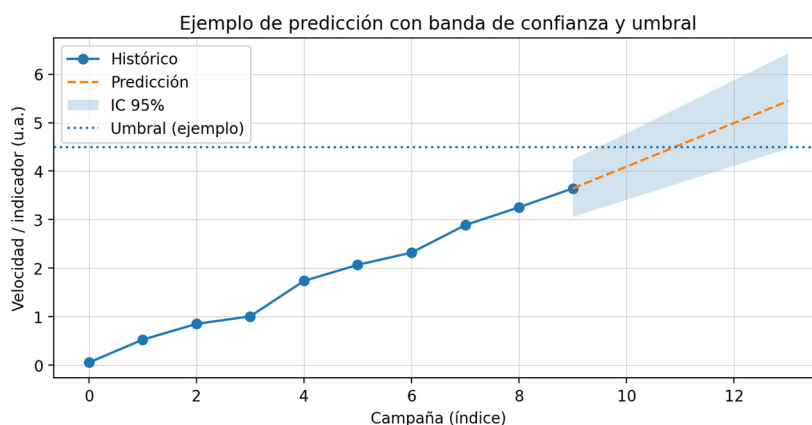


Ilustración 41. Predicción con banda de confianza y umbral (ejemplo con datos sintéticos). Elaboración propia.

Tabla 26. Caso de alerta: condición, verificación y acción

Nivel	Condición detectada	Verificación	Acción
Amarillo	Incremento de velocidad RTS en 2 campañas	Revisión técnica + comprobar piezometría	Programar campaña extra
Rojo	Prob. > 80% de superar umbral en 1 mes	Validación urgente	Activar protocolo y medidas

4.2.8 Síntesis y limitaciones

Con campañas semanales, quincenales y mensuales, el sistema no pretende detectar cambios “en horas”, sino cambios entre campañas. Por este motivo, es importante que las reglas de calidad y alertas estén bien definidas y que exista un protocolo claro para revisar señales.

4.3 GLOSARIO DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
BIM	<i>Building Information Modeling</i> . Modelo digital con información del activo (terreno, elementos y objetos).
IA	Inteligencia Artificial. Métodos informáticos para detectar patrones, anomalías y hacer predicciones.
RTS	<i>Robotic Total Station</i> . Estación total robotizada para topografía de alta precisión.
CDE	<i>Common Data Environment</i> . Carpeta/sistema central donde se guardan modelos y documentos con control de versiones (ISO 19650).
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i> . Formato estándar para intercambiar modelos BIM entre programas (ISO 16739-1).
ISO	Organización Internacional de Normalización. Publica normas técnicas (p. ej., ISO 19650).
QA/QC	<i>Quality Assurance / Quality Control</i> . Reglas de control de calidad del dato (detectar errores y asegurar consistencia).
ETL	<i>Extract, Transform, Load</i> . Proceso para cargar datos, validarlos/normalizarlos y guardarlos.
API	Interfaz de programación. Permite consultar datos de forma estructurada (p. ej., desde un cuadro de mando).
GP	<i>Gaussian Process</i> (Proceso Gaussiano). Método probabilístico útil para predicción con bandas de incertidumbre.
Kalman	Filtro de Kalman. Método para estimar y predecir estados en series temporales con incertidumbre.

5 APLICACIÓN A ESTUDIO DE DESLIZAMIENTO EN UN EMBALSE (CON DATOS REALES)

5.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este apartado es aplicar a un caso práctico la metodología detallada en el presente TFM.

La ladera de estudio se encuentra situada en la cola de un embalse, a unos 4 kilómetros de la presa. Se trata de un embalse de aproximadamente 50 Hm³ de capacidad.

Por motivos de privacidad, no tenemos autorización para aportar más datos acerca del embalse ni de la presa, ya que la Confederación Hidrográfica responsable de la explotación del embalse no desea que se difunda en demasía la existencia de un deslizamiento en un embalse de su competencia.



Ilustración 42. Vista general de la ladera desde la orilla contraria. Elaboración propia

5.2 HISTÓRICO DEL ENTORNO

Nota:

Para la redacción de este apartado se han estudiado los siguientes documentos. Se han omitido datos como el nombre del embalse, ubicación y autor del documento ya que la Confederación Hidrográfica responsable

de la explotación del embalse no desea que se difunda en demasía la existencia de un deslizamiento en un embalse de su competencia.

- *Análisis de las laderas del embalse de XXXXXXXXXXXX (septiembre de 2005).*
- *Nota técnica sobre el deslizamiento I-13 de la ladera del río XXXXXX (abril de 2007).*
- *Campaña de reconocimiento geológico e instrumentación inclinométrica en el deslizamiento I-13 en el vaso del embalse de XXXXXXXXXXXX (diciembre de 2011).*
- *Evaluación de la situación de los deslizamientos menores en el embalse de XXXXXXXXXXXX (enero de 2013).*
- *Informe de octubre de 2021 del contrato Servicios para el control y seguimiento de la auscultación de la presa y deslizamiento I-13 en la reanudación del segundo escalón de la puesta en carga de la presa de XXXXXXXXXXXX (octubre de 2021).*
- *Informe de abril de 2023 del contrato Servicios para el control y seguimiento de la auscultación de la presa y deslizamiento I-13 en la reanudación del segundo escalón de la puesta en carga de la presa de XXXXXXXXXXXX (abril de 2023).*
- *Proyecto de Drenaje para estabilización del deslizamiento I-13 en el vaso de la presa de XXXXXXXXXXXX (febrero de 2017).*

El entorno de la cola del embalse presenta un conjunto amplio de inestabilidades de ladera vinculadas a la evolución geomorfológica del valle del río. No obstante, dentro de ese conjunto, el deslizamiento I-13 destaca claramente sobre el resto por su dimensión, por la persistencia de su actividad y por su relación directa con la seguridad de la explotación del embalse. La documentación histórica disponible indica que, en el estudio general de laderas realizado en 2005, se identificaron 44 inestabilidades en total, 30 en la margen derecha y 14 en la izquierda. De ellas, solo 6 superaban 1 ha de superficie y únicamente una excedía las 10 ha, siendo precisamente el I-13 el movimiento de mayor entidad detectado en todo el vaso.

La singularidad del I-13 ya quedó reflejada en los primeros documentos específicos. La nota técnica de abril de 2007 lo describe como el único movimiento de gran volumen que mostraba síntomas claros de actividad, frente al resto de inestabilidades, consideradas de mucha menor entidad. En esa fase inicial, el área afectada se estimaba entre 13 y 18 ha y el volumen movilizado entre 4 y 6 hm³. Posteriormente, la recopilación de información previa elaborada en 2014 precisó esa caracterización y recogió para el I-13 una superficie movilizada del orden de 16,5 ha y un volumen

estimado de 5.500.000 m³, además de clasificarlo como un deslizamiento de tipo rotacional situado en la margen izquierda del embalse, aproximadamente a 4 km aguas arriba de la presa.



Ilustración 43. Ortofoto de la zona del deslizamiento.
Fuente: PNOA

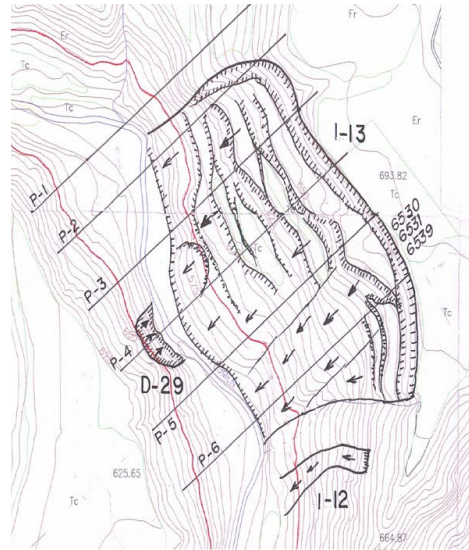


Ilustración 44. Croquis de delimitación del embalse.
Fuente: Proyecto de Drenaje para estabilización del deslizamiento I-13 en el vaso de la presa de XXXXXXXXXXXX (Febrero de 2017).

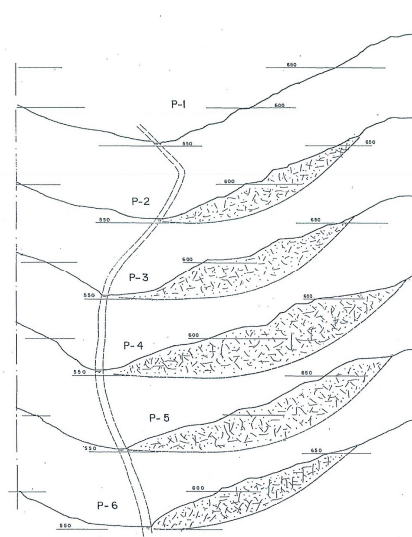


Ilustración 45. Estimación de la zona movida del deslizamiento I-13. Fuente: Proyecto de Drenaje para estabilización del deslizamiento I-13 en el vaso de la presa de XXXXXXXXXXXX (febrero de 2017).

A partir de las recomendaciones del estudio de 2005, la Dirección de la puesta en carga implantó en 2006 un sistema de seguimiento topográfico con el fin de comprobar el comportamiento real del

I-13 antes incluso del llenado del embalse. La primera medida se realizó el 2 de noviembre de 2006, estableciéndose una frecuencia quincenal de lectura. Inicialmente se dispusieron 9 hitos topográficos, organizados en tres secciones, y posteriormente, en junio de 2007, se añadieron otros 9 puntos en cotas superiores para ampliar el control. Los primeros resultados confirmaron de forma clara que no se trataba de una forma fósil completamente estabilizada, sino de un movimiento activo y medible.

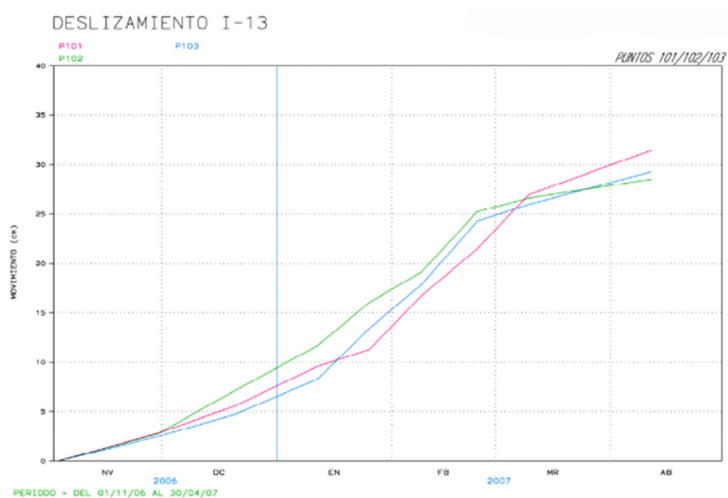


FIG. 3.- EVOLUCIÓN DE MOVIMIENTOS EN PERFIL 1

Ilustración 46. Evolución de movimientos. Fuente: Nota técnica sobre el deslizamiento I-13 de la ladera del río XXXXXX (abril de 2007).

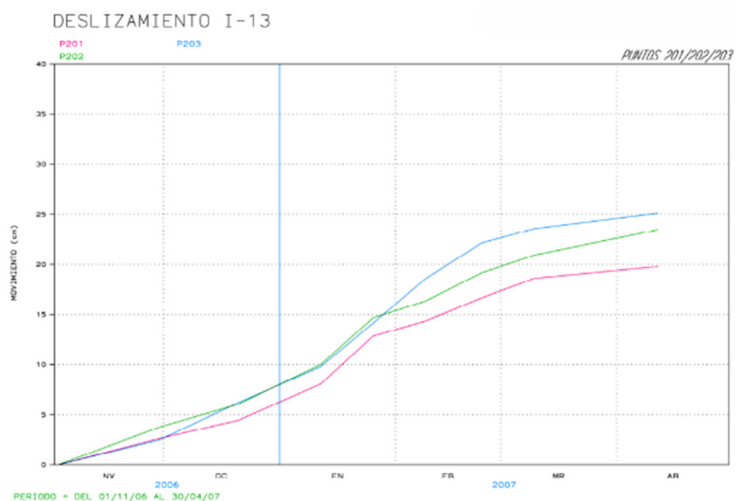


FIG. 4.- EVOLUCIÓN DE MOVIMIENTOS EN PERFIL 2

Ilustración 47. Evolución de movimientos. Fuente: Nota técnica sobre el deslizamiento I-13 de la ladera del río XXXXXX (abril de 2007).

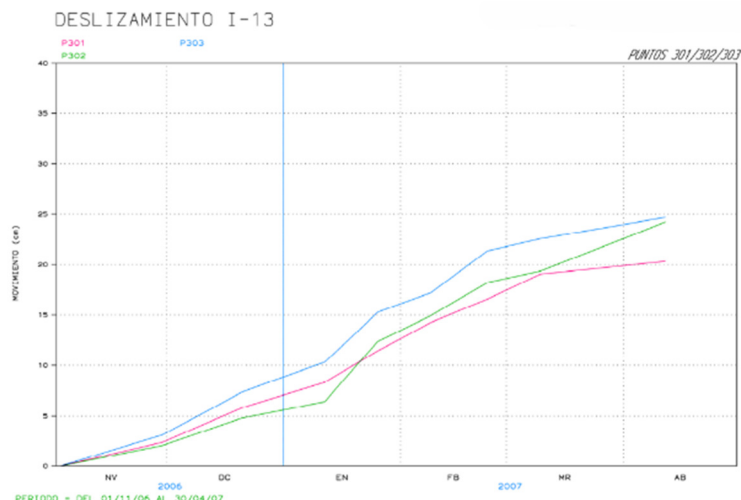


FIG. 5.- EVOLUCIÓN DE MOVIMIENTOS EN PERFIL 3

Ilustración 48. Evolución de movimientos. Fuente: Nota técnica sobre el deslizamiento I-13 de la ladera del río XXXXXX (abril de 2007).

La auscultación de esa primera etapa mostró, además, varios rasgos esenciales para interpretar el fenómeno. En primer lugar, el movimiento observado era fundamentalmente horizontal, con cambios de cota prácticamente nulos. En segundo lugar, los 9 puntos inicialmente controlados presentaban desplazamientos acumulados del mismo orden de magnitud, entre algo menos de 20 cm y algo más de 30 cm. Finalmente, la nota de 2007 subrayaba la influencia del agua, al relacionar los movimientos con la presencia de fuentes en la propia ladera y al señalar velocidades máximas del orden de 10 cm/mes durante enero y febrero de 2007. Este comportamiento obligó a abandonar la idea de una mera cicatriz antigua sin relevancia actual y a considerar el I-13 como una inestabilidad susceptible de reactivación, cuyo conocimiento detallado era imprescindible para la gestión futura del embalse.

La evolución posterior de los datos topográficos permitió definir con más precisión la cinemática temporal del deslizamiento. Según el control histórico de movimientos, la mayor parte del desplazamiento horizontal se concentró en los primeros meses de observación. Entre noviembre de 2006 y abril de 2007 se registraron valores máximos de 31-32 cm en los hitos P-101, P-102 y P-103, equivalentes a velocidades del orden de 5,2-5,3 cm/mes. Entre mayo-junio de 2007 y septiembre de 2008 el proceso se desaceleró notablemente, con desplazamientos adicionales del orden de 12-13 cm y velocidades próximas a 0,7-0,8 cm/mes. A partir de finales de 2008 los registros tendieron a una relativa estabilización, con variaciones reducidas, aunque algunos hitos concretos

mantuvieron ligeros incrementos en años posteriores. A fecha de diciembre de 2016, los mayores movimientos horizontales acumulados correspondían a los hitos P-102 y P-103, con 41,8 y 44,4 cm, respectivamente, mientras que en vertical predominaba una tendencia general al asiento, con valores máximos del orden de 7 a 8,2 cm.

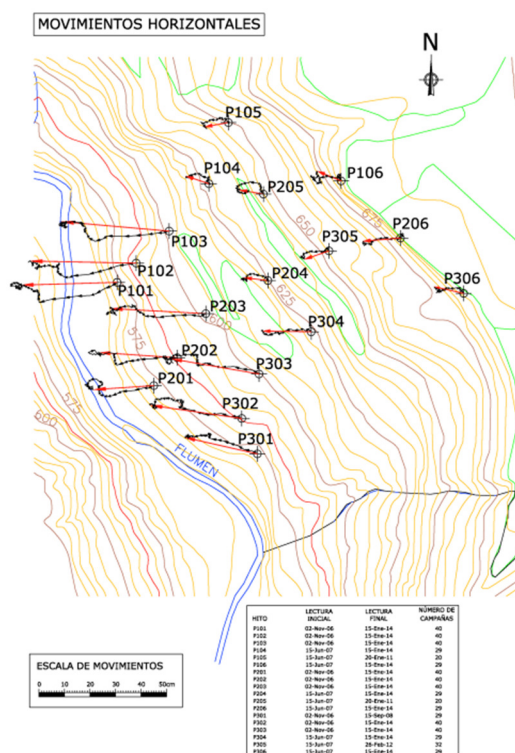


Ilustración 49. Mapa de movimientos horizontales acumulados. Fuente: - Proyecto de Drenaje para estabilización del deslizamiento I-13 en el vaso de la presa de XXXXXXXXXX. Anejo nº 3 (febrero de 2017).

En paralelo al seguimiento superficial, la Confederación Hidrográfica impulsó campañas específicas de reconocimiento geológico-geotécnico para definir la geometría real del movimiento y localizar su posible superficie de rotura profunda. En 2011 se ejecutaron 6 sondeos a rotación con recuperación continua de testigo y 4 perforaciones para instalación de tubería inclinométrica. Los resultados obtenidos en 2012 apuntaron movimientos a profundidades mayores de las inicialmente previstas, especialmente en el inclinómetro M-3, donde se detectaron anomalías a 22 y 44 m. Esa incertidumbre llevó a realizar en 2013 una nueva perforación con instalación de un inclinómetro de 80 m de profundidad, denominado M-6, con objeto de comprobar la posible existencia de una superficie de deslizamiento más profunda que la recogida en la hipótesis inicial. En 2014, además, se desarrolló una nueva campaña topográfica y de reconocimiento geológico que permitió

reinterpretar diversos tramos alterados del sondeo profundo y revisar el modelo geométrico del deslizamiento.

Esta fase de investigación confirmó que el I-13 no podía analizarse como una inestabilidad simple. El conjunto de datos topográficos, inclinométricos, geológicos y geotécnicos puso de manifiesto un proceso complejo, condicionado por la heterogeneidad litológica, por la posible existencia de superficies heredadas y por el papel del agua en la reducción de la resistencia al corte. Desde un punto de vista geotécnico, esta evolución es coherente con lo descrito en la bibliografía para deslizamientos rotacionales en materiales finos y con la necesidad de interpretar la estabilidad en términos de presiones intersticiales, drenaje y escenarios de variación del nivel del embalse.

La importancia del I-13 trascendió así el plano puramente geomorfológico y pasó a situarse en el ámbito de la seguridad de la presa y de la puesta en carga del embalse. El anejo geológico-geotécnico del proyecto de estabilización de 2017 analizó expresamente las consecuencias potenciales de una reactivación significativa del deslizamiento. Para el caso de embalse lleno a nivel máximo normal, se estimó una altura de ola generada entre 4 y 5,60 m, magnitud comparable al resguardo disponible en coronación. Aun así, el documento concluía que, incluso sin ejecutar actuaciones de estabilización, se mantenían condiciones conservadoras de seguridad si el llenado no rebasaba la cota 570, criterio que resultaba todavía más favorable en caso de ejecutar las obras previstas. Este análisis refuerza la idea de que el I-13 constituye el principal condicionante geotécnico del entorno del embalse y explica que fuese objeto de proyectos específicos de drenaje, auscultación y seguimiento.

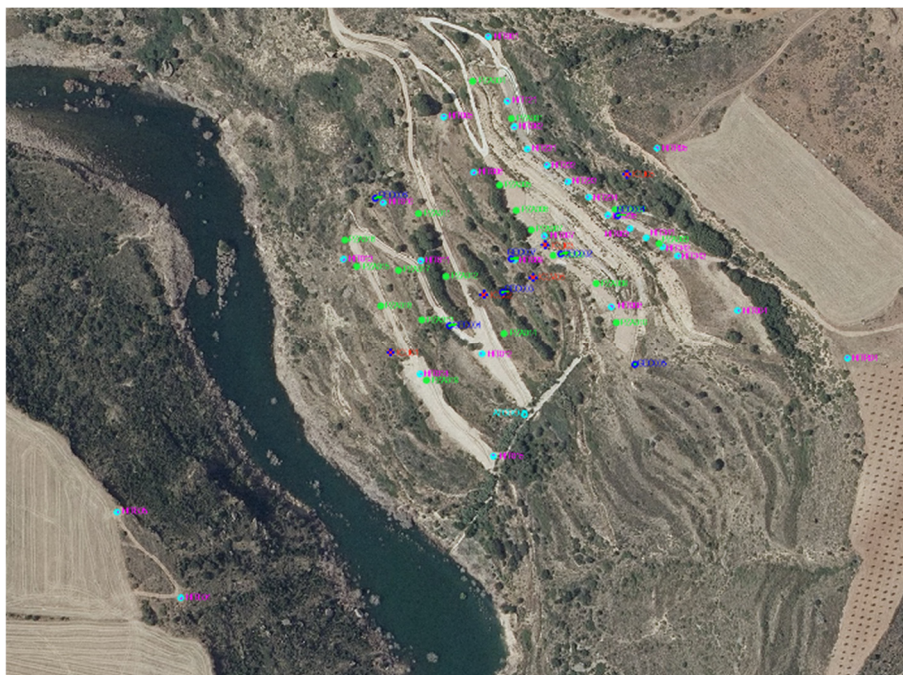


Ilustración 50. Ortofoto con ubicación de elementos de auscultación. Elaboración propia

La etapa más reciente se inicia tras las obras de acondicionamiento ejecutadas antes de la reanudación del segundo escalón de puesta en carga. Los informes de seguimiento de 2021 y 2023 indican que, desde septiembre de 2019, la ladera quedó instrumentada con una red de 5 inclinómetros, 19 piezómetros y 15 hitos topográficos, ampliada además con 9 hitos nuevos en noviembre de 2020. La documentación también señala que en la primavera de 2020 se observaron procesos de erosión y ciertos deslizamientos superficiales en la parte alta del I-13, con roturas de cunetas y surgencias por encima de la cota 650, como consecuencia de las lluvias intensas de finales de invierno y primavera. En 2023 se mantenía el seguimiento periódico de la topografía, la piezometría y la inclinometría, con datos actualizados hasta finales de abril, lo que demuestra que el I-13 sigue siendo una zona activa desde el punto de vista de la vigilancia, aunque su comportamiento reciente sea mucho más moderado que el observado en la fase 2006-2008.

En conjunto, el histórico del entorno muestra que el I-13 es el caso más representativo y crítico del embalse. Reúne, en un único emplazamiento, los elementos que justifican su elección como caso de estudio del presente TFM: gran dimensión, evidencias de actividad reciente, campañas sucesivas de reconocimiento, seguimiento instrumental prolongado, implicación directa en la seguridad de la explotación del embalse y necesidad de integrar información heterogénea procedente de topografía, piezometría, inclinometría, informes técnicos y modelos geotécnicos. Por ello, el I-13

constituye el escenario adecuado para aplicar una metodología basada en integración BIM, explotación de datos y apoyo analítico a la toma de decisiones.

5.2.1 Cronología del deslizamiento I-13

En 2005 se inventariaron las inestabilidades del vaso y se identificó el I-13 como el movimiento más importante detectado, recomendándose su seguimiento durante el llenado.

Entre 2006 y 2007 se implantó la auscultación topográfica inicial y se comprobó que la ladera presentaba desplazamientos horizontales significativos, con máximos del orden de 10 cm/mes al comienzo del proceso de control.

Entre 2011 y 2014 se desarrollaron campañas intensivas de sondeos, inclinometría, reconocimiento geológico y reinterpretación geométrica para definir la superficie de rotura y el modelo de comportamiento.

En 2014 se revisó la delimitación del deslizamiento, reduciéndose la superficie afectada por la identificación de afloramientos no movilizados en la zona sur.

En 2015-2017 se formularon y proyectaron las medidas de estabilización, basadas principalmente en drenaje, refuerzo del pie y mejora de la auscultación.

Desde 2019 se desarrolla una nueva fase de seguimiento instrumental sobre la ladera ya acondicionada, con red ampliada de inclinometría, piezometría y topografía de alta precisión.

En 2020 se registraron erosiones y deslizamientos superficiales asociados a lluvias intensas, lo que obligó a ejecutar actuaciones complementarias y confirmó la sensibilidad hidráulica del entorno.

En 2021 y 2023 la auscultación sigue detectando movimientos lentos o muy lentos en determinados sectores, especialmente en I-3, sin reproducir las tasas iniciales de 2006-2007 pero manteniendo la necesidad de control continuado.

5.3 AUSCULTACIÓN EXISTENTE

La auscultación existente en el deslizamiento I-13 es el resultado de un proceso acumulativo de instrumentación y seguimiento desarrollado durante varios años, y reforzado de forma significativa tras las obras de acondicionamiento ejecutadas con anterioridad a la reanudación del segundo

escalón de puesta en carga del embalse. En su configuración más reciente, la ladera dispone de una red compuesta por 5 inclinómetros, 19 piezómetros y 15 hitos topográficos, a los que se añadieron 9 hitos nuevos en noviembre de 2020. Los datos actualmente explotados constituyen una continuidad de campañas previas y que el conjunto de instrumentos fue georreferenciado sobre una ortofotografía obtenida mediante vuelo UAV realizado en diciembre de 2019.

Desde el punto de vista funcional, esta red responde a una lógica clara: la piezometría permite seguir la evolución de la carga hidráulica y del nivel freático; la topografía de alta precisión controla el desplazamiento superficial de puntos representativos de la ladera; la inclinometría permite identificar movimientos en profundidad y localizar posibles zonas activas de cizalla; y el aforo aporta información complementaria sobre la circulación y evacuación de agua en la zona, especialmente útil para interpretar la eficacia de las obras de drenaje y el comportamiento hidrológico del entorno.

5.3.1 Piezometría

La piezometría constituye uno de los pilares de la auscultación del I-13, ya que el agua aparece de forma reiterada en toda la documentación histórica como uno de los factores con mayor influencia sobre la inestabilidad de la ladera. La red está formada por 19 piezómetros abiertos, si bien el informe de abril de 2023 aclara que, en la práctica, los datos válidos corresponden a 16 sensores, al estar tres de ellos obstruidos o completamente secos. La última lectura recogida en dicho informe se realizó el 18 de febrero de 2026, empleando una sonda manual de nivel de agua.

Desde un punto de vista técnico, esta red piezométrica permite conocer la evolución de la carga hidráulica en distintos sectores del deslizamiento y relacionarla tanto con la pluviometría como con el comportamiento general de la ladera. Su utilidad no es únicamente descriptiva. En un deslizamiento como el I-13, la correlación entre niveles piezométricos, episodios de lluvia, variaciones del embalse y deformaciones superficiales o profundas es esencial para interpretar mecanismos de activación o reactivación.

Dentro del presente TFM la piezometría debe entenderse como la fuente principal para representar la distribución espacial y temporal de las condiciones hidráulicas de la ladera. Su interés no reside solo en el valor absoluto de cada lectura, sino en su evolución y en su comparación con el resto de variables observadas.

5.3.2 Topografía de alta precisión

El control topográfico es la técnica con mayor recorrido temporal dentro de la auscultación del I-13. Su implantación se remonta a noviembre de 2006, cuando se instalaron los primeros 9 hitos topográficos para controlar el movimiento superficial del deslizamiento. Posteriormente, en junio de 2007, se amplió la red con otros 9 hitos, alcanzando un total inicial de 18 puntos. En la documentación de 2014 se indica que, en ese momento, 4 de esos 18 hitos habían quedado fuera de servicio, manteniéndose el control sobre 14 de ellos. En la actualidad, y tras varias actuaciones complementarias, la ladera cuenta con 24 hitos de control

Los resultados de esta auscultación histórica fueron muy relevantes para comprender el comportamiento del I-13. El control superficial mostró que la mayor parte del desplazamiento horizontal se concentró en los primeros meses de observación. Entre noviembre de 2006 y abril de 2007 se registraron movimientos máximos del orden de 31-32 cm, equivalentes a velocidades aproximadas de 5,2-5,3 cm/mes. Después, la velocidad disminuyó de forma notable y, a partir de finales de 2008, existe una tendencia general a la estabilización relativa, con variaciones reducidas salvo en algunos hitos concretos.

La metodología topográfica se modificó de forma importante. Desde julio de 2021, el control dejó de apoyarse en técnicas GNSS y pasó a desarrollarse mediante auscultación topográfica clásica con estación total, utilizando dos bases fijas en la margen derecha del río Flumen, denominadas Hito 04 e Hito 05, desde las que se observan los puntos de control de la ladera. El procedimiento se basa en observaciones reiteradas, procesadas posteriormente en gabinete con el software *Moncalc*, a partir de las cuales se calculan los desplazamientos en planta y en alzado.

Este cambio metodológico es importante porque mejora la explotación geométrica del dato y ordena el sistema de observación en torno a una red de referencia estable. La topografía de alta precisión aporta la serie temporal principal para el seguimiento de los movimientos superficiales del deslizamiento y constituye, además, una fuente especialmente adecuada para su futura integración en el modelo BIM, ya que cada punto observado puede asociarse a coordenadas, campañas, desplazamientos y estados de revisión.

5.3.3 Inclinometría

La inclinometría es la técnica que permite caracterizar el comportamiento del I-13 en profundidad y, por tanto, localizar las zonas activas de deformación interna. Su implantación es posterior a la topografía superficial. El control inclinométrico se inició en diciembre de 2011 con los equipos M-2, M-3, M-4 y M-5, y en febrero de 2014 se incorporó el inclinómetro M-6, de 77 m de profundidad, como equipo de mayor longitud para contrastar la posible existencia de movimientos más profundos.

En 2014 la zona estaba instrumentada con 5 inclinómetros y los registros disponibles permitían reconocer planos o zonas de deslizamiento someras en varios de ellos. En particular, la presencia de una posible superficie de deslizamiento en torno a 6 m de profundidad en los inclinómetros M-2, M-3 y M-4, mientras que en M-5 se identificaban dos posibles discontinuidades, una más superficial, alrededor de 2 m, y otra algo más profunda, alrededor de 8 m.

En la etapa reciente, la red también se estructura en torno a 5 inclinómetros, ya designados como I-1, I-2, I-3, I-5 y M-6, con lecturas mensuales cada 0,5 m. En 2022 se introdujo un nuevo equipo de medida RST y se realizó una nueva lectura de referencia para evitar discontinuidades en las series. Las profundidades de lectura de los equipos: 34,50 m para I-1, 55,00 m para I-2, 75,00 m para I-3, 54,50 m para I-5 y 77,00 m para M-6.

Los resultados más recientes refuerzan la idea de que el movimiento actual del I-13 es lento, localizado y muy inferior al observado en la fase inicial del control topográfico. En el inclinómetro I-5 se deduce, a partir de las lecturas históricas, un movimiento en bloque entre 0 y 4 m, con superficie de deslizamiento en torno a 3 m, mientras que en I-3 se reconocen dos zonas de deslizamiento, entre 8,5 y 10 m y entre 5,5 y 6,0 m, con velocidades compatibles con un movimiento extremadamente lento según la clasificación de Varnes y Cruden. Estos movimientos presentan una ralentización.

Por tanto, la inclinometría cumple en este trabajo una función esencial: no solo verifica que el deslizamiento mantiene actividad en determinados intervalos de profundidad, sino que ayuda a separar deformaciones someras, reajustes locales y posibles zonas de cizalla más representativas del mecanismo general. Esa información es particularmente valiosa para la construcción del gemelo

digital propuesto, ya que permite vincular el comportamiento observado con la geometría interna del fenómeno.

5.3.4 Aforo de filtraciones

El aforo de filtraciones es una de las cuatro fuentes de datos contempladas para la integración del sistema de auscultación, junto con la topografía, la inclinometría y la piezometría. De hecho, el aforo de lectura manual es una variable que incorporar al sistema centralizado de información y a la posterior explotación analítica.

Su principal interés no radica tanto en caracterizar por sí solo la estabilidad del deslizamiento como en aportar una medida adicional del comportamiento del agua en la zona y, sobre todo, en permitir una lectura conjunta con la piezometría y con la evolución de las obras de drenaje. En otras palabras, el aforo tiene un papel de contraste e interpretación, más que de diagnóstico aislado.



Ilustración 51. Hito HIT001



Ilustración 52. Hito HIT002



Ilustración 53. Hito HIT003



Ilustración 54. Hito HIT004



Ilustración 55. Hito HIT005



Ilustración 56. Hito HIT006



Ilustración 57. Hito HIT007



Ilustración 58. Hito HIT008



Ilustración 59. Hito HIT009



Ilustración 60. Hito HIT010



Ilustración 61. Hito HIT011



Ilustración 62. Hito HIT012



Ilustración 63. Hito HIT013



Ilustración 64. Hito HIT014



Ilustración 65. Hito HIT015



Ilustración 66. Hito HIT121



Ilustración 67. Hito HIT231



Ilustración 68. Hito HIT232



Ilustración 69. Hito HIT233



Ilustración 70. Hito HIT234



Ilustración 71. Hito HIT235



Ilustración 72. Hito HIT341



Ilustración 73. Hito HIT342



Ilustración 74. Hito HIT343



Ilustración 75 Inclinómetro ICLI01



Ilustración 76 Inclinómetro ICLI02



Ilustración 77 Inclinómetro ICLI03



Ilustración 78 Inclinómetro ICLI05



Ilustración 79 Inclinómetro ICLM06



Ilustración 80 Piezómetro PZA001



Ilustración 81 Piezómetro PZA002



Ilustración 82 Piezómetro PZA003



Ilustración 83 Piezómetro PZA004



Ilustración 84 Piezómetro PZA005



Ilustración 85 Piezómetro PZA006



Ilustración 86 Piezómetro PZA007



Ilustración 87 Piezómetro PZA008



Ilustración 88 Piezómetro PZA009



Ilustración 89 Piezómetro PZA010



Ilustración 90 Piezómetro PZA011



Ilustración 91 Piezómetro PZA012



Ilustración 92 Piezómetro PZA013



Ilustración 93 Piezómetro PZA014



Ilustración 94 Piezómetro PZA015



Ilustración 95 Piezómetro PZA016



Ilustración 96 Piezómetro PZA017



Ilustración 97 Piezómetro PZA018



Ilustración 98 Piezómetro PZA019

5.4 OBTENCIÓN DE UMBRALES DE AVISO Y ALARMA

En este apartado se resume el procedimiento seguido para obtener los umbrales de paso entre las condiciones OK-Aviso-Alarma a partir de las tasas obtenidas en la auscultación de la ladera.

El procedimiento seguido no responde a una fórmula automática, sino a una metodología empírica que se apoya en el análisis del histórico, en la separación por técnicas y en la adopción final de valores redondeados y operativos.

La comparación se hace en valor absoluto ya que el signo de la Tasa sirve para identificar el sentido del cambio, pero no debe modificar el nivel de severidad.

Si bien, es habitual el uso de la clasificación de realizada por Cruden y Varnes (Cruden, D. M y Varnes, D. J., 1996), los intervalos propuestos en ella son demasiado amplios como para poder ser representativos en este TFM. Por este motivo, a efectos de este TFM se han calculado estos umbrales. De este modo, se pueden obtener las condiciones de Aviso y Alarma con la suficiente frecuencia como para poder dar por buenos el modelo.

Velocity Class	Description	Velocity (mm/sec)	Typical Velocity
7	Extremely Rapid	5×10^3	5 m/sec
6	Very Rapid	5×10^1	3 m/min
5	Rapid	5×10^{-1}	1.8 m/hr
4	Moderate	5×10^{-3}	13 m/month
3	Slow	5×10^{-5}	1.6 m/year
2	Very Slow	5×10^{-7}	16 mm/year
1	Extremely Slow		

Ilustración 99. Tabla 3-17 (Cruden, D. M y Varnes, D. J., 1996)

5.4.1 Base de datos analizada

Para los valores de Topografía de Alta precisión (RTS), se ha analizado la serie temporal que consta de 1.296 pares de tasas correspondiente a 24 hitos topográficos, separando la componente horizontal (TasasXY) de la vertical (TasasZ) en mm/año.

Para los valores de Inclínometría se han analizado los datos de los cinco inclinómetros existentes con un total de 57.708 valores, separados en TasasA y TasasB en mm/año.

Referente a los valores de Piezometría Abierta, se han revisado un total de 1.406 tasas de los 19 piezómetros existentes.

5.4.2 Procedimientos para definición de umbrales

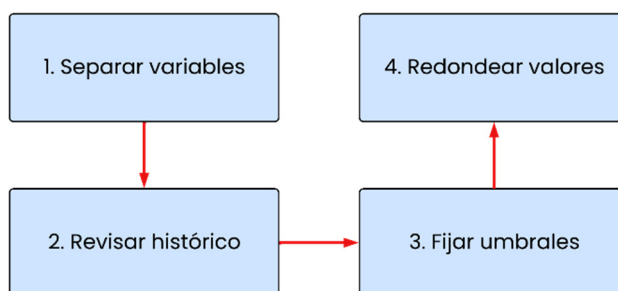


Ilustración 100. Procedimiento para definición de umbrales

El primer paso ha sido separar variables que no tienen el mismo comportamiento físico. En topografía se distinguen Tasas XY y TasasZ, mientras que en inclinometría se mantienen por separado las direcciones A y B de cada piezómetro. De esta forma se evita mezclar magnitudes con rangos naturales diferentes.

El segundo paso ha sido revisar la "envolvente" histórica de cada serie de valores. Para esto se han considerado los máximos y mínimos, y se inspeccionan las colas positivas y negativas de las distribuciones. Como el criterio de decisión es en valor absoluto, el parámetro relevante es la magnitud de la tasa (Tasa en valor absoluto).

El tercer paso es fijar los umbrales de Aviso y Alarma. Aviso se da cuando se superan los valores habituales del comportamiento habitual pero aún están dentro de un rango en el que procede intensificar la vigilancia antes de que la situación se agrave. Alarma es un umbral aún más exigente, reservado para valores poco frecuentes y compatibles con un cambio de régimen claro.

El cuarto paso es redondear los valores elegidos ya que un umbral de operación debe ser claro, repetible y sencillo de aplicar.

5.4.3 Resultados del análisis por técnica

Los resultados obtenidos, apoyándose en los extremos de la serie histórica han sido los siguientes:

Tabla 27. Umbrales para Topografía. Elaboración propia

Serie	Nº valores	Máximo	Mínimo	Aviso	Alarma	% Aviso	% Alarma
Topografía RTS Tasas XY	1.296	199,89	-387,55	>|160|	>|350|	1,39%	0,08%
Topografía RTS Tasas Z	1.296	83,49	-7,00	>|50|	>|60|	1,54%	0,15%

Se observa que la componente horizontal admite tasas mayores que la vertical, por eso los umbrales son distintos. Con esos cortes, el AVISO queda aproximadamente en el percentil 98,6 de Tasas XY y en el 98,5 de Tasas Z, mientras que la ALARMA queda con unos percentiles de 99,92 y 99,85 respectivamente.

Tabla 28. Umbrales para Inclinometría. Elaboración propia

Serie	Nº valores	Máximo	Mínimo	Aviso	Alarma	% Aviso	% Alarma
Inclinómetro ICLI01 Tasa A	3.381	5,93	-6,94	>|4|	>|6|	0,24%	0,06%
Inclinómetro ICLI01 Tasa B	3.381	9,62	-11,34	>|4|	>|6|	0,59%	0,15%
Inclinómetro ICLI02 Tasa A	5.392	10,67	-11,41	>|4|	>|6|	0,26%	0,11%
Inclinómetro ICLI02 Tasa B	5.392	12,43	-11,74	>|4|	>|6|	0,09%	0,04%
Inclinómetro ICLI03 Tasa A	7.350	24,58	-25,98	>|4|	>|6|	1,54%	0,90%
Inclinómetro ICLI03 Tasa B	7.350	12,42	-12,62	>|4|	>|6|	0,88%	0,39%
Inclinómetro ICLI05 Tasa A	5.341	3,88	-5,94	>|4|	>|6|	0,11%	0,00%
Inclinómetro ICLI05 Tasa B	5.341	4,17	-2,87	>|4|	>|6|	0,02%	0,00%
Inclinómetro ICLM06 Tasa A	7.392	8,30	-15,74	>|4|	>|6|	0,11%	0,03%
Inclinómetro ICLM06 Tasa B	7.392	12,78	-10,68	>|4|	>|6|	2,11%	0,55%

En este caso el criterio es homogéneo para todos los inclinómetros y en ambas direcciones. El Análisis de conjunto sitúa el AVISO alrededor del percentil 99,3 y la ALARMA alrededor del 99,7. Esto encaja con la función de la inclinometría, que suele trabajar con tasas pequeñas durante periodos largos y solo debe activar niveles superiores cuando aparece una aceleración clara.

Tabla 29. Umbrales para Piezometría. Elaboración propia

Serie	Nº valores	Máximo	Mínimo	Aviso	Alarma	% Aviso	% Alarma
Piezometría	1.406	9,22	-6,50	>|4|	>|7|	1,28%	0,92%

En PZA los umbrales se fijan en 4 para Aviso y 7 para Alarma, también en valor absoluto. Estos valores quedan muy por encima del comportamiento ordinario y dejan únicamente un número reducido de superaciones históricas. La lógica es razonable: en piezometría interesa filtrar la oscilación habitual y reservar la señal de alerta para cambios hidráulicos marcados, más compatibles con una alteración del régimen de la ladera.

Las tasas, tanto en Topografía como en Inclinometría, se miden en mm/año mientras que la tasa de Piezometría con es una Tasa en sí, sino que es la diferencia de nivel piezométrico entre dos campañas consecutivas.

5.4.4 Conclusión

Los umbrales aquí expuestos deben interpretarse como límites empíricos de explotación, calibrados con el histórico disponible y pensados para traducir la auscultación en una decisión rápida y homogénea.

El cálculo de estos umbrales se ha realizado de esta manera al tratarse de un trabajo académico. En un estudio real, los umbrales se deberán calcular con un estudio más pormenorizado del histórico acompañada de un estudio completo de la ladera y demás factores asociados (Ej. Análisis de estabilidad global con un modelo de elementos finitos tipo PLAXIS 3d).

5.5 ESTUDIO DE DESLIZAMIENTO. INTEGRACIÓN INFRAWORKS – POWER BI

5.5.1 Integración Infraworks – Power BI

El presente apartado describe el procedimiento seguido para convertir el modelo 3D del deslizamiento en una interfaz operativa de consulta y análisis.

En esta fase del trabajo se ha adoptado el software Infraworks de Autodesk como entorno BIM de visualización global del emplazamiento y como puerta de entrada al cuadro de mando desarrollado en Power BI de Microsoft.

Se mantuvo en todo momento la lógica de identificación permanente, trazabilidad y explotación de la información apoyándose en el campo *AssetID*, que actúa como nexo entre el modelo, las tablas de datos y cada una de las páginas analíticas del panel. De esta manera, el visor deja de ser una

representación geométrica para cumplir un función de navegación técnica, ya que posibilita seleccionar un instrumento de auscultación en su posición real y abrir de forma directa la información asociada a su comportamiento reciente.

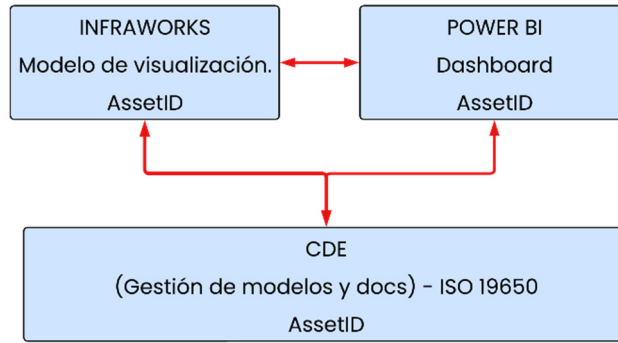


Ilustración 101. Esquema general de integración Infracworks – Power BI. Elaboración propia

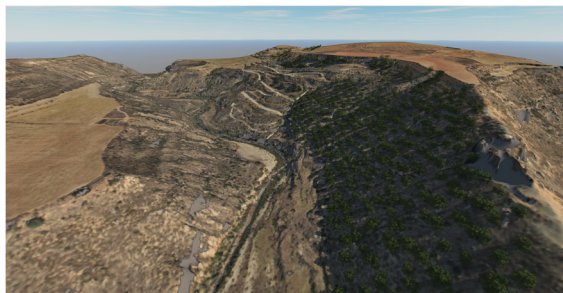


Ilustración 102. Vista general de la cola del embalse en Infracwork. Elaboración propia



Ilustración 103. Vista de parte de la ladera en Infracworks. Elaboración propia

CONTROL - ESTADO GLOBAL DE LA LADERA

Estado Global: **ALERTA** | Sensores en ALERTA: 3 | Sensores en ATENCIÓN: 3 | Sensores Totales: 50 | Última Consulta: 18/02/2026

Técnica	Nº Sensores	OK	Alerta	Atención	Sin Regla
CSA	1	1	0	0	0
PI	1	1	0	0	0
PII	24	24	0	0	0
PIV	5	5	0	0	0
PIA	19	19	0	0	0

Incidencias Activas

AssetID	Nombre	Técnique	Estado	Última Fecha	Variable Crítica	Valor
B000-PII-026	PII 026	PII	ATENCIÓN	18/02/2026	Tasa 30 (mm/mic)	400.0
B000-PII-027	PII 027	PII	ATENCIÓN	18/02/2026	Tasa 30 (mm/mic)	3.0
B000-PII-028	PII 028	PII	ATENCIÓN	18/02/2026	Tasa 2 (mm/mic)	50.0
B000-PII-029	PII 029	PII	ALERTA	18/02/2026	Tasa 1 (mm/mic)	5.0
B000-PII-030	PII 030	PII	ATENCIÓN	18/02/2026	Tasa 7 (mm)	0.0

Ilustración 104. Página principal Cuadro de mando. Elaboración propia

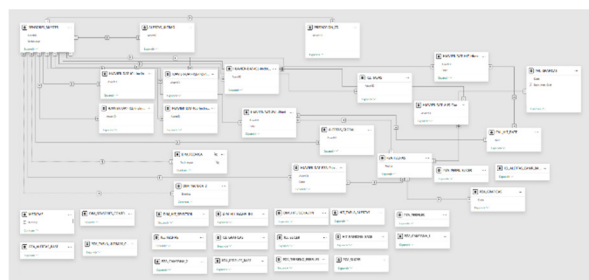


Ilustración 105. Modelo de datos de Power BI. Elaboración propia

5.5.2 Encaje del bloque dentro de la metodología general

Dentro de la arquitectura propuesta en el capítulo metodológico, esta fase se sitúa en el punto en el que el inventario BIM, la normalización de datos y la capa de explotación dejan de ser piezas separadas y empiezan a funcionar de forma coordinada. La memoria ya preveía que el modelo BIM

no debía cargarse con todo el histórico de observaciones, sino actuar como índice espacial de los instrumentos y como soporte de consulta, mientras que el repositorio temporal debía quedar en las tablas de datos y en sus procesos ETL y QA/QC. Esa separación conceptual es importante porque evita que el modelo territorial se convierta en un contenedor pesado y, al mismo tiempo, hace posible una explotación analítica mucho más flexible.

La metodología propuesta definía, como condición mínima, un conjunto de propiedades BIM para cada objeto de instrumentación: identificador único, tipología, coordenadas, frecuencia y enlace a datos. En el desarrollo real del apartado 5.4.1 esas propiedades se convirtieron en requisitos operativos. InfraWorks asumió la función de visor general de la ladera y de sus elementos, mientras que Power BI se utilizó como superficie de explotación para sintetizar estado, consultar campañas y comparar series. En otras palabras, el modelo no se diseñó para competir con el cuadro de mando, sino para conducir al técnico hasta la vista exacta que necesitaba en cada revisión.

Este encaje también responde a la lógica de la auscultación en laderas inestables descrita en los capítulos previos. La información relevante no se limita a una sola técnica y tampoco puede interpretarse únicamente con una tabla simple. En el caso estudiado era necesario combinar topografía de precisión, inclinometría, piezometría y variables de contexto, especialmente nivel del embalse y precipitación. La integración InfraWorks - Power BI resolvió esa necesidad desde una perspectiva práctica: el modelo territorial aporta la localización y la relación geométrica entre instrumentos, mientras que Power BI permite pasar del objeto seleccionado a sus series históricas y a una lectura rápida del estado operativo.

Tabla 30. Composición integración Infracworks – Power BI. Elaboración propia

Elemento	Papel en el sistema	Resultado
Infraworks	Visor territorial y punto de acceso al activo	Selección espacial del sensor y apertura del panel en su contexto
CDE en OneDrive	Repositorio común de tablas, archivos y revisiones	Repetibilidad del flujo y control de versiones
Power Query / Power BI	Normalización, unión de tablas y medidas	Lectura estable de campañas, estados y filtros
Panel Power BI Service	Capa de explotación final	Consulta técnica, alerta, navegación y apoyo a decisión

5.5.3 Criterios de diseño adoptados antes de construir las páginas

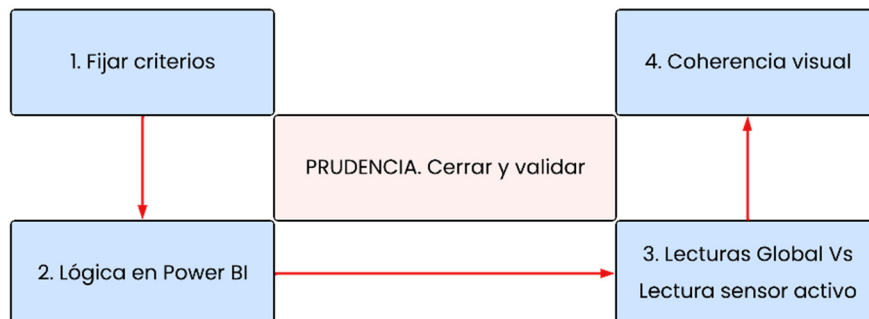


Ilustración 106. Criterios generales. Elaboración propia

Un primer paso antes de empezar a montar visuales fue fijar varios criterios que condicionaron todo el desarrollo posterior. El primero fue mantener un identificador único y estable para cada activo. Esto significó que siempre se utilizó el *AssetID*, tanto en las tablas maestras como en los enlaces desde el modelo y en las medidas DAX. Con este criterio se evitó tener ambigüedades, hizo viable la navegación por URL y permitió que cada técnica se tratara con independencia sin perder la trazabilidad común del sistema.

El segundo criterio fue concentrar la mayor parte posible de la lógica en Power BI. Se optó por reducir al mínimo los cálculos externos y dejar en las tablas de origen únicamente la información imprescindible de campaña, reservando a Power Query y a DAX la construcción del modelo analítico. Esta decisión fue muy útil cuando aparecieron problemas de filtrado y de tipos de dato, ya que permitió corregir el comportamiento del informe sin tener que rehacer continuamente los archivos fuente ni abrir múltiples ramas de trabajo fuera del panel.

El tercer criterio, quizá el más importante para entender el procedimiento, fue separar siempre la lectura global de la ladera de la lectura del sensor activo. Cuando se abre un cuadro de mando desde un objeto concreto del modelo existe una tendencia natural a que todo el informe quede secuestrado por ese filtro inicial. Si no se corrige, la página deja de ser una herramienta de explotación del conjunto y se convierte en un informe parcial del elemento pulsado. Por ello, en cada página se decidió de antemano qué visuales debían responder al activo seleccionado y cuáles debían mantenerse globales dentro del periodo visible.

Un cuarto criterio fue conservar una coherencia visual y funcional entre páginas. Esto no se planteó como una cuestión estética, sino como una decisión operativa. En un trabajo de auscultación, el usuario debe reconocer rápidamente la estructura del panel, saber dónde está el estado actual, dónde se cambia el sensor y dónde se sitúan las tablas o rankings de revisión. Por esa razón, la página CONTROL sirvió de base de lenguaje visual para las páginas específicas de Topografía (HIT), Inclínometría (ICL) y Piezometría (PZA), y cada nuevo bloque se construyó por duplicación y adaptación progresiva, no desde cero.

Por último, se adoptó una regla de prudencia: una vez que una página quedaba cerrada y validada, no se volvía atrás salvo para correcciones menores. La carga de trabajo y el número de interacciones entre visuales hacían muy arriesgado reabrir páginas completas. En consecuencia, el desarrollo avanzó por bloques cerrados, documentando en cada caso el estado de partida, el problema principal detectado, la solución adoptada y las comprobaciones finales.

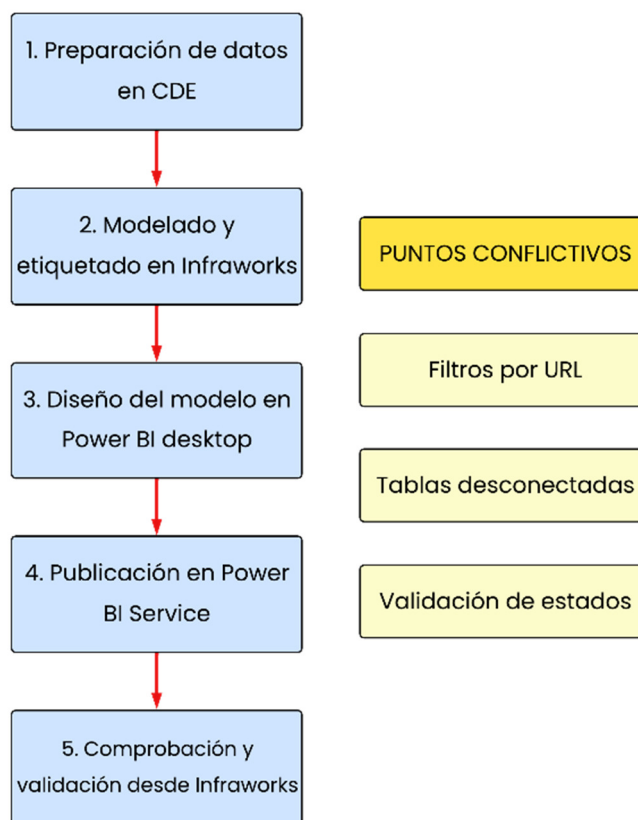


Ilustración 107. Flujo de trabajo del bloque. Elaboración propia

5.5.4 Organización del CDE y preparación de la base de datos de trabajo

La base de esta integración no fue una conexión improvisada entre un modelo 3D y un informe, sino una estructura de datos muy concreta organizada en el CDE del proyecto. Los archivos de trabajo se almacenaron en OneDrive bajo una ruta única de proyecto, de forma que la actualización de tablas, el acceso desde Power BI Desktop y la trazabilidad de revisiones se mantuvieran centralizados. Este aspecto, que puede parecer administrativo, fue en realidad decisivo. Sin una ubicación estable de las fuentes resulta muy difícil garantizar que las páginas de explotación sigan siendo reproducibles cuando se actualizan campañas o se revisa una lógica de cálculo semanas después.

La tabla central del sistema fue *SENSORES_MASTER*, concebida como tabla maestra de inventario. En ella se recogieron para cada instrumento el *AssetID*, el nombre corto, la técnica, las coordenadas y la cota. En determinadas fases también se incorporaron campos URL para dirigir a páginas concretas del panel. La función de esta tabla fue doble. Por un lado, aportó el inventario común con el que todas las técnicas podían leerse bajo el mismo marco. Por otro, sirvió como puente entre el modelo territorial y los datos temporales, ya que sobre ella se apoyaban tanto los filtros por *AssetID* como buena parte de las medidas de contexto del informe.

A partir de esa tabla maestra se organizaron los ficheros por técnica. En topografía de precisión se trabajó con una tabla de hitos que incluía incrementales y tasas en XY y Z. En piezometría abierta se utilizó una tabla con niveles y tasas de variación entre campañas. En inclinometría se partió de varios CSV independientes, uno por sondeo, que posteriormente se consolidaron en una única tabla de trabajo. Además, se incorporaron series auxiliares, como precipitación y nivel de embalse, que no pertenecían a un sensor individual, pero eran imprescindibles para interpretar el comportamiento de la ladera.

Desde el punto de vista metodológico, la organización del CDE permitió mantener un criterio constante: el dato bruto se almacena, el dato transformado se gobierna en Power BI y el modelo BIM solo mantiene aquello que necesita para identificar y localizar. Esta separación fue la condición necesaria para que la integración InfraWorks - Power BI no dependiera de operaciones manuales repetitivas y para que el cuadro de mando pudiera crecer por páginas sin perder coherencia.

Tabla 31. Contenido de tablas y usos. Elaboración propia

Tabla o fichero	Contenido principal	Uso dentro de Power BI
SENSORES_MASTER	Inventario maestro de activos, técnica y coordenadas	Tabla de referencia común y puente de filtrado
HJAVIER-DAT-HIT-Hitos_Top-0001	Lecturas de hitos topográficos, incrementales y tasas	Páginas gráficas y de alertas de HIT
HJAVIER-DAT-PZA-Piezometros_Abiertos-0001	Niveles piezométricos, embalse y tasas	Páginas gráficas y de alertas de PZA
ICL_TASAS	Consolidación de inclinómetros I1, I2, I3, I5 y M6	Páginas gráficas y de alertas de ICL
HJAVIER-DAT-PVL-Pluviometria_NivEmb-0001	Precipitación y variables de contexto hidráulico	Contextualización de gráficas y perfiles

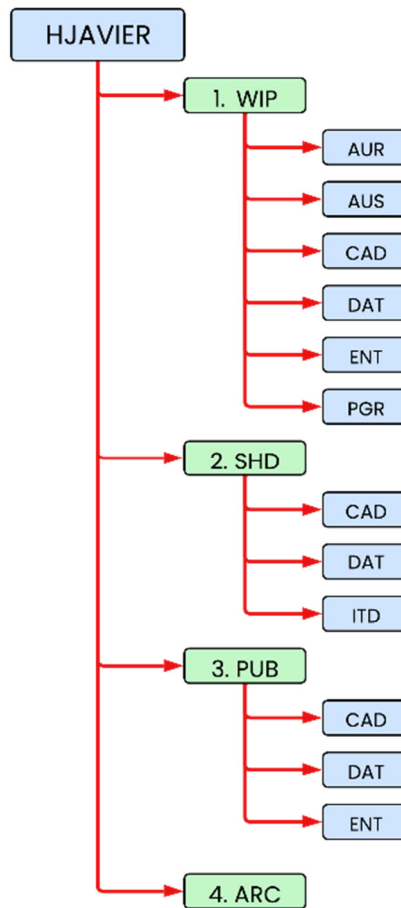


Ilustración 108. Árbol de carpetas principales del CDE. Elaboración propia

5.5.5 Construcción del modelo en InfraWorks y definición de los objetos sensor

Una vez fijado el inventario y la estructura de datos, el siguiente paso consistió en utilizar InfraWorks como visor principal del emplazamiento. Su aportación no se limitó a mostrar el terreno o las infraestructuras existentes, sino a situar cada elemento de auscultación en su posición real dentro de la ladera y del embalse. Con ello se consiguió que la consulta de datos no arrancase desde una tabla abstracta, sino desde un contexto espacial comprensible. Para un técnico que revisa un deslizamiento, no es lo mismo seleccionar un código en un filtro que localizar el instrumento sobre el terreno, entender si se encuentra en coronación, pie, cuerpo del movimiento o zona próxima al embalse y, a partir de ahí, abrir su información temporal.

Desde el punto de vista operativo, el papel de InfraWorks fue el de índice espacial y navegador. El técnico puede revisar el entorno, distinguir las distintas técnicas de auscultación y acceder al cuadro de mando desde la propia escena del modelo. Esa operación reproduce exactamente la intención que ya se había planteado en la metodología del TFM: el modelo debe informar de la ubicación y del tipo de elemento, mientras que la lectura temporal y el diagnóstico se resuelven fuera del modelo, en una capa analítica específica. La integración, por tanto, no persigue convertir a InfraWorks en un software de analítica, sino aprovechar su capacidad para organizar la escena territorial y conducir al usuario hasta la vista correcta de Power BI.

Esta distinción resulta especialmente importante en un caso como el presente, donde conviven sensores superficiales, sensores subsuperficiales y variables de contexto no vinculadas a un único activo. El modelo territorial tiene que seguir siendo legible y útil. Si se pretendiera incorporar en él todas las tablas de campaña, todas las tasas y todas las lógicas de semáforo, el resultado sería poco manejable. Al mantener solo los atributos estructurales y las referencias de navegación, el modelo conserva claridad y a la vez gana valor como interfaz de consulta.

También conviene destacar que el paso a InfraWorks refuerza la dimensión territorial. Frente a un entorno puramente de detalle geométrico, este visor permite explicar mejor la relación entre la ladera, el embalse, las vías de acceso y el conjunto de instrumentos. Esa lectura territorial es valiosa en las capturas que acompañarán a este apartado, ya que ayuda a entender que la explotación de datos no se hizo al margen del territorio, sino apoyada en una representación integrada del sistema real.

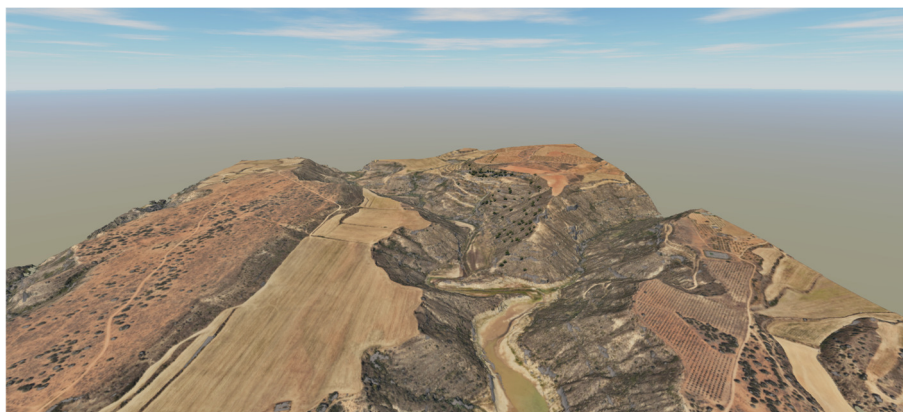


Ilustración 109. Vista general del modelo en Infracore. Elaboración propia

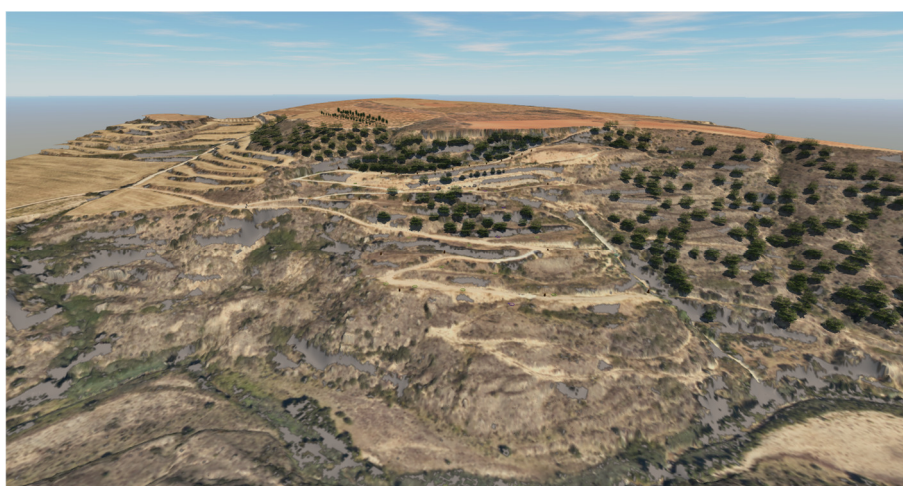


Ilustración 110. Vista de la ladera en Infracore. Elaboración propia



Ilustración 111. Vista detallada del modelo en Infracore. Elaboración propia

5.5.6 Estrategia de enlace entre InfraWorks y Power BI mediante AssetID

La conexión entre el visor BIM y el cuadro de mando se resolvió a partir de una idea simple: cualquier selección espacial en el modelo debe convertirse en una llamada inequívoca al informe de Power BI. Para ello se adoptó el filtrado por URL del servicio de Power BI, utilizando el *AssetID* del sensor como parámetro de contexto. La lógica es directa: el usuario selecciona un activo en el modelo, InfraWorks transmite o invoca la URL correspondiente y el informe se abre ya filtrado para ese activo. Esta solución fue preferible a otras más complejas porque resulta robusta, trazable y fácil de mantener cuando se actualizan tablas o se añaden nuevas páginas



Ilustración 112. Conexión Infracworks – Power BI Service mediante AssetID. Elaboración propia

La ventaja principal del filtrado por URL es que no necesita duplicar informes ni generar un panel distinto para cada instrumento. Un único informe puede atender a todo el inventario, siempre que el modelo de datos esté bien construido. Además, esta estrategia es plenamente coherente con la definición metodológica, en la que el *DataLink* o vínculo a datos forma parte de las propiedades mínimas del objeto de instrumentación. En otras palabras, el enlace no se añade como un truco de última hora, sino como una consecuencia natural del modo en que se había concebido la interoperabilidad BIM - base de datos desde la fase teórica.

Esta decisión arrastró una dificultad importante. Cuando Power BI recibe el *AssetID* desde la URL, ese filtro entra en el informe con mucha fuerza y tiende a afectar a todas las tablas relacionadas. El

resultado inmediato es que determinadas tarjetas, matrices o rankings que deberían permanecer globales se vacían o pasan a mostrar solo el sensor abierto desde el modelo. La manera de neutralizarlo fue mediante *REMOVEFILTERS*, *TREATAS*, tablas desconectadas o medidas específicas.

La estrategia de enlace puede resumirse en dos niveles:

1. Abrir el informe correcto en el contexto correcto.
2. Controlar ese contexto una vez que el informe ya está abierto.

Solo cuando ambos niveles funcionan al mismo tiempo puede afirmarse que la integración InfraWorks - Power BI está resuelta de forma operativa.

CONTROL - ESTADO GLOBAL DE LA LADERA

Alerta Global: **ALERTA** Sensores en ALERTA: 3 Sensores en AVISO: 3 Sensores Totales: 50 Última Campaña: 18/02/2026

Técnica	Nº Sensores	OK	Alerta	Aviso	Sin Regla
ATM	1				1
PVL	1				1
HT	24	1	1	1	
ICL	1				
PZA	19				

Sensor Seleccionado

AssetID: EDOXHUIT24
 Nombre: HIT343
 Técnica: HT
 Estado: **AVISO**
 Última Lectura: 12/02/2026
 Sensor filtrado desde Chv ID

AssetID	Nombre	Técnica	Estado	Última Fecha	Variable Crítica	Valor
EDOXHUIT24	HIT343	HT	AVISO	12/02/2026	Tasa XY (mm/año)	200,0
EDOXHICL01	ICL01	ICL	AVISO	17/02/2026	Tasa Y (mm/año)	5,4
EDOXHITHT03	HIT342	HT	AVISO	12/02/2026	Tasa Z (mm/año)	50,8
EDOXHICL406	ICL406	ICL	ALERTA	18/02/2026	Tasa Y (mm/año)	6,1
EDOXHPPZA008	PPZA008	PZA	AVISO	18/02/2026	Tasa Z (m)	8,4

En Infraworks doble clic en el sensor

ALERTAS TOPOGRAFÍA (HIT)

AssetID: EDOXHUHIT024 Nombre: HIT343 Estado XY: AVISO Estado Z: OK Última Campaña: 12/02/2026

Tabla de Últimas Campaña

Fecha	AssetID	Nombre	Inc. XY (mm)	Tasa XY (mm/año)	Estado XY	Inc. Z (mm)	Tasa Z (mm/año)	Estado Z	N.º Emb.
01/03/2025	EDOXHUIT24	HIT343	0,87	3,31	OK	41,10	94,01	OK	577,05
01/09/2025	EDOXHUIT24	HIT343	0,50	-2,23	OK	11,40	34,00	OK	577,48
01/07/2025	EDOXHUIT24	HIT343	0,32	-1,97	OK	-0,40	34,02	OK	577,32
04/06/2025	EDOXHUIT24	HIT343	1,14	9,11	OK	2,10	33,04	OK	576,40
03/09/2025	EDOXHUIT24	HIT343	1,33	2,36	OK	4,10	30,83	OK	575,47
01/11/2025	EDOXHUIT24	HIT343	0,28	-10,71	OK	1,40	28,54	OK	574,98
01/11/2025	EDOXHUIT24	HIT343	1,24	10,55	OK	1,40	31,14	OK	574,83
01/12/2025	EDOXHUIT24	HIT343	0,73	-4,19	OK	2,30	30,01	OK	575,09
13/01/2026	EDOXHUIT24	HIT343	0,86	1,21	OK	0,10	48,07	OK	575,73
12/02/2026	EDOXHUIT24	HIT343	48,73	200,00	AVISO	47,90	10,00	OK	579,74

Podemos navegar hasta la página GRÁFICAS-HIT del sensor seleccionado en Infraworks

ALERTAS TOPOGRAFÍA (HIT)

AssetID: EDOXHUHIT017 Nombre: HIT231 Estado XY: OK Estado Z: OK Última Campaña: 12/02/2026

Tabla de Últimas Campaña

Fecha	AssetID	Nombre	Inc. XY (mm)	Tasa XY (mm/año)	Estado XY	Inc. Z (mm)	Tasa Z (mm/año)	Estado Z	N.º Emb.
01/03/2025	EDOXHIT017	HIT231	2,63	6,33	OK	1,90	44,12	OK	577,05
29/05/2025	EDOXHIT017	HIT231	0,50	-27,70	OK	1,40	35,00	OK	577,48
02/07/2025	EDOXHIT017	HIT231	0,32	-1,97	OK	-4,30	34,47	OK	577,32
04/06/2025	EDOXHIT017	HIT231	2,51	24,62	OK	1,40	33,71	OK	576,40
03/09/2025	EDOXHIT017	HIT231	2,06	-5,44	OK	1,40	30,27	OK	575,47
01/11/2025	EDOXHIT017	HIT231	0,33	-23,59	OK	6,40	28,02	OK	574,98
01/11/2025	EDOXHIT017	HIT231	0,85	6,96	OK	0,60	33,02	OK	574,83
01/12/2025	EDOXHIT017	HIT231	0,96	-4,01	OK	1,30	30,01	OK	575,09
13/01/2026	EDOXHIT017	HIT231	0,91	4,97	OK	1,40	40,08	OK	575,73
12/02/2026	EDOXHIT017	HIT231	1,75	9,90	OK	1,10	31,00	OK	579,74

Podemos cambiar el sensor sin necesidad de volver a Infraworks

ALERTAS TOPOGRAFÍA (HIT)

AssetID: EDOXHUHIT017 Nombre: HIT231 Estado XY: OK Estado Z: OK Última Campaña: 13/02/2025

Tabla de Últimas Campaña

Fecha	AssetID	Nombre	Inc. XY (mm)	Tasa XY (mm/año)	Estado XY	Inc. Z (mm)	Tasa Z (mm/año)	Estado Z	N.º Emb.
24/06/2024	EDOXHIT017	HIT231	2,41	49,10	OK	1,40	11,51	OK	560,57
13/07/2024	EDOXHIT017	HIT231	5,05	33,23	OK	0,20	29,03	OK	559,89
05/08/2024	EDOXHIT017	HIT231	1,72	-93,45	OK	2,40	13,26	OK	558,41
20/09/2024	EDOXHIT017	HIT231	1,73	0,14	OK	4,70	15,84	OK	556,38
12/09/2024	EDOXHIT017	HIT231	0,85	-13,84	OK	1,40	21,36	OK	553,80
07/10/2024	EDOXHIT017	HIT231	1,84	14,65	OK	2,40	25,29	OK	554,95
10/11/2024	EDOXHIT017	HIT231	3,42	14,02	OK	4,50	36,06	OK	560,90
19/12/2024	EDOXHIT017	HIT231	4,00	6,82	OK	4,40	32,25	OK	563,24
19/01/2025	EDOXHIT017	HIT231	1,30	-96,53	OK	1,30	29,84	OK	564,69
15/03/2025	EDOXHIT017	HIT231	1,12	-0,88	OK	1,40	34,32	OK	565,37

Ilustración 113. Procedimiento de acceso a los datos. Elaboración propia

5.5.7 Construcción del modelo analítico en Power BI Desktop

Con la capa de enlace definida, el siguiente bloque de trabajo se centró en levantar un modelo analítico que fuese estable ante filtros, suficientemente claro para el usuario y, al mismo tiempo, flexible para crecer por técnicas y por páginas. El primer paso consistió en ordenar el panel de campos y reservar una tabla específica para medidas. Esta tabla no aportaba datos por sí misma, pero sí permitió centralizar la lógica DAX y mantener una estructura más limpia del informe. En desarrollos con un número elevado de medidas, esta decisión reduce errores y simplifica mucho la revisión posterior.

A continuación, se abordó la consolidación de tablas por técnica. El caso más significativo fue la inclinometría, que inicialmente llegaba en cinco CSV independientes. Trabajar cada sondeo como una tabla separada habría obligado a duplicar medidas, visuales y buena parte de la lógica de estados. Por esa razón se optó por anexar todas las consultas en una tabla única, ICL_TASAS, que pasó a ser la base de trabajo para la construcción de páginas gráficas y de alerta. Esta operación condicionó toda la estabilidad posterior del sistema porque permitió tratar los inclinómetros como una familia de activos homogénea dentro del informe.

Otro bloque esencial del modelo fueron las tablas auxiliares y desconectadas. En las distintas técnicas aparecieron tablas de *slicer*, tablas de fechas y tablas específicas para alimentar visuales problemáticos. Su función era evitar que la relación directa con la tabla base quedara secuestrada por el filtro inicial del *AssetID*. Así surgieron, por ejemplo, estructuras como DIM_TECNICA_2 para CONTROL, HIT_TABLA_ALERTAS para la tabla de campañas de ALERTAS_HIT, ICL_GRAFICAS e ICL_FECHAS para las páginas de inclinometría, o PZA_GRAFICAS y las tablas de perfiles para las páginas de piezometría. Todas ellas responden a la misma filosofía: cuando una tabla de origen no permite controlar bien el contexto, se crea una tabla auxiliar y se gobierna el paso de filtros mediante medidas explícitas.

La construcción del modelo también exigió revisar cuidadosamente tipos de dato, nombres de columnas y granularidad de las tablas. Un error paradigmático se produjo con determinadas tasas inclinométricas que habían entrado como texto. El problema no siempre se manifestaba en Desktop, pero sí afloraba al abrir el informe filtrado desde el modelo, generando mensajes de conversión de texto a número. La solución pasó por corregir el tipo de dato en Power Query y revisar,

cuando fue necesario, la configuración regional. Del mismo modo, en páginas de alertas se comprobó que no bastaba con tener la tabla correcta: también era necesario trabajar a la granularidad adecuada, evitando duplicidades por profundidad o por campaña según la lógica del visual.

Sobre este modelo se fueron definiendo medidas de activo, medidas de estado, contadores globales, filtros de visual y rankings. Las medidas de activo, como Sensor_AssetID o sus equivalentes por técnica, se diseñaron con una jerarquía muy clara: primero debía prevalecer lo seleccionado manualmente en el *slicer* y, solo si no existía esa selección, se tomaba el AssetID entrante desde el modelo de Infracworks. Esta regla se convirtió en uno de los patrones más valiosos del desarrollo, porque permitió que el informe siguiera siendo navegable una vez abierto desde InfraWorks.

En paralelo, se fijaron los umbrales operativos por técnica. Para los hitos topográficos se trabajó con el peor caso entre XY y Z; para inclinometría, con el peor caso entre los ejes A y B; y para piezometría abierta, con la variación entre campañas. Se descartó utilizar directamente clasificaciones generales como las de Cruden y Varnes para la operación diaria, ya que sus rangos resultaban demasiado amplios para el comportamiento real del caso de estudio. La decisión fue construir semáforos más ajustados a la sensibilidad del sistema y expresarlos de forma clara dentro del panel. Todo esto se explica con más detenimiento en el capítulo 5.4 de este documento.

Tabla 32. Ejemplos de tablas empleadas. Elaboración propia

Familia de tabla	Ejemplos empleados	Motivo de creación
Tablas base	SENSORES_MASTER, ICL_TASAS, tablas HIT y PZA	Recoger el dato principal de inventario o campaña
Tablas de slicer	ICL_SLICER, PZA_SLICER, selectores de hito	Permitir cambio manual del activo aun entrando filtrado desde InfraWorks
Tablas de fechas	CAL_HIT_DATE, ICL_FECHAS, PZA_FECHAS	Controlar el periodo visible con independencia de la tabla original
Tablas desconectadas de visual	HIT_TABLA_ALERTAS, ICL_GRAFICAS, PZA_GRAFICAS	Evitar bloqueo del visual por el filtro entrante de URL
Tablas resumen para alertas	ICL_ALERTAS_CAMP_BASE, PZA_ALERTAS_BASE	Trabajar a una granularidad estable por campaña o por activo

Tabla 33. Umbrales. Elaboración propia

Técnica	Variabl ² crítica	Umbral d ² aviso	Umbral d ² al ² rta	Crit ² rio final
HIT	TasasXY / TasasZ	>=160 mm/año en XY o >=50 mm/año en Z	>=350 mm/año en XY o >=60 mm/año en Z	Peor caso entre XY y Z

Técnica	Variable crítica	Umbral de aviso	Umbral de alerta	Criterio final
ICL	TasasX / TasasY	>4 mm/año	>6 mm/año	Peor caso entre A(X) y B(Y)
PZA	TasasZ entre campañas	>=4 m	>=7 m	Estado según valor absoluto de la variación

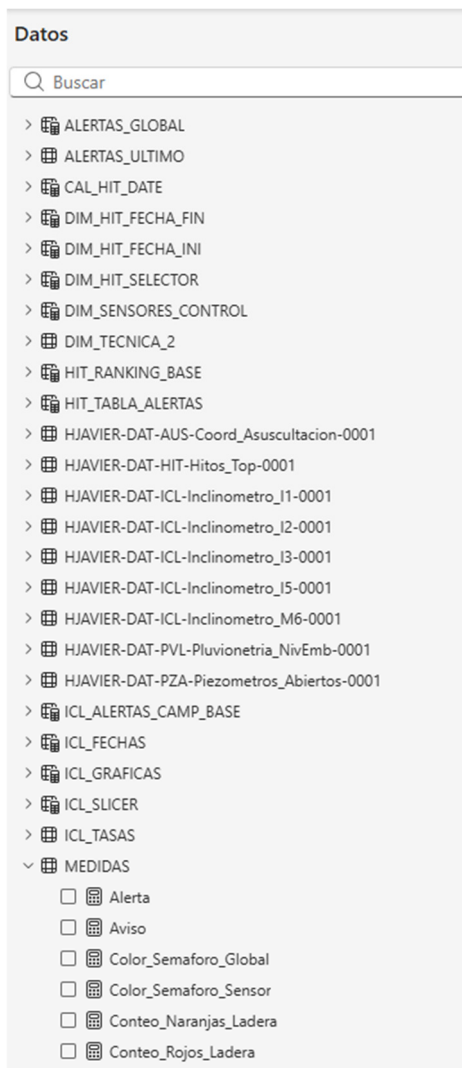


Ilustración 114. Algunas tablas y medidas en Power BI. Elaboración propia

visual no era estable. Y en tercer lugar, estableció una estética común basada en semáforos, tarjetas superiores, navegación inferior y jerarquía clara de lectura, que se mantuvo en las páginas posteriores.



Ilustración 116. Vista de la página CONTROL accediendo desde Infracore a través del HIT006. Elaboración propia

5.5.9 Desarrollo de las páginas GRAFICAS_HIT y ALERTAS_HIT

Superada la puerta de entrada, el siguiente paso fue construir la explotación específica para hitos topográficos. La página GRAFICAS_HIT se planteó como una vista analítica de series temporales, orientada a comparar la respuesta del hito con dos variables hidráulicas especialmente relevantes en una ladera de embalse: el nivel del embalse y la precipitación. La cabecera recoge el identificador del hito, su nombre, el estado en XY, el estado en Z, el selector manual del activo y el filtro temporal. Debajo se dispuso una retícula de cuatro gráficas que combinan movimiento horizontal y vertical con embalse y lluvia.

La decisión técnica más importante en esta página fue separar la capa de interpretación gráfica de la capa de estado. En las gráficas no se representaron tasas, sino incrementales entre campañas, ya que son los valores que mejor muestran la respuesta observada entre una fecha y la siguiente. Los estados de la cabecera, en cambio, sí se calcularon con tasas anuales equivalentes. Esta separación permitió que la página funcionase a dos velocidades: una lectura analítica detallada para revisar la

evolución del hito y una lectura operativa rápida para detectar si el sensor había entrado en aviso o en alarma.

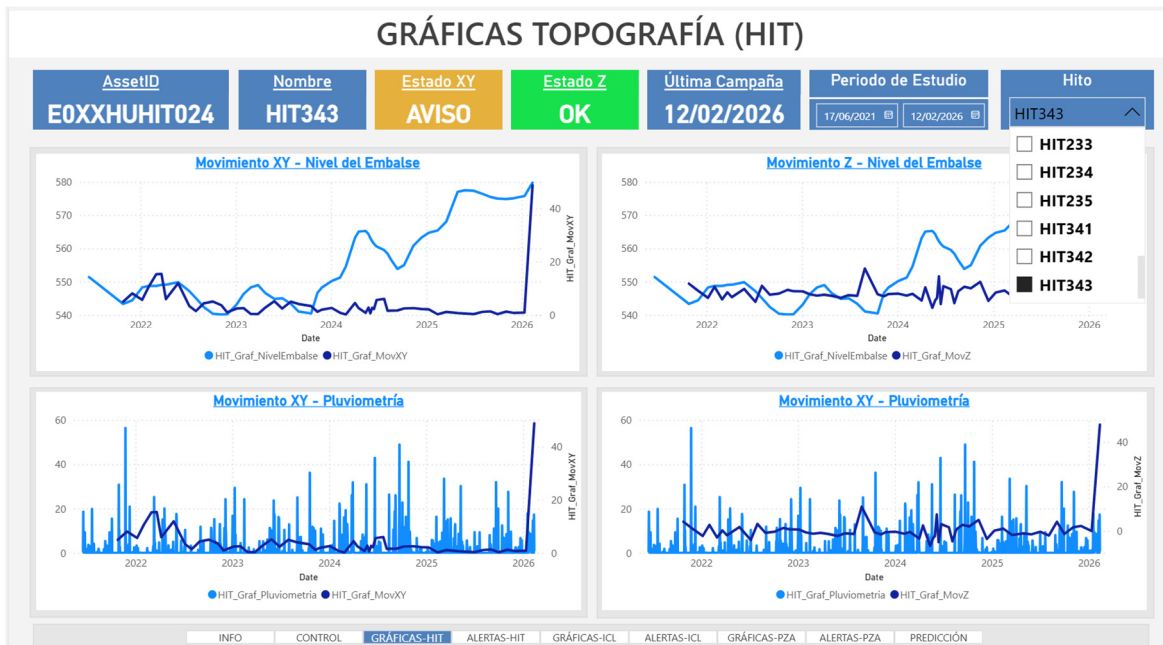


Ilustración 117. Vista de la página GRÁFICAS-HIT seleccionando en el slicer el HIT343. Elaboración propia

La página ALERTAS_HIT nació como complemento de la anterior, ya no para interpretar gráficas sino para priorizar revisiones. Su estructura final combinó una tabla de las últimas campañas visibles del hito activo, un ranking de los cinco hitos más comprometidos y varias tarjetas de síntesis con el número de hitos en alarma, aviso y OK. El aspecto clave aquí fue construir una tabla desconectada específica, HIT_TABLA_ALERTAS, porque la tabla original no respondía de forma fiable cuando se combinaban filtro temporal, filtro por activo y limitación a las diez campañas más recientes.

En esta página quedó especialmente clara la necesidad de distinguir entre un bloque del activo seleccionado y un bloque global del periodo. La cabecera y la tabla de campañas responden al hito abierto desde InfraWorks o escogido en el slicer. En cambio, el ranking y las tarjetas inferiores representan el estado general de los hitos dentro del periodo visible. La estabilidad se consiguió trasladando el contexto temporal con TREATAS y construyendo medidas de filtro específicas para el hito activo y para el recorte a las campañas más recientes. Con ello, la página pudo cumplir un doble cometido: revisión técnica del instrumento y priorización operativa del conjunto.

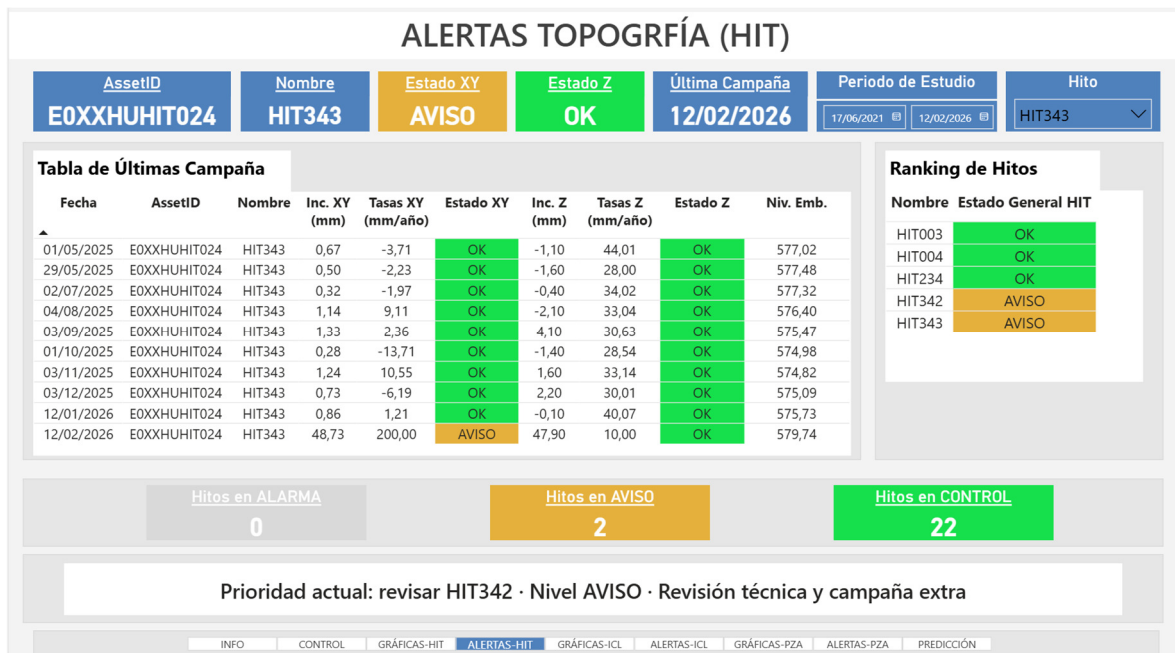


Ilustración 118. Vista de la página ALERTAS-HIT seleccionando en el slicer el HIT343. Elaboración propia

5.5.10 Desarrollo de las páginas GRAFICAS ICL y ALERTAS ICL

La explotación de inclinometría exigió un tratamiento distinto al de los hitos, porque la variable fundamental ya no era una serie temporal simple por campaña, sino una deformación distribuida en profundidad. Por esa razón, la página GRAFICAS_ICL se diseñó con una cabecera superior similar a la de otras técnicas, pero con una zona principal formada por cuatro gráficas: incremental A, acumulativo A, incremental B y acumulativo B. La correspondencia adoptada fue A = eje X y B = eje Y, manteniendo la nomenclatura visual de la página, aunque las tablas de origen conservaran sus nombres originales.

La inclinometría obligó a construir cálculos específicos de cota absoluta y de curvas acumuladas. A partir de la cota de coronación y de la profundidad de cada lectura se generó una referencia vertical homogénea para todas las gráficas. Después se calcularon acumulados por campaña, sumando incrementales a lo largo de la profundidad. Este paso era imprescindible para que las curvas tuviesen sentido geotécnico y para que la comparación entre campañas mostrara con claridad si la deformación se concentraba en una zona concreta o si afectaba de forma más distribuida a la columna medida.

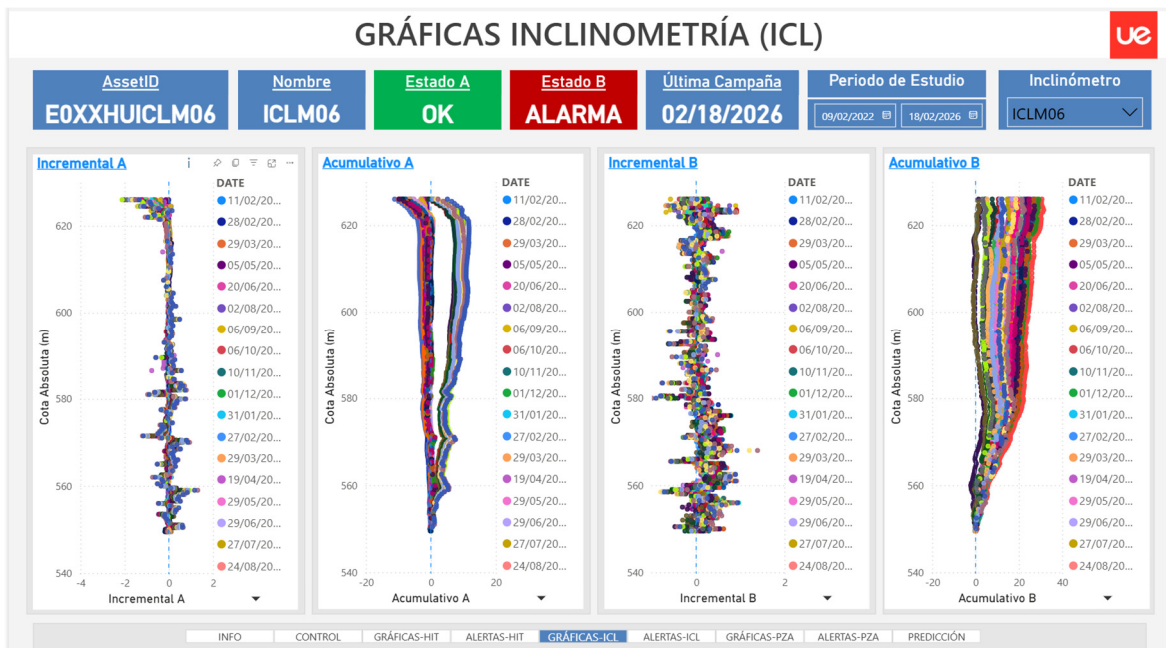


Ilustración 119. Vista de la página GRÁFICAS-ICL seleccionando en el slicer el ICLM06. Elaboración propia

La página ALERTAS_ICL reutilizó la maqueta general de alertas, pero exigió una solución todavía más elaborada por la presencia de múltiples profundidades por campaña. Ni la tabla original ni la tabla gráfica servían directamente para construir rankings o tablas de últimas campañas, porque ambas repetían filas para un mismo *AssetID* y una misma fecha. La salida fue crear una tabla resumen intermedia, ICL_ALERTAS_CAMP_BASE, con una sola fila por activo y por campaña. Sobre esa base se calcularon las tasas críticas de cada eje, el estado A, el estado B, el estado global de campaña y una severidad numérica que permitía ordenar el ranking y contar estados con estabilidad.

En ALERTAS_ICL se consolidó, además, una separación funcional muy clara. La cabecera y la tabla izquierda dependen del inclinómetro activo. El ranking, las tarjetas inferiores y el resumen textual describen la situación general de los ICL dentro del periodo. Este patrón fue especialmente útil para la revisión técnica, ya que permitía entrar desde un sondeo concreto en InfraWorks, comprobar su última campaña visible y, al mismo tiempo, saber si el resto de inclinómetros estaban mostrando un comportamiento más comprometido. Desde el punto de vista de la explotación real, esta simultaneidad entre detalle y contexto es una de las grandes ventajas de la integración desarrollada.

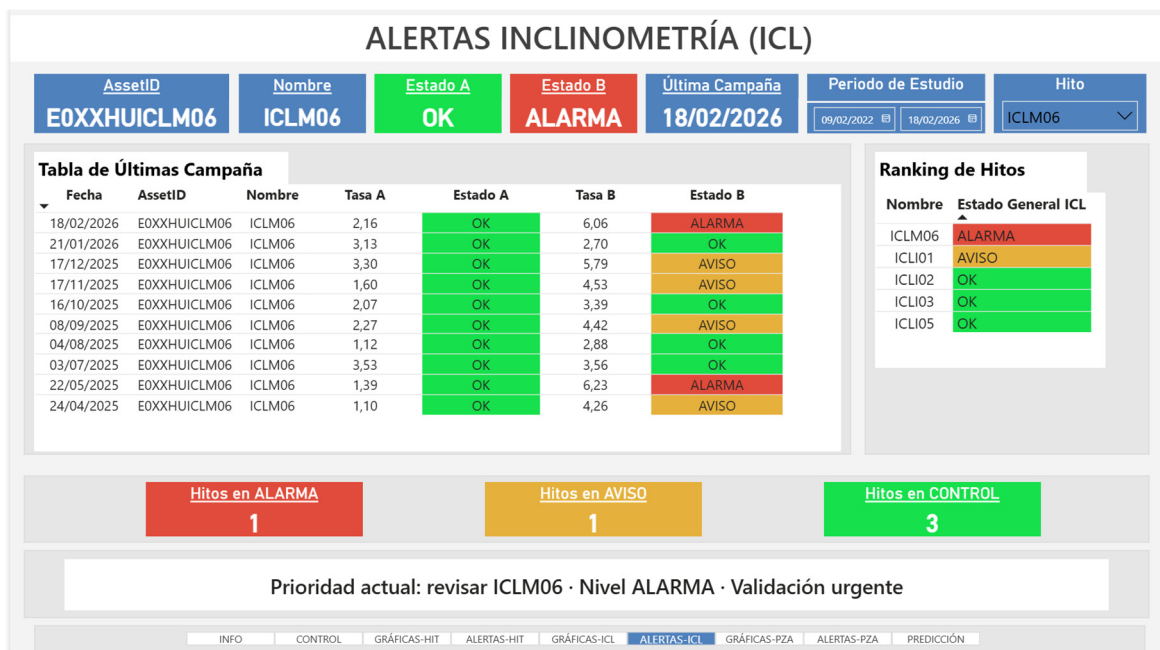


Ilustración 120. Vista de la página ALERTAS-ICL seleccionando en el slicer el ICLM06. Elaboración propia

Las páginas de ICL fueron también una prueba de que la coherencia visual no estaba reñida con la especificidad técnica. Aunque la estructura general del panel se mantuvo, el contenido interno cambió por completo para responder a la lógica de la inclinometría. Este equilibrio entre lenguaje común y contenido específico fue una de las claves para que el cuadro de mando resultara comprensible sin sacrificar rigor técnico.

5.5.11 Desarrollo de las páginas GRAFICAS_PZA y ALERTAS_PZA

La técnica piezométrica introdujo una problemática distinta a la de HIT e ICL, ya que la interpretación operativa exigía combinar tres lecturas complementarias: evolución temporal del nivel piezométrico del sensor activo, comparación con la lluvia y con el nivel del embalse, y una representación espacial simplificada del comportamiento de grupos de piezómetros mediante perfiles. Por esa razón, la página GRAFICAS_PZA se diseñó con dos gráficas superiores y un bloque inferior de perfil, gobernado por selectores específicos de perfil y de campañas comparadas.

La base visual de esta página se tomó de GRAFICAS_ICL, pero toda la lógica interna se sustituyó por otra específica de piezometría. En la cabecera se colocaron tarjetas de *AssetID*, nombre, última campaña, nivel piezométrico y nivel de embalse, junto con el *slicer* del piezómetro y el del periodo de estudio. En la parte superior de la zona analítica se dispusieron dos comparaciones temporales:

piezometría frente a nivel de embalse y piezometría frente a precipitación. En la parte inferior se situó el perfil piezométrico, que permite comparar dos campañas dentro de un perfil seleccionado de la ladera.

El bloque inferior de perfiles requirió una lógica propia. Inicialmente se valoró representar varios perfiles a la vez, pero se descartó por falta de espacio y por riesgo de saturar la página. Se optó por un único gráfico gobernado por un selector de perfil con tres grupos predefinidos, cada uno de ellos con su orden espacial y su distancia acumulada. También se crearon *slicers* específicos para la campaña 1 y la campaña 2, de forma que el usuario pudiera comparar dos situaciones dentro del mismo perfil. Esta solución resultó mucho más clara y, además, permitió separar el comportamiento del bloque inferior del resto de la página: el *slicer* del piezómetro y el periodo de estudio afectan al bloque superior, mientras que el selector de perfil y las campañas comparadas gobiernan solo el gráfico inferior.

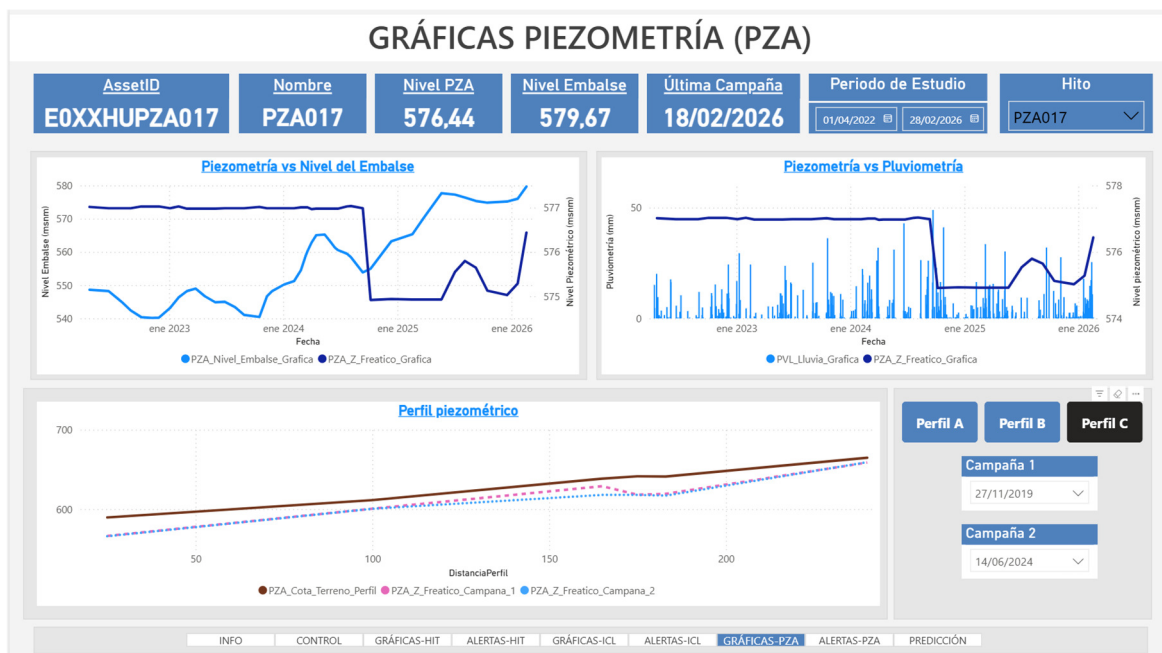


Ilustración 121. Vista de la página GRÁFICAS-PZA seleccionando en el slicer el PZA017. Elaboración propia

La página ALERTAS_PZA siguió el patrón general de alertas, pero incorporó dos matices propios. En primer lugar, el bloque global no debía depender del piezómetro seleccionado y, en parte, tampoco del periodo visible, al menos en aquellos resúmenes planteados como estado fijo del sistema. En segundo lugar, para trabajar con estabilidad se creó una base específica de alertas, PZA_ALERTAS_BASE, donde cada fila se clasificó por severidad a partir del valor absoluto de la

variación entre campañas. Sobre esa base se construyeron el estado actual del activo, los contadores globales, la tabla de últimas campañas y el ranking de piezómetros.

ALERTAS PIEZOMETRÍA (PZA)

AssetID
E0XXHUPZA001

Nombre
PZA001

Última Tasa
9,22

Estado Actual
Alerta

Última Campaña
18/02/2026

Periodo de Estudio
01/09/2019 - 28/02/2026

Piezómetro
PZA001

Tabla de Últimas Campaña

Ultima_Campaña	AssetID	Nombre	Ultima_Tasa	Estado_Actual
18/02/2026	E0XXHUPZA001	PZA001	9,22	Alarma
18/02/2026	E0XXHUPZA002	PZA002	0,03	OK
18/02/2026	E0XXHUPZA003	PZA003	0,00	OK
18/02/2026	E0XXHUPZA004	PZA004	0,45	OK
18/02/2026	E0XXHUPZA005	PZA005	0,32	OK
18/02/2026	E0XXHUPZA006	PZA006	0,18	OK
18/02/2026	E0XXHUPZA007	PZA007	0,47	OK
18/02/2026	E0XXHUPZA008	PZA008	8,36	Alarma
18/02/2026	E0XXHUPZA009	PZA009	-0,11	OK
18/02/2026	E0XXHUPZA010	PZA010	0,22	OK
18/02/2026	E0XXHUPZA011	PZA011	0,08	OK
18/02/2026	E0XXHUPZA012	PZA012	-0,17	OK

Ranking de Piezómetros

Nombre	Ranking_Estado_General
PZA019	OK
PZA015	OK
PZA018	OK
PZA008	ALARMA
PZA001	ALARMA

Piezómetros en ALARMA
2

Piezómetros en AVISO
0

Piezómetros en CONTROL
17

Prioridad actual: revisar PZA001 · Nivel ALARMA · Validación urgente

INFO
CONTROL
GRÁFICAS-HIT
ALERTAS-HIT
GRÁFICAS-ICL
ALERTAS-ICL
GRÁFICAS-PZA
ALERTAS-PZA
PREDICCIÓN

Ilustración 122. Vista de la página ALERTAS-PZA seleccionando en el slicer el PZA001. Elaboración propia

Con estas dos páginas la piezometría quedó integrada en el mismo lenguaje de explotación que las demás técnicas, pero sin perder su singularidad. La combinación de series temporales, contexto hidráulico y perfiles espaciales aporta una lectura muy rica del comportamiento hidrogeológico de la ladera. Además, muestra que el cuadro de mando no se diseñó como un catálogo rígido de plantillas repetidas, sino como una estructura común capaz de adaptarse a la naturaleza de cada técnica.

5.5.12 Secuencia real de validación desde el modelo territorial

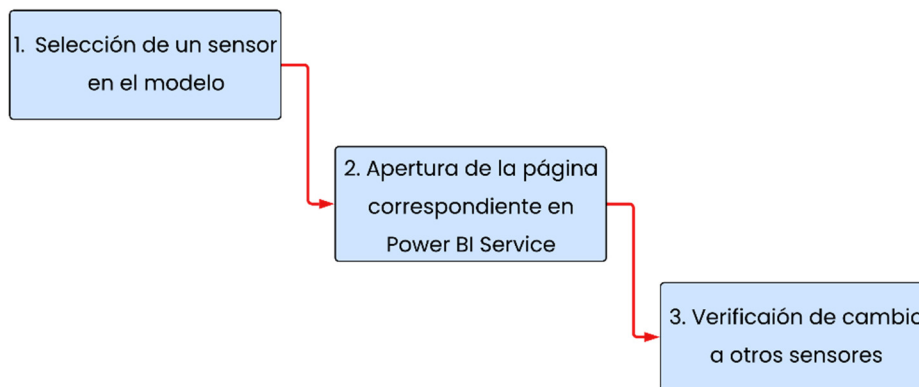


Ilustración 123. Secuencia de validación desde Infraworks. Elaboración propia

La validación del bloque no se limitó a comprobar que los gráficos “se veían bien”. Cada página se sometió a una secuencia de pruebas que reproducía el modo real de uso del sistema. Primero se verificaba el comportamiento en Power BI Desktop, donde resultaba más sencillo identificar errores de modelado, relaciones o medidas. Después se publicaba el informe en Power BI Service y se revisaba que los visuales mantuvieran el mismo resultado. Por último, se accedía desde el modelo territorial, seleccionando activos concretos y comprobando que el informe se abría en el contexto correcto y que las páginas seguían siendo navegables una vez dentro.

En la práctica, esta fase de validación confirmó cuestiones muy específicas. En CONTROL se comprobó que el bloque global no perdiera su carácter agregado al entrar desde un activo concreto. En GRAFICAS_HIT se verificó que lluvia, embalse y series del hito respondieran al periodo visible sin quedar secuestradas por el filtro de entrada. En GRAFICAS_ICL se revisó el cambio correcto de inclinómetro y la actualización simultánea de cabecera, última campaña y cuatro gráficas. En GRAFICAS_PZA se validó, además, la separación entre el bloque superior del activo y el bloque inferior de perfiles.

Las páginas de alertas se validaron con un criterio adicional: tenían que seguir siendo útiles incluso cuando el activo desde el que se accedía estuviera en estado OK. Esto es importante porque, si un sensor sin incidencia abre una página y hace desaparecer el ranking o las tablas globales, la herramienta pierde su sentido operativo. Por ello se insistió especialmente en revisar que rankings,

contadores y resúmenes siguieran mostrando la situación del conjunto, mientras que la tabla de campañas y las tarjetas de cabecera sí respondían al activo seleccionado.

El resultado de esta secuencia fue un conjunto de páginas cerradas funcionalmente y con un comportamiento homogéneo. Más allá del detalle de cada técnica, la validación permitió demostrar que la integración no dependía de una combinación puntual de filtros o de una sesión concreta del usuario, sino de un modelo que seguía funcionando cuando se reproducía la misma secuencia de trabajo que tendría un técnico al revisar el deslizamiento desde InfraWorks.

Tabla 34. Secuencia de validación. Elaboración propia

Página validada	Comprobación principal	Resultado esperado
CONTROL	Mantener resumen global y ficha del activo a la vez	La ladera sigue viéndose como conjunto, aunque la entrada sea un sensor
GRAFICAS_HIT	Cambio correcto de hito y periodo	Gráficas y estados responden sin perder lluvia ni embalse
ALERTAS_HIT	Tabla del activo + ranking global	Las diez últimas campañas conviven con el top 5 del periodo
GRAFICAS_ICL	Cambio correcto de ICL y actualización de 4 gráficas	Cabecera y visuales se actualizan de forma conjunta
ALERTAS_ICL	Separación entre bloque del activo y bloque global	Tabla del activo y ranking del periodo se mantienen estables
GRAFICAS_PZA	Coherencia entre bloque superior y perfil inferior	Cada bloque responde solo a sus <i>slicers</i> propios
ALERTAS_PZA	Estado actual del activo + situación global de piezómetros	El activo seleccionado no contamina el ranking ni los contadores

5.5.13 Resultado alcanzado, aportación al TFM y limitaciones observadas

El resultado alcanzado puede resumirse como la puesta en marcha de una interfaz de explotación técnicamente coherente entre el modelo territorial y el cuadro de mando. InfraWorks pasó a desempeñar la función de visor y de lanzador contextual del panel, mientras que Power BI asumió la lectura de campañas, estados y comparaciones temporales. Esta distribución de roles se ajusta bien a la filosofía del TFM, porque mantiene el modelo BIM como mapa de información y reserva la analítica para un entorno específicamente preparado para trabajar con series y umbrales.

Desde el punto de vista práctico, la principal aportación del bloque es que permite recorrer un itinerario completo de trabajo sin abandonar el hilo del activo. El técnico localiza un instrumento en el modelo, abre el panel en su contexto, revisa su estado actual, consulta sus campañas, comprueba si existen incidencias prioritarias en otros sensores de la misma técnica y, si lo necesita, cambia

manualmente a otros activos sin reiniciar la sesión. Esta continuidad entre lectura espacial y lectura temporal mejora mucho la capacidad de revisión y acerca el sistema al comportamiento esperado de un gemelo digital aplicado a la auscultación.

El desarrollo también deja una enseñanza metodológica importante: en proyectos de este tipo, la calidad de la integración depende más del gobierno del dato y del contexto que del brillo visual del panel. Las tablas desconectadas, la priorización del *slider* manual, la revisión de granularidades y la validación desde el servicio fueron decisiones bastante menos vistosas que la maquetación final de las páginas, pero son las que realmente hicieron posible que el sistema funcionase.

No obstante, también se observaron limitaciones. El sistema trabaja con campañas semanales, quincenales o mensuales y, por tanto, no pretende detectar fenómenos que evolucionen en horas. La robustez del panel depende de que las tablas de origen se actualicen con disciplina y de que los umbrales se revisen si el comportamiento del caso cambia. Además, algunas partes del cuadro de mando, como las páginas de predicción asociadas a Azure Machine Learning, requieren un bloque adicional de desarrollo y validación que se verán en apartados siguientes. La integración InfraWorks - Power BI deja preparado ese terreno, pero no lo agota.

En síntesis, este apartado demuestra que la combinación entre un visor BIM territorial y un cuadro de mando bien modelado permite transformar un inventario de sensores y campañas dispersas en un sistema de consulta estructurado, trazable y útil para la toma de decisiones. Esa aportación no es únicamente informática. Tiene un valor directo para la explotación y la vigilancia del deslizamiento, porque organiza la información disponible de un modo compatible con la práctica de ingeniería y con la necesidad de revisar el comportamiento de la ladera desde varias técnicas a la vez.

5.5.14 Valor de la integración para la explotación del deslizamiento y criterios para su reproducción

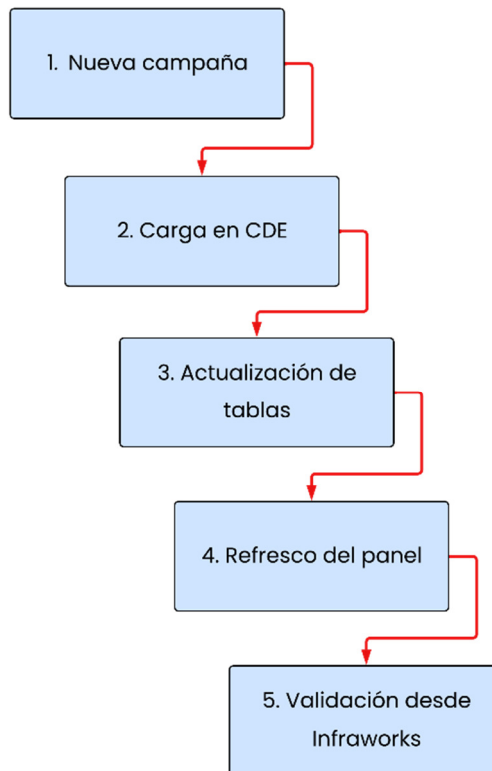


Ilustración 124. Esquema de mantenimiento y actualización del sistema. Elaboración propia

Más allá de las páginas concretas, el valor de la integración desarrollada reside en haber convertido un conjunto heterogéneo de campañas y técnicas en una secuencia de trabajo repetible. El esquema puede reproducirse en nuevos periodos de auscultación con un esfuerzo relativamente contenido siempre que se mantengan tres condiciones: persistencia del *AssetID*, disciplina en la actualización del CDE y conservación de la lógica de filtros dentro del modelo Power BI. Si esas tres piezas se sostienen, el sistema puede incorporar nuevas campañas sin necesidad de rehacer por completo la interfaz.

Este criterio de reproducibilidad es especialmente útil en un entorno de explotación real, donde el panel no se utiliza una sola vez para el TFM, sino que puede evolucionar con el activo. La estructura por técnicas, la separación entre páginas gráficas y páginas de alertas y la existencia de tablas auxiliares bien definidas permiten crecer de forma relativamente ordenada. De hecho, la propia

reserva de páginas para predicción y el enlace posterior con *Azure Machine Learning* se apoyan en la misma arquitectura ya descrita: modelo territorial, identificador permanente, dato temporal gobernado y capa de explotación diferenciada.

En consecuencia, este apartado no debe leerse solo como una memoria de lo ya hecho, sino también como una guía de reproducción y mantenimiento del sistema. Documentar con detalle las decisiones sobre calendarios, tablas desconectadas, rankings, perfiles y validación desde el modelo no responde a una obsesión descriptiva, sino a la necesidad de que el trabajo pueda continuarse sin perder coherencia. Precisamente por ello, la inclusión de ilustraciones y esquemas en este apartado no es ornamental. Las imágenes deben ayudar a fijar visualmente una lógica de trabajo que, por su propia naturaleza, combina territorio, datos y explotación analítica.

5.5.15 Decisiones de maquetación y lectura visual del cuadro de mando

La maquetación del cuadro de mando no se dejó al final del proceso, sino que se fue afinando al mismo tiempo que se resolvían los problemas de modelo. En entornos de auscultación, donde el usuario pasa de una técnica a otra y de un activo a otro, la estabilidad visual tiene una importancia práctica evidente. Por ello se decidió que todas las páginas compartieran una cabecera de lectura rápida, una zona central principal, una franja de navegación y un uso coherente del color de estados. Esta repetición deliberada ayuda a que el usuario no tenga que reaprender el panel en cada cambio de página.

La paleta de colores también se eligió con una intención operativa clara. El verde, el ámbar y el rojo se reservaron para estados y alertas, evitando utilizarlos para otros elementos decorativos. Los azules se emplearon como color de estructura, especialmente en títulos, bandas y algunos visuales auxiliares. Gracias a esta disciplina cromática, el lector puede asociar inmediatamente una tarjeta o una celda coloreada con una lectura de estado y no con un mero recurso de diseño. En cuadros de mando técnicos, esta economía del color mejora mucho la legibilidad.

Otro aspecto muy cuidado fue la posición de los *slicers*. Siempre que fue posible, el selector principal del activo se situó en cabecera, junto al nombre, al identificador y a la última campaña. Esto reproduce el orden natural de lectura del técnico: primero reconoce qué sensor está viendo, después ajusta el periodo y por último baja a revisar la información detallada. En páginas donde se

añadieron *slicers* auxiliares, como perfiles y campañas comparadas en PZA, se colocaron directamente junto al bloque al que gobernaban para no inducir falsas expectativas sobre su ámbito de acción.

La maquetación de tablas y rankings siguió la misma lógica de claridad. Las tablas de campañas se ubicaron normalmente en el bloque izquierdo y los rankings en el derecho, configurando una lectura que va del detalle del activo a la priorización del conjunto. Las tarjetas de síntesis y los resúmenes textuales se reservaron para las zonas superior e inferior, donde funcionan bien como apertura o como cierre interpretativo de la página. Esta organización no es arbitraria; responde a la manera en que se quería guiar al usuario desde la observación hasta la decisión.

Incluso decisiones aparentemente secundarias, como limitar algunas tablas a diez campañas o dejar ciertos rankings en top 5, tuvieron una justificación de legibilidad. Mostrar demasiadas filas o demasiados activos complica la lectura y diluye el propósito de la página. El cuadro de mando no pretendía sustituir a las tablas fuente completas, sino ofrecer una explotación orientada a revisión y decisión. Por eso se decidió recortar, resumir y priorizar siempre que esa reducción aumentase la utilidad práctica sin distorsionar el contenido técnico.

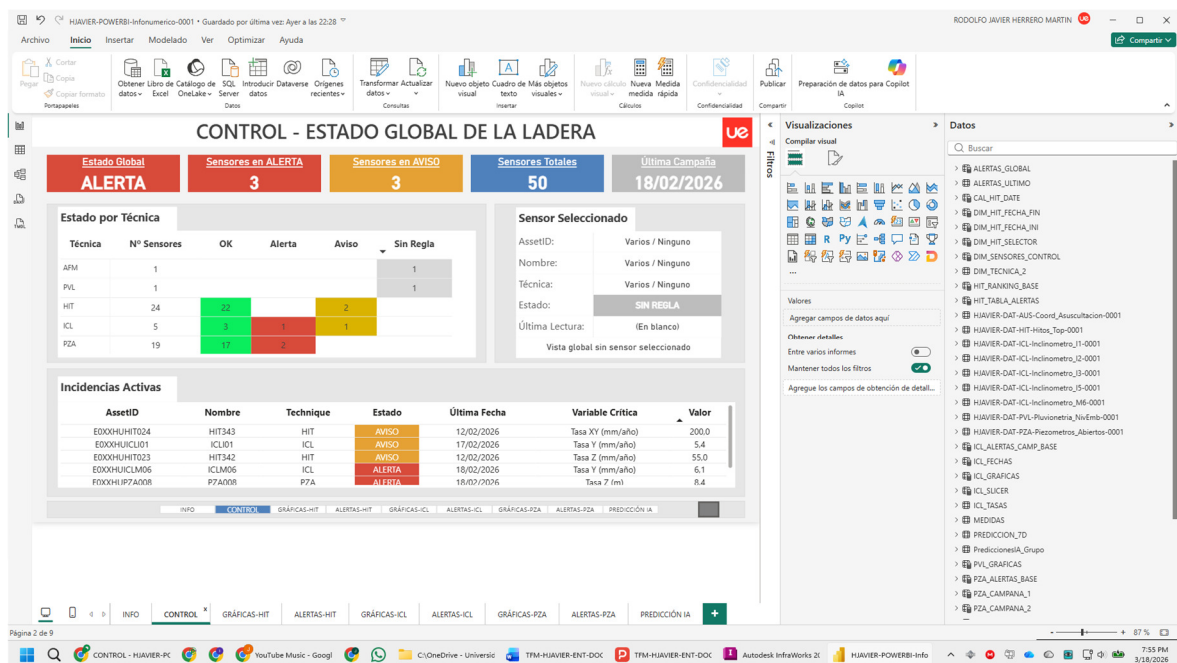


Ilustración 125. Construcción de la página CONTROL en Power BI. Elaboración propia

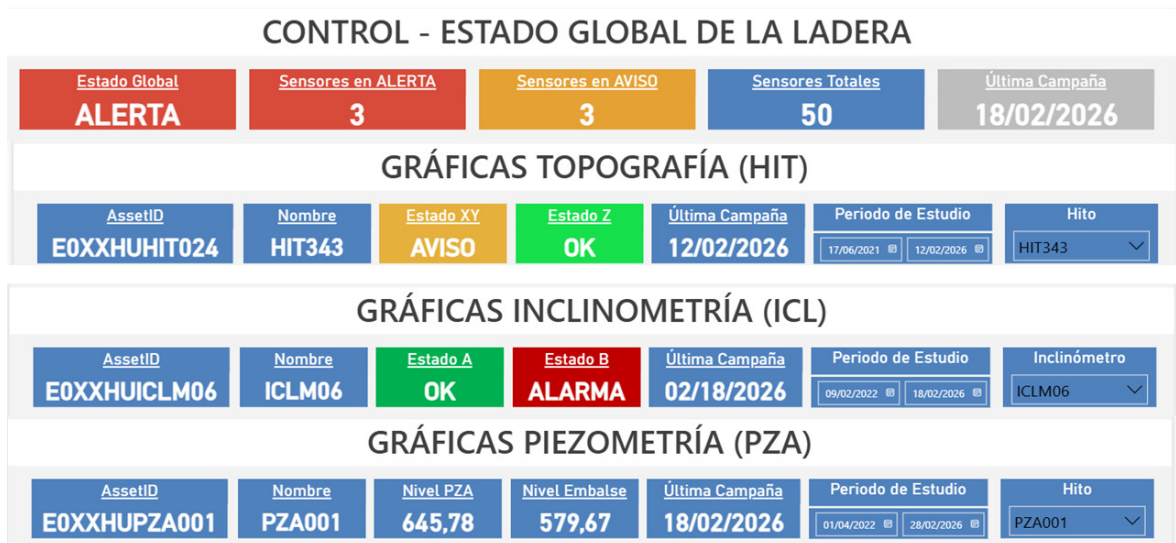


Ilustración 126. Encabezados de varias páginas. Elaboración propia

5.5.16 Control de calidad del dato y coherencia técnica del panel

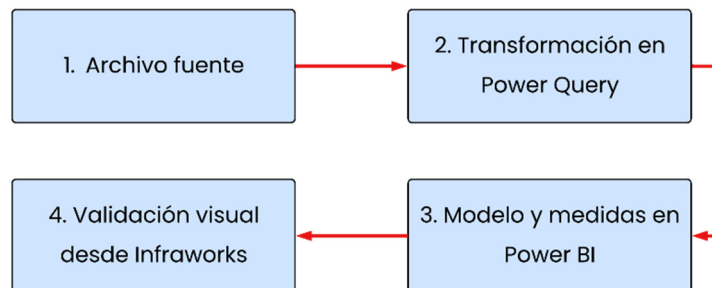


Ilustración 127. Cadena de control de la calidad. Elaboración propia

La calidad de un cuadro de mando de auscultación no depende solo de que los filtros funcionen o de que la página tenga una buena presentación. Depende, sobre todo, de que el dato que se muestra sea coherente con la técnica que representa. En este bloque, la revisión de la calidad del dato se abordó en varios niveles. En primer lugar, se comprobó que los archivos de origen respetaran una estructura constante de identificadores y campos. En segundo lugar, se revisaron tipos de dato, columnas calculadas y relaciones dentro de Power Query. Y en tercer lugar, se validó que el contenido final del panel concordara con la interpretación técnica esperable de cada instrumento.

Esta preocupación por la calidad no es una adición externa al bloque 5.4.1, sino una prolongación natural de la metodología QA/QC ya formulada en capítulos anteriores. En un sistema como el desarrollado, un error de codificación, un tipo de dato mal asignado o una campaña mal resumida

no solo afecta a una celda: puede alterar un semáforo, desplazar un ranking o llevar al usuario a interpretar como estable un activo que no lo está. Por ello, muchas de las correcciones realizadas durante el desarrollo deben entenderse también como operaciones de aseguramiento de la calidad del dato mostrado.

En HIT, por ejemplo, fue esencial mantener la distinción entre incrementales y tasas, porque ambas magnitudes responden a preguntas diferentes. En ICL, la calidad del panel dependía de respetar la lógica profundidad-campaña y de no mezclar valores de ejes o cotas que ya hubieran cambiado de referencia. En PZA, la consistencia se apoyó en distinguir adecuadamente entre nivel piezométrico, nivel del embalse, lluvia y variación entre campañas. Dicho de otro modo, la estabilidad del cuadro de mando se apoyó tanto en filtros y medidas como en una fidelidad estricta a la naturaleza del dato que se estaba representando.

También por esta razón se decidió no utilizar umbrales genéricos demasiado amplios y se adaptaron reglas operativas más ajustadas al caso de estudio. La elección de umbrales más sensibles no fue un artificio para generar más alarmas, sino una forma de alinear el cuadro de mando con la escala real del fenómeno y con la frecuencia de campañas disponible. Un sistema de alerta mal calibrado es técnicamente tan problemático como un visual mal filtrado: ambos introducen ruido en la toma de decisiones.

En definitiva, el control de calidad del bloque 5.4.1 puede leerse como una cadena completa: calidad del archivo fuente, calidad del modelo de Power BI, calidad de la interpretación visual y calidad de la validación final frente al comportamiento esperado del instrumento. Solo cuando los cuatro niveles funcionan de forma coherente puede afirmarse que la integración InfraWorks - Power BI aporta valor real a la explotación del deslizamiento.

Tabla 35. Control de calidad. Elaboración propia

Nivel de QA/QC	Pregunta de control	Ejemplo dentro del desarrollo
Fuente	¿La tabla trae el identificador y los campos correctos?	Unificación de ICL y revisión de columnas año / tipos numéricos
Transformación	¿El modelo respeta la granularidad adecuada?	Creación de tablas resumen para campañas y alertas
Visualización	¿El panel muestra la magnitud correcta para la pregunta que plantea?	Incrementales en gráficas y tasas en cabeceras
Validación	¿El resultado coincide con la lectura técnica esperada?	Contraste de estados y campañas al entrar desde el modelo

5.5.17 Secuencia de uso prevista para un técnico de explotación

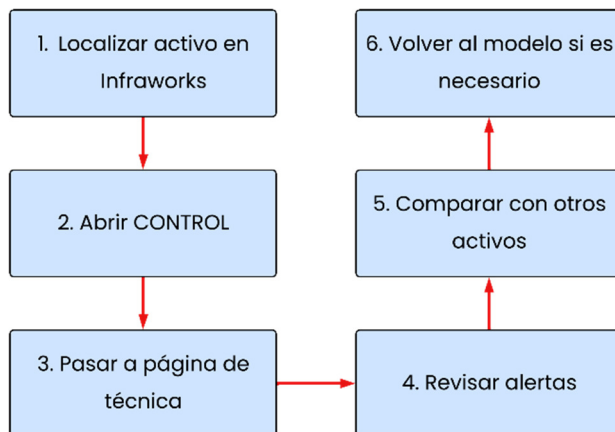


Ilustración 128, Guía de uso de un técnico desde el modelo en Infracworks hasta alerta. Elaboración propia

Una forma eficaz de entender la utilidad del sistema es describir el recorrido de uso previsto para un técnico. La revisión puede comenzar en InfracWorks, con una vista territorial del embalse, la ladera y la posición de los instrumentos. Desde esa escena, el técnico selecciona el sensor que quiere revisar y abre el cuadro de mando ya filtrado para ese activo. En ese instante no pierde el contexto espacial, porque sabe exactamente dónde se encuentra el instrumento y con qué otras técnicas o sectores de la ladera se relaciona. A partir de ahí, el panel le ofrece una progresión natural desde el estado actual hasta el análisis detallado.

Si el acceso se realiza por CONTROL, la primera decisión consiste en ver si el estado global de la ladera presenta alertas activas o si el sensor seleccionado forma parte de un problema más amplio. Si la atención debe centrarse en la técnica concreta del activo, el técnico navega después a la página gráfica correspondiente. En HIT o PZA revisa series temporales; en ICL examina curvas por profundidad. Si detecta un comportamiento dudoso o una proximidad al umbral, puede pasar de inmediato a la página de alertas de la misma técnica para comprobar campañas recientes y posición relativa del activo respecto al resto del sistema.

Este itinerario de uso fue determinante para construir las páginas tal como han quedado. No se diseñó un panel “bonito” para enseñar resultados, sino una secuencia de pantallas pensadas para responder a preguntas muy concretas: ¿dónde está el activo?, ¿qué estado presenta ahora?, ¿cómo ha evolucionado?, ¿qué otras señales hay en su misma técnica?, ¿es un caso aislado o forma parte

de un patrón más amplio? El hecho de que estas preguntas puedan responderse sin abandonar el flujo iniciado en InfraWorks es una de las principales fortalezas del sistema.

Además, la navegación manual dentro de Power BI permite ampliar la revisión sin necesidad de volver al modelo cada vez. Una vez abierto el panel, el usuario puede cambiar de sensor dentro de la misma técnica, ajustar el periodo visible o seleccionar perfiles y campañas comparadas. Esto hace que InfraWorks funcione como puerta de entrada y contexto espacial, mientras que el cuadro de mando se convierte en el entorno de trabajo intensivo para la revisión temporal. Esa complementariedad entre ambos programas es precisamente el núcleo de la integración que se describe en este apartado.

Desde el punto de vista de la memoria, incluir esta secuencia de uso tiene un valor adicional. Permite demostrar que la integración no es solo interoperabilidad de software, sino también una propuesta de explotación razonada. El sistema organiza los pasos de revisión de un modo compatible con el trabajo real de auscultación, y eso es lo que convierte a la solución en algo útil más allá del interés puramente académico.

Tabla 36. Secuencia de actuación para un técnico. Elaboración propia

Paso de uso	Programa predominante	Pregunta que responde
1. Localización del activo	InfraWorks	¿Dónde está el sensor y en qué contexto territorial se sitúa?
2. Apertura contextual del panel	Power BI Service	¿Con qué activo se ha iniciado la revisión?
3. Revisión global	CONTROL	¿Existe una incidencia de conjunto?
4. Análisis detallado	Página gráfica de la técnica	¿Cómo ha evolucionado el activo en el periodo visible?
5. Priorización operativa	Página de alertas de la técnica	¿Es un caso aislado o forma parte de un patrón más amplio?

5.5.18 Síntesis comparada de las tres familias de páginas y lectura conjunta del sistema

Una de las conclusiones más interesantes del desarrollo es que, aunque las páginas de HIT, ICL y PZA comparten una estructura común, cada familia terminó resolviendo una necesidad distinta. HIT quedó orientada a la relación entre desplazamiento superficial y variables hidráulicas; ICL, a la identificación de deformaciones en profundidad y a su priorización por campañas; PZA, a la lectura

hidrogeológica del activo y a la comparación espacial simplificada por perfiles. Esta diversidad confirma que el sistema no es una plantilla genérica, sino una arquitectura común capaz de adaptarse a la lógica propia de cada técnica.

También se aprecia una diferencia clara entre páginas gráficas y páginas de alertas. Las primeras sirven para interpretar el comportamiento, explorar series, detectar tendencias y relacionar variables. Las segundas sirven para ordenar la revisión, contar incidencias, resumir prioridades y convertir el dato técnico en una señal operativa. Mantener ambas funciones separadas fue una decisión acertada porque evitó sobrecargar cada página con demasiados objetivos a la vez y permitió ajustar mejor la maquetación, los *slicers* y las medidas de contexto.

Leídas en conjunto, las siete páginas cerradas del sistema -CONTROL, GRAFICAS_HIT, ALERTAS_HIT, GRAFICAS_ICL, ALERTAS_ICL, GRAFICAS_PZA y ALERTAS_PZA- componen un marco de explotación bastante completo para el estado actual del TFM. Aún quedan desarrollos posteriores relacionados con predicción y con *Azure Machine Learning*, pero la capa de integración espacial y de consulta de campañas ya funciona como un bloque autónomo y útil. Esto es importante porque significa que el proyecto no depende de completar todos los frentes para empezar a generar valor práctico.

Por todo ello, puede afirmarse que el apartado 5.4.1 no se limita a describir una conexión informática entre un visor BIM y un panel. Lo que realmente documenta es la construcción de una interfaz de explotación territorial de la auscultación, en la que cada técnica encuentra su espacio, cada activo conserva su trazabilidad y el conjunto de la ladera sigue siendo legible desde cualquier punto de entrada.

Tabla 37. Comparación de técnicas. Elaboración propia

Familia de páginas	Escala principal de lectura	Producto operativo generado
CONTROL	Sistema completo / ladera	Estado global y acceso al resto del panel
HIT	Sensor individual y comparación con lluvia / embalse	Diagnóstico superficial y priorización de hitos
ICL	Sondeo individual y campañas en profundidad	Diagnóstico subsuperficial y ranking de inclinómetros
PZA	Piezómetro individual + perfil de grupo	Diagnóstico hidrogeológico y alertas de piezometría

5.5.19 Discusión técnica: ventajas de la integración frente a una consulta puramente documental o tabular

Antes de implantar esta integración, la revisión de campañas exigía saltar entre hojas de cálculo, listados de códigos, documentos de campaña y, en el mejor de los casos, alguna representación aislada. Ese modo de trabajo puede ser suficiente para consultas puntuales, pero resulta poco eficiente cuando se quiere seguir un fenómeno como un deslizamiento de ladera, donde la posición del sensor, la relación entre técnicas y el contexto hidráulico importan tanto como el valor numérico concreto. La principal ventaja de la integración InfraWorks - Power BI es precisamente que recompone esos fragmentos en un hilo de lectura único.

La primera mejora frente a una consulta puramente tabular es espacial. En un listado es difícil recordar de memoria dónde se ubica cada instrumento, si un piezómetro está aguas arriba o aguas abajo de otro, o si un hito topográfico pertenece a una zona próxima al pie de la ladera o a un sector de coronación. Con InfraWorks como punto de partida, la revisión arranca siempre desde el territorio. Esa información espacial no sustituye al dato de campaña, pero ayuda a interpretarlo con mucha más rapidez y con menos riesgo de perder la relación entre elementos.

La segunda mejora es temporal y comparativa. Un archivo de campañas puede contener todos los valores, pero no siempre permite relacionarlos de forma inmediata con la lluvia, con el nivel del embalse o con el estado del conjunto. El cuadro de mando sí lo hace, porque organiza los datos en gráficas, tablas operativas, rankings y semáforos que condensan la información sin sacrificar el acceso al detalle cuando este es necesario. En otras palabras, el sistema no elimina la tabla fuente; la supera como herramienta de explotación diaria.

La tercera mejora es de priorización. En una revisión basada solo en hojas de cálculo, el técnico debe reconstruir mentalmente qué activo está peor, cuál ha entrado en aviso y qué campañas conviene volver a comprobar. Las páginas de alertas automatizan buena parte de ese esfuerzo, no para sustituir el criterio ingenieril, sino para concentrarlo allí donde más falta hace. Esto tiene un valor especialmente claro en periodos de muchas campañas o cuando conviven varias técnicas con distintas escalas de lectura.

Por último, la integración aporta una ventaja de trazabilidad. El uso sistemático del *AssetID*, la existencia de un CDE único y la validación desde el propio modelo hacen que el recorrido entre

objeto, dato y visual sea transparente. Esa transparencia es muy útil en un trabajo académico, pero aún lo es más en una explotación real, donde conviene saber siempre de qué activo procede una lectura, qué página la está interpretando y qué criterio de estado se le ha aplicado.

5.5.20 Condiciones necesarias para mantener el sistema operativo en campañas futuras

La estabilidad conseguida en este bloque no debe interpretarse como una propiedad automática del sistema, sino como el resultado de varias condiciones que deben mantenerse en futuras actualizaciones. La primera y más importante es la persistencia del *AssetID*. Si los identificadores cambian, si se renombra un activo sin conservar su clave o si se generan nuevas campañas con códigos inconsistentes, la cadena entre modelo, tabla y página se rompe. Por ello, una de las recomendaciones operativas más claras derivadas de este trabajo es proteger el inventario maestro y tratarlo como una referencia de proyecto, no como un archivo más.

La segunda condición es la disciplina en la actualización del CDE. Las tablas deben conservar estructura, formato y rutas de trabajo estables. Cuando se incorporen nuevas campañas, lo correcto no es crear archivos arbitrarios con nombres o columnas distintas, sino continuar el patrón ya utilizado. Este aspecto puede parecer burocrático, pero es el que permite que el PBIX se refresque sin tener que reconstruir transformaciones o revisar manualmente medidas en cada actualización. La eficiencia del sistema depende, en gran medida, de esta continuidad en la gestión documental.

La tercera condición tiene que ver con la gobernanza del propio panel. Si en el futuro se añaden nuevas técnicas, nuevas páginas o lógicas de alerta, conviene mantener el mismo criterio seguido en este bloque: separar activo y conjunto, validar interacciones, evitar reabrir páginas cerradas sin una necesidad real y documentar cada modificación relevante. El cuadro de mando puede crecer, pero su crecimiento no debería hacerse a costa de perder claridad funcional o de introducir dependencias ocultas que luego sean difíciles de mantener.

La cuarta condición es la validación sistemática tras cada actualización importante. La experiencia del desarrollo ha demostrado que ciertos errores no aparecen en la tabla fuente ni siquiera en Power BI Desktop, sino al publicar y abrir desde el modelo. Por ello, cualquier cambio significativo debería recorrer de nuevo el mismo itinerario de comprobación: revisión local, publicación, entrada desde InfraWorks y contraste técnico del resultado visible. Este procedimiento lleva tiempo, pero es

mucho menos costoso que trabajar varias semanas sobre un panel que ha dejado de reflejar correctamente el comportamiento real de la ladera.

En resumen, el sistema desarrollado en este apartado es perfectamente reutilizable y ampliable, pero no es autosuficiente. Requiere un mínimo de disciplina en identificadores, archivos, panel y validación. Precisamente por eso era necesario dejar constancia detallada del procedimiento seguido: para que la continuidad futura del sistema no dependa de intuiciones dispersas, sino de una metodología de trabajo explícita y ya probada.

Tabla 38. Condiciones de mantenimientos del sistema. Elaboración propia

Condición de mantenimiento	Riesgo si no se cumple	Acción recomendada
Persistencia del <i>AssetID</i>	Pérdida del enlace entre modelo, tablas y panel	Tratar <i>SENSORES_MASTER</i> como inventario protegido
Continuidad de la estructura de archivos	Errores de actualización y pérdida de transformaciones	Mantener nombres, columnas y rutas estables en el CDE
Documentación de cambios en el PBIX	Introducción de dependencias ocultas o visuales incoherentes	Cerrar bloques y registrar cada modificación relevante
Validación post-publicación	Errores que solo aparecen en Power BI Service o al entrar desde InfraWorks	Repetir la secuencia Desktop -> Service -> visor BIM

5.5.21 Cierre del bloque y transición al desarrollo posterior

Con el cierre de este apartado queda plenamente definida la capa de integración entre el visor territorial y el cuadro de mando de explotación. A partir de este punto, el trabajo posterior puede apoyarse en una base ya estabilizada: un inventario común gobernado por *AssetID*, una estructura de páginas capaz de responder al activo seleccionado sin perder la lectura global y una validación ya contrastada desde el propio entorno BIM. Esta condición de estabilidad es especialmente valiosa porque evita que los desarrollos siguientes, más ligados a predicción y análisis avanzado, tengan que resolver de nuevo problemas básicos de navegación, contexto o trazabilidad.

Desde la perspectiva de la memoria, este cierre también marca un cambio de escala. Mientras que en este apartado el esfuerzo se ha concentrado en organizar, filtrar y visualizar correctamente la información existente, los apartados siguientes pueden centrarse con mayor claridad en interpretar resultados, comparar técnicas y plantear extensiones del sistema. Dicho de otro modo, la integración InfraWorks - Power BI no constituye el final del trabajo, pero sí la infraestructura funcional sobre la que descansan las etapas posteriores del TFM.

Por esta razón, conviene que la versión final del documento conserve el carácter gráfico y procesual de este bloque. Las capturas, los diagramas de flujo y las tablas de síntesis no deben entenderse como material accesorio, sino como parte de la demostración de que la metodología propuesta ha llegado efectivamente a una implementación operativa. Ese es, en última instancia, el sentido de este apartado: mostrar que la integración entre modelo, datos y explotación no se ha quedado en el plano conceptual, sino que se ha traducido en una herramienta de trabajo concreta para la revisión del deslizamiento.

5.6 ESTUDIO DE DESLIZAMIENTO. PREDICCIÓN CON IA. INTEGRACIÓN AZURE MACHINE LEARNING – POWER BI

Este apartado describe el paso desde una infraestructura de lectura histórica y estado actual, ya estudiada en el capítulo 5.5, hacia una capa adicional de anticipación operativa construida con Azure Machine Learning y explotada finalmente en Power BI. La finalidad no ha sido sustituir el criterio técnico del analista ni automatizar de forma ciega el diagnóstico de la ladera, sino introducir una señal predictiva prudente, trazable y compatible con la explotación real del deslizamiento.

Este capítulo responde a una secuencia muy concreta. En primer lugar, se explica por qué la integración InfraWorks - Power BI desarrollada en el capítulo 5.5 dejaba resuelto el problema de la consulta, pero no el de la anticipación. A continuación, se expone el proceso seguido para entrenar y reformular el modelo en Azure Machine Learning, mostrando los motivos por los que se descartaron algunos enfoques que, aun presentando métricas aparentemente excelentes, no eran creíbles ni útiles para un caso real de auscultación. Después se describe el tránsito desde el modelo seleccionado hasta una cadena de explotación estable basada en Azure SQL Database y Power BI. Finalmente, se analiza la validación funcional del bloque, su aportación al seguimiento del deslizamiento y las condiciones necesarias para mantenerlo operativo en futuras campañas.

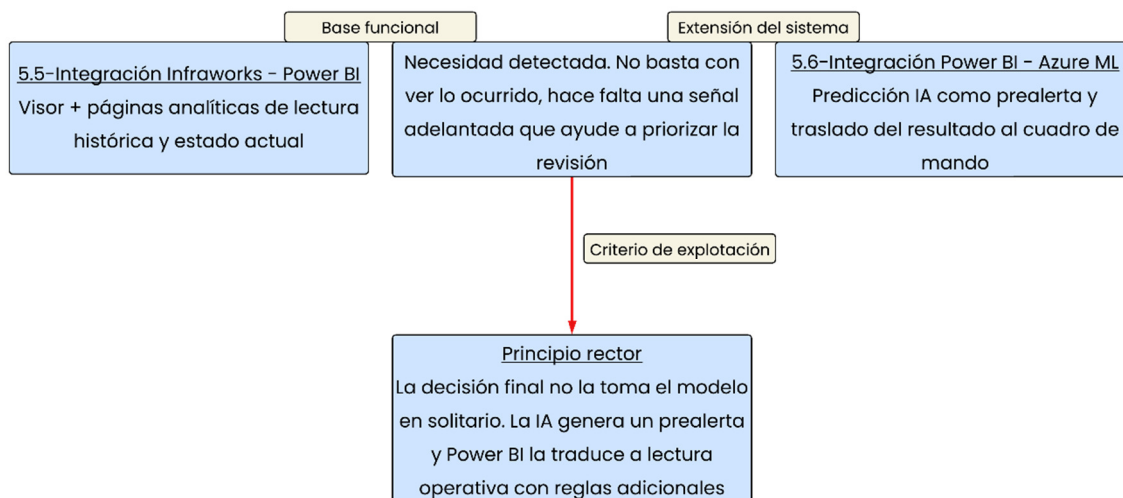


Ilustración 129. Continuidad metodológica entre el bloque de lectura histórica y la capa predictiva. Elaboración propia

5.6.1 Continuidad con el apartado 5.5 y razón de ser del bloque predictivo

La integración Infracworks - Power BI descrita en el capítulo 5.5 dejó construida una infraestructura de lectura muy útil para la explotación del caso de estudio. El técnico puede entrar desde el modelo territorial, abrir el informe filtrado por el elemento seleccionado, revisar campañas históricas, comparar estados y pasar de una técnica de auscultación a otra sin perder el contexto espacial. Esa parte del trabajo resuelve la organización de la información disponible y la hace operativa dentro de un cuadro de mando coherente. Sin embargo, el sistema sigue siendo esencialmente reactivo: muestra lo ya medido, lo ya calculado y lo ya clasificado a partir de los umbrales definidos en capítulos previos.

La necesidad de ir un paso más allá surge de la propia lógica del problema geotécnico. En un deslizamiento como el estudiado no basta con mirar bien el pasado inmediato; también interesa disponer de una señal que permita reforzar la atención antes de que la campaña siguiente confirme plenamente un deterioro. Esa señal, por prudencia, no podía presentarse como una verdad cerrada, porque el fenómeno observado es complejo y está condicionado por factores geométricos, hidrogeológicos y temporales que ningún modelo estadístico simple agota por sí solo. Pero sí puede adoptarse como un mecanismo de prealerta capaz de ayudar a priorizar la revisión de determinados grupos o sectores de la ladera.

Desde ese punto de vista, el presente capítulo no debe leerse como una pieza independiente, sino como una prolongación natural del capítulo 5.5. Si el capítulo anterior construyó la puerta de entrada y el entorno de lectura, el presente capítulo incorpora una capa adicional que intenta responder a la pregunta de qué grupos analíticos merecen mayor vigilancia en la campaña siguiente. La base del sistema sigue siendo la misma: trazabilidad del dato, mantenimiento de la lógica dentro de Power BI y correspondencia clara entre la información visible y la estructura real del caso de estudio. Lo que cambia es la incorporación de Azure Machine Learning como motor externo para generar una predicción bruta que luego será reinterpretada dentro del panel.

5.6.2 Objeto del capítulo y criterio general adoptado

El objeto de este apartado es describir, con carácter operativo y no meramente teórico, el proceso completo seguido para integrar Azure Machine Learning con Power BI en el contexto del TFM. Esto incluye el planteamiento inicial del problema, los sucesivos entrenamientos realizados, la comparación entre alternativas de modelización, las dificultades encontradas al intentar llevar la inferencia a una cadena utilizable y, finalmente, la solución adoptada para que los resultados puedan incorporarse al cuadro de mando sin perder estabilidad ni trazabilidad.

Desde el comienzo se establece un criterio general de prudencia. La predicción generada por el modelo no se va a utilizar como decisión operativa final, ni tampoco como sustitución de los umbrales construidos a partir de la auscultación real. Su función será más modesta y, al mismo tiempo, más útil: actuar como una prealerta. Dicho de otro modo, el modelo debe servir para señalar grupos analíticos cuya campaña siguiente puede no permanecer en condición verde, de forma que el técnico los revise con mayor atención. La traducción de esa señal a un estado de explotación dentro del informe se dejará a Power BI, donde será posible combinar la predicción con reglas de persistencia y con el contexto temporal efectivo del panel.

Este criterio es decisivo por dos motivos. En primer lugar, porque encaja mejor con el comportamiento real de un deslizamiento, donde el juicio técnico nunca puede delegarse enteramente en una única herramienta. En segundo lugar, porque permite absorber mejor los inevitables errores de clasificación. Un modelo que comete falsos positivos puede seguir siendo útil como prealerta, mientras que un modelo con falsos negativos elevados resulta mucho más problemático si se pretendiera usar como semáforo final. La arquitectura conceptual del bloque se

construye, por tanto, sobre esa distinción entre predicción bruta, prealerta, persistencia y estado operativo.

5.6.3 Condiciones de partida, datos disponibles y restricciones reales del proyecto

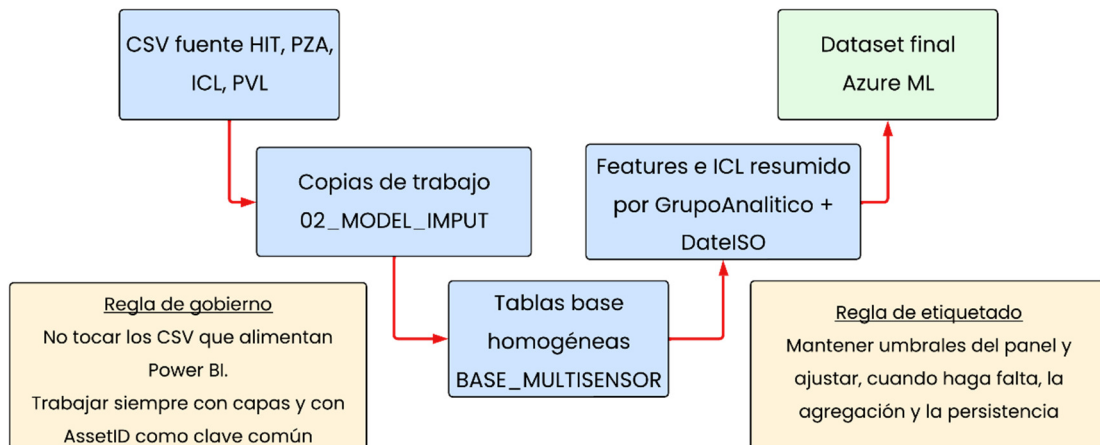


Ilustración 130. Secuencia de construcción del dataset de modelado. Elaboración propia

El trabajo arranca con un conjunto de datos ya consolidado a partir de la fase anterior del proyecto. Las campañas de auscultación están estructuradas y normalizadas para su explotación analítica, y el *dataset* preparado para Azure ML reúne la información relevante a nivel de grupo analítico y fecha. Esta precisión es importante: aunque la lectura espacial en InfraWorks y muchas páginas del cuadro de mando están orientadas al sensor concreto o al activo individual, el modelo predictivo no opera a esa escala, sino a una escala agregada definida por cuatro grupos analíticos y sus sucesivas campañas.

Tabla 39. Grupo Analítico A. Elaboración propia

Grupo Analítico	Técnica	AssetID	Nombre
GA_A	PZA	E0XXHUPZA001	PZA001
GA_A	PZA	E0XXHUPZA004	PZA004
GA_A	PZA	E0XXHUPZA011	PZA011
GA_A	PZA	E0XXHUPZA015	PZA015
GA_A	PZA	E0XXHUPZA016	PZA016
GA_A	HIT	E0XXHUHIT001	HIT001
GA_A	HIT	E0XXHUHIT002	HIT002
GA_A	HIT	E0XXHUHIT005	HIT005
GA_A	HIT	E0XXHUHIT006	HIT006

GA_A	HIT	E0XXHUHIT010	HIT010
GA_A	HIT	E0XXHUHIT011	HIT011
GA_A	HIT	E0XXHUHIT013	HIT013
GA_A	HIT	E0XXHUHIT016	HIT121

Tabla 40. Grupo Analítico B. Elaboración propia

Grupo Analítico	Técnica	AssetID	Nombre
GA_B	PZA	E0XXHUPZA002	PZA002
GA_B	PZA	E0XXHUPZA005	PZA005
GA_B	PZA	E0XXHUPZA006	PZA006
GA_B	PZA	E0XXHUPZA007	PZA007
GA_B	PZA	E0XXHUPZA012	PZA012
GA_B	PZA	E0XXHUPZA013	PZA013
GA_B	PZA	E0XXHUPZA017	PZA017
GA_B	PZA	E0XXHUPZA018	PZA018
GA_B	HIT	E0XXHUHIT007	HIT007
GA_B	HIT	E0XXHUHIT009	HIT009
GA_B	HIT	E0XXHUHIT017	HIT231
GA_B	HIT	E0XXHUHIT018	HIT232
GA_B	HIT	E0XXHUHIT019	HIT233
GA_B	HIT	E0XXHUHIT020	HIT234
GA_B	ICL	E0XXHUICLI01	ICLI01
GA_B	ICL	E0XXHUICLI02	ICLI02
GA_B	ICL	E0XXHUICLI03	ICLI03
GA_B	ICL	E0XXHUICLI05	ICLI05
GA_B	ICL	E0XXHUICLM06	ICLM06

Tabla 41. Grupo Analítico C. Elaboración propia

Grupo Analítico	Técnica	AssetID	Nombre
GA_C	PZA	E0XXHUPZA003	PZA003
GA_C	PZA	E0XXHUPZA008	PZA008
GA_C	PZA	E0XXHUPZA009	PZA009
GA_C	PZA	E0XXHUPZA010	PZA010
GA_C	PZA	E0XXHUPZA014	PZA014
GA_C	PZA	E0XXHUPZA019	PZA019
GA_C	HIT	E0XXHUHIT003	HIT003
GA_C	HIT	E0XXHUHIT004	HIT004
GA_C	HIT	E0XXHUHIT008	HIT008

Grupo Analítico	Técnica	AssetID	Nombre
GA_C	HIT	E0XXHUHIT012	HIT012
GA_C	HIT	E0XXHUHIT014	HIT014
GA_C	HIT	E0XXHUHIT015	HIT015
GA_C	HIT	E0XXHUHIT021	HIT235
GA_C	HIT	E0XXHUHIT022	HIT341
GA_C	HIT	E0XXHUHIT023	HIT342
GA_C	HIT	E0XXHUHIT024	HIT343

Tabla 42. Grupo Analítico D. Elaboración propia

Grupo Analítico	Técnica	AssetID	Nombre
GA_D	PVL	E0XXHUPVL001	

Esta granularidad condiciona desde el principio el tipo de pregunta que puede responderse con el modelo. No se trata de estimar el comportamiento de un instrumento aislado con identidad propia, sino de evaluar si un grupo analítico concreto, en una fecha concreta, tiene probabilidad de abandonar la condición verde en la campaña siguiente. Esa diferencia puede parecer menor sobre el papel, pero es esencial desde el punto de vista de la modelización y, más adelante, también desde el punto de vista de la integración con Power BI. Buena parte de los ajustes realizados durante el bloque derivan precisamente de reconocer esta granularidad real y de evitar forzar una lectura a nivel *AssetID* cuando el modelo no estaba entrenado para ello.

Junto a esta restricción estructural, lo descrito en este capítulo debe ser correcto en términos conceptuales, suficientemente robusto y comprensible.

Finalmente, haya que mantener la coherencia con el propio planteamiento del TFM. La memoria no pretende demostrar la superioridad abstracta de una plataforma *cloud* ni construir una solución de producción de gran escala, sino probar que es posible incorporar una capa predictiva razonable a un sistema de explotación de auscultación ya operativo. Este matiz explica que algunas alternativas potencialmente más sofisticadas se descartasen en favor de otras más sencillas, siempre que estas últimas permitan explicar con claridad el proceso seguido y sostener una cadena completa de lectura, validación y uso.

5.6.4 Primeros ensayos de AutoML y detección de una perfección artificial

Los primeros entrenamientos en Azure Machine Learning se plantean de la manera más directa posible: intentar predecir la variable EstadoRiesgo tal como aparece en el conjunto de entrada. Desde un punto de vista intuitivo, la idea parece razonable. Si ya existe una clasificación del estado de riesgo, puede pensarse que un modelo de clasificación automática es capaz de reproducirla y, a partir de ahí, ofrecer una herramienta útil de apoyo.

Sin embargo, el resultado de estos ensayos iniciales demostró muy pronto una señal de alerta metodológica.

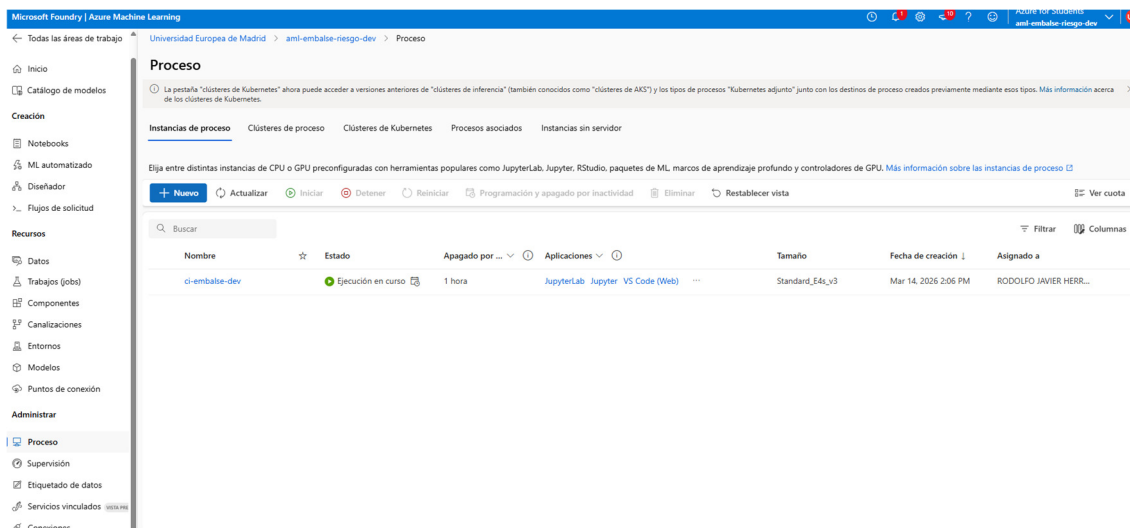


Ilustración 131. Entorno de trabajo en Azure Machine Learning Studio. Elaboración propia

Los rankings devueltos por *AutoML* mostraban numerosos modelos con valores prácticamente perfectos en las métricas agregadas. Lejos de considerarse un buen resultado, este comportamiento se interpretó como una anomalía. En problemas reales de auscultación, con variables temporales, cambios de contexto y una estructura de clases muy descompensada, no es verosímil encontrar una perfección masiva y repetida en un abanico tan amplio de algoritmos. La experiencia indica que, cuando esto ocurre, suele existir una fuga de información, una definición inadecuada del objetivo o alguna relación entre variables que hace que el modelo esté leyendo indirectamente la respuesta que se le pide predecir.

job-estado-riesgo-01 Completado

[Información general](#)
[Límites de protección de datos](#)
[Modelos y trabajos secundarios](#)
[Resultados y registros](#)
[Trabajos secundarios](#)

[Actualizar](#)
[Implementar](#)
[Descargar](#)
[Explicar modelo](#)
[Ver código generado](#)
[Restablecer vista](#)

Filtrar
Columnas

Nombre del algoritmo	IA responsable	Valor pondera...	Muestreo	Fecha de creación	Duración	Hiperparámetro
SparseNormalizer, XGBoostClassifier		1.00000	100.00 %	Mar 14, 2026 5:58 PM	43 s	booster: gbtree colsample_by: ...
StandardScalerWrapper, XGBoostClassifier		1.00000	100.00 %	Mar 14, 2026 6:37 PM	44 s	booster: gbtree colsample_by: ...
SparseNormalizer, XGBoostClassifier		1.00000	100.00 %	Mar 14, 2026 6:59 PM	45 s	booster: gbtree colsample_by: ...
StandardScalerWrapper, XGBoostClassifier		1.00000	100.00 %	Mar 14, 2026 7:07 PM	45 s	booster: gbtree colsample_by: ...
SparseNormalizer, LightGBM		1.00000	100.00 %	Mar 14, 2026 7:17 PM	44 s	boosting_type: goss colsample_by: ...
MaxAbsScaler, LogisticRegression		1.00000	100.00 %	Mar 14, 2026 7:23 PM	43 s	C:3.727593720314938 class: ...
SparseNormalizer, XGBoostClassifier		1.00000	100.00 %	Mar 14, 2026 8:06 PM	44 s	booster: gbtree colsample_by: ...
StandardScalerWrapper, XGBoostClassifier		1.00000	100.00 %	Mar 14, 2026 9:11 PM	46 s	booster: gbtree colsample_by: ...
SparseNormalizer, XGBoostClassifier		1.00000	100.00 %	Mar 14, 2026 9:37 PM	46 s	booster: gbtree colsample_by: ...
SparseNormalizer, XGBoostClassifier		1.00000	100.00 %	Mar 14, 2026 9:43 PM	39 s	booster: gbtree colsample_by: ...
SparseNormalizer, XGBoostClassifier		1.00000	100.00 %	Mar 14, 2026 9:44 PM	40 s	booster: gbtree colsample_by: ...

<< < Página 1 de 4 > >> 100/Página

Ilustración 132. Resultado del primer entrenamiento directo sobre EstadoRiesgo. Elaboración propia

Esta sospecha fue relevante porque evitó aceptar sin crítica un resultado brillante pero engañoso. En un trabajo como este, donde la intención es acercarse a una explotación útil del sistema, el valor de una métrica no puede desligarse del modo en que esa métrica se ha obtenido. Un modelo aparentemente impecable, pero construido sobre una formulación errónea del problema, no solo es inútil, sino que además puede inducir a conclusiones peligrosamente optimistas. Por esa razón, el primer bloque de experimentación se interpretó más como una fase de diagnóstico sobre la calidad del planteamiento que como una fase de selección de modelo propiamente dicha.

5.6.5 Segundo entrenamiento y revisión crítica de las variables disponibles

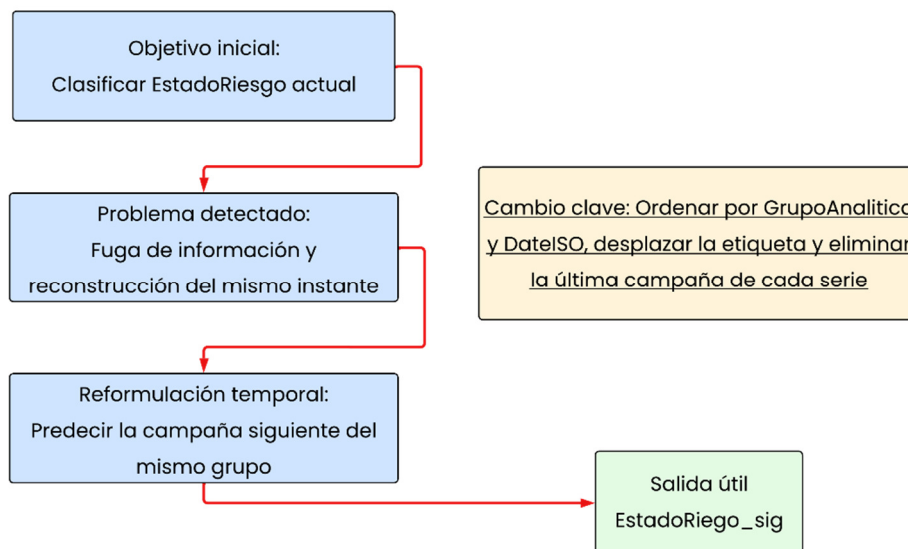
Una vez detectado que la formulación inicial no era fiable, el siguiente paso consistió en revisar el esquema de variables y eliminar aquellas que podían estar introduciendo información demasiado próxima al propio objetivo. Este trabajo no se limitó a una operación mecánica de borrar columnas; implicó entender qué significado tenía cada variable dentro del flujo de preparación de datos y si su presencia podía estar favoreciendo una clasificación artificialmente sencilla. El objetivo era reconstruir una situación de aprendizaje más honesta, aunque ello supusiera empeorar las métricas respecto al ensayo inicial.

Esta fase de depuración confirmó un aspecto que resulta muy relevante en proyectos de ingeniería de datos aplicados a obra civil o auscultación: la dificultad principal no siempre reside en elegir un

algoritmo, sino en definir de manera rigurosa qué se quiere predecir y con qué información debe permitirse al modelo trabajar. Las herramientas de *AutoML* pueden acelerar enormemente la comparación entre familias de modelos, pero no sustituyen la necesidad de formular bien el problema. De hecho, en el caso estudiado, el verdadero avance técnico del bloque no vino de encontrar un algoritmo que encajase perfectamente, sino de corregir progresivamente la pregunta planteada al sistema.

El segundo entrenamiento, aun sin resolver todavía el problema de fondo, sirvió para confirmar esta idea. Al retirar variables problemáticas desapareció parte de la perfección irreal de la primera ronda, pero seguía siendo evidente que el objetivo continuaba demasiado vinculado al estado contemporáneo de la campaña. Dicho en términos prácticos, el modelo seguía aprendiendo algo demasiado cercano a una fotografía instantánea del presente y no a una anticipación operativa del comportamiento siguiente. Esto condujo al cambio metodológico más importante de todo el bloque: la reformulación temporal del target.

5.6.6 Reformulación temporal del objetivo: construcción de EstadoRiesgo_sig



*Ilustración 133. Reformulación del problema predictivo desde el estado actual al estado de la campaña siguiente.
Elaboración propia*

El punto de inflexión del proceso llegó cuando se decidió abandonar la predicción del estado actual y pasar a predecir el estado de la campaña siguiente dentro de cada grupo analítico. Para ello se

trabajó sobre una copia del archivo de entrada, ordenando las observaciones por GrupoAnalítico y DateISO y desplazando el valor de EstadoRiesgo una fila hacia delante en cada serie temporal. El resultado fue una nueva variable objetivo, denominada EstadoRiesgo_sig, que representaba el comportamiento de la campaña posterior.

Este cambio no fue un simple ajuste técnico; supuso alinear el problema de modelización con la pregunta verdaderamente útil para la explotación. Mientras el estado actual puede conocerse por la propia campaña ya medida, el estado siguiente introduce una dimensión de anticipación que sí resulta aprovechable en el cuadro de mando. En otras palabras, el modelo dejaba de intentar reproducir lo que ya se sabía y comenzaba a estimar algo que todavía no había sido observado directamente. Esa transición era imprescindible para justificar la presencia de Azure ML dentro del sistema.

Además, la reformulación temporal mejoró de inmediato la credibilidad de los resultados. Las métricas dejaron de presentar una perfección masiva y la matriz de confusión mostró un comportamiento más realista. El modelo seguía teniendo dificultades, pero esas dificultades ya eran las propias de un problema auténtico y no las de un esquema mal planteado. Desde el punto de vista del TFM, esto tuvo un valor metodológico claro: permitió defender que la selección final no se hizo buscando la mejor cifra de forma ciega, sino corrigiendo primero la pregunta hasta que el resultado pasara a ser técnicamente interpretable.

5.6.7 Ensayo multiclase a campaña siguiente y constatación del desbalance extremo

Una vez creada la variable EstadoRiesgo_sig, se lanzó un nuevo experimento multiclase manteniendo la distinción entre Verde, Amarillo y Rojo. Este enfoque tenía sentido desde un punto de vista conceptual, ya que reproducía la misma taxonomía con la que se venía trabajando en el resto del cuadro de mando. Sin embargo, la evaluación de resultados mostró enseguida que la distribución de clases era demasiado desigual para sostener una clasificación multiclase estable y útil.

El recuento del objetivo futuro era muy revelador: 2.711 casos en Verde, 23 en Amarillo y solo 2 en Rojo. Con una estructura así, la clase dominante absorbía prácticamente todo el aprendizaje y las clases minoritarias quedaban mal representadas. La consecuencia era un modelo que, aunque ya

no ofrecía métricas “imposibles”, seguía tendiendo a predecir Verde en la inmensa mayoría de las ocasiones. Para explotación operativa, este sesgo es problemático, porque precisamente lo que interesa es reforzar la sensibilidad ante los casos que se apartan de la condición normal.

Esta constatación llevó a una decisión que podría parecer una simplificación empobrecedora, pero que en realidad fue una mejora de enfoque. Se renunció a exigir al modelo una clasificación fina entre Amarillo y Rojo, porque el tamaño muestral no permitía hacerlo con garantías. En su lugar, se priorizó una pregunta más robusta: distinguir entre campañas que previsiblemente permanecerían en Verde y campañas que, por el contrario, podían no hacerlo. Ese paso dio lugar a la recodificación binaria del objetivo futuro.

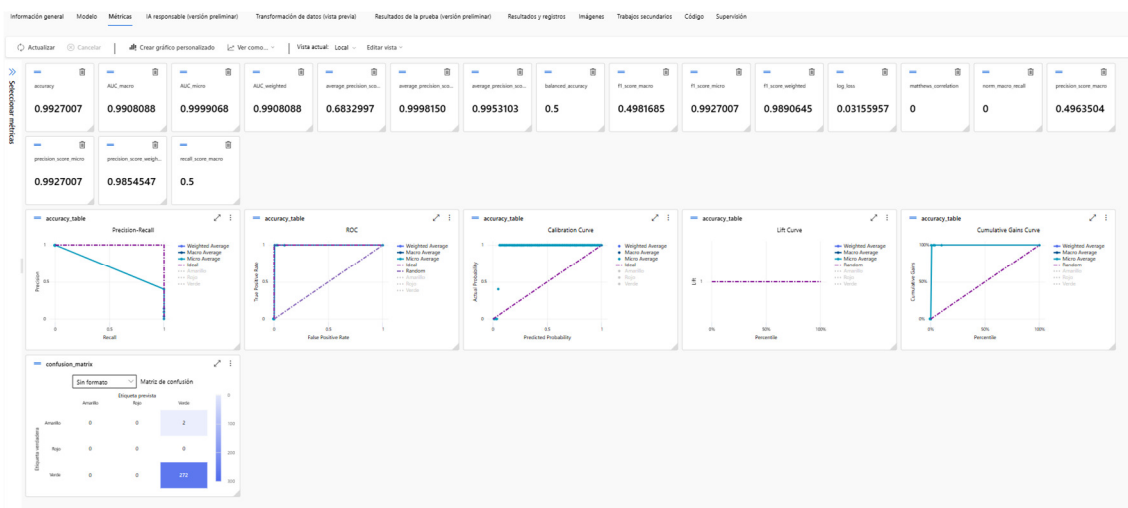


Ilustración 134. Métricas y matriz de confusión del experimento multiclase a campaña siguiente. Elaboración propia

5.6.8 Simplificación binaria del objetivo y comparación entre métricas de optimización

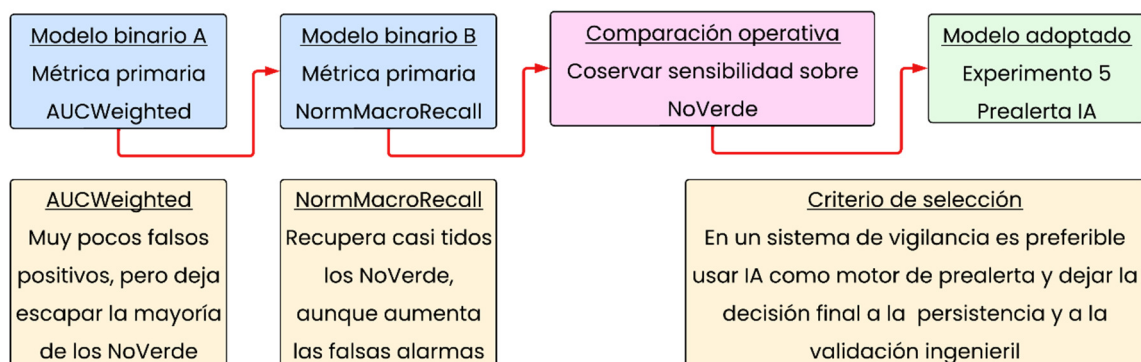


Ilustración 135. Criterio seguido para seleccionar el modelo de referencia. Elaboración propia

El target futuro se recodificó en dos clases: Verde y NoVerde, agrupando dentro de esta última las situaciones que en la taxonomía original correspondían a Amarillo y Rojo. Esta decisión no elimina la riqueza conceptual del sistema de umbrales, pero sí adapta la predicción al volumen real de información disponible. En lugar de pedir al modelo que distinguiera con precisión entre dos clases muy escasas, se le pedía que detectase si la campaña siguiente de un grupo merecía o no una atención reforzada. Desde el punto de vista operativo, la pregunta resultaba mucho más razonable.

Sobre esta formulación binaria se lanzaron dos entrenamientos comparables, cambiando únicamente la métrica primaria utilizada por *AutoML*.

El primero se optimizó con *AUCWeighted*. El segundo empleó *NormMacroRecall*.

La comparación entre ambos fue sumamente instructiva porque mostró de forma muy clara cómo una elección aparentemente académica en realidad condiciona por completo el comportamiento de la herramienta en explotación.

El modelo optimizado con *AUCWeighted* se mostró muy conservador. Clasificaba muy bien la clase mayoritaria Verde y generaba pocos falsos positivos, pero apenas detectaba una fracción pequeña de los casos NoVerde. Desde una óptica puramente estadística, podía considerarse un modelo correcto. Sin embargo, desde la óptica del seguimiento de una ladera, ese comportamiento era insuficiente, porque sacrificaba demasiada sensibilidad precisamente en la zona que más interesaba vigilar.

El modelo optimizado con *NormMacroRecall* hizo el movimiento contrario: aumentó de forma muy notable la recuperación de la clase minoritaria y redujo los falsos negativos a un nivel mucho más aceptable, aunque a costa de incrementar los falsos positivos sobre Verde.

Fue en este punto cuando se adoptó definitivamente un criterio de ingeniería y no solo de laboratorio. En una aplicación de seguimiento del deslizamiento, un falso positivo implica revisar con más atención un grupo que finalmente puede no empeorar. Eso introduce ruido, pero es tolerable. En cambio, un falso negativo implica dejar pasar una señal que sí podría merecer vigilancia, lo que resulta menos aceptable. Por este motivo se eligió como base el modelo optimizado con *NormMacroRecall*, pero con la cautela de no convertir su salida en un estado final directo.

Tabla 43. Comparativa de resultados entre modelos

Experimento	Métrica primaria	NoVerde detectados	NoVerde escapados	Lectura operativa
job-estado-riesgo-04-bin-t1	<i>AUCWeighted</i>	2 de 28	26	Modelo demasiado conservador para vigilancia temprana
job-estado-riesgo-05-bin-t1-normrecall	<i>NormMacroRecall</i>	27 de 28	1	Modelo adecuado como motor de prealerta, no como decisor final

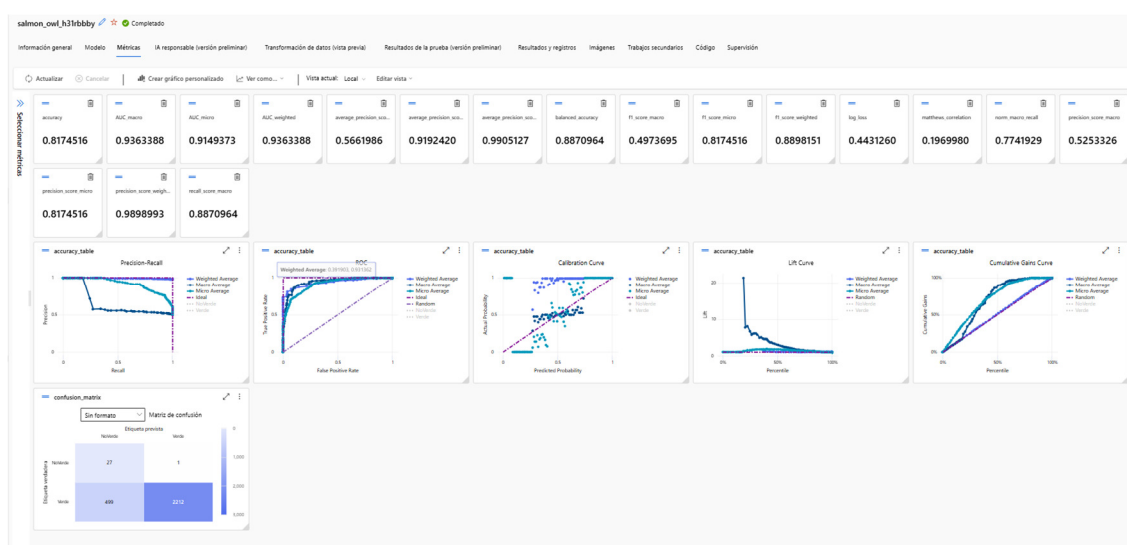


Ilustración 136. Métricas y matriz de confusión del modelo binario optimizado con NormMacroRecall. Elaboración propia

5.6.9 Decisión final sobre el papel de la IA: motor de prealerta y no decisor único

La comparación entre los ensayos binarios permitió fijar la decisión conceptual más importante del capítulo. Azure Machine Learning se iba a incorporar al sistema, pero no como una capa soberana que dictase por sí sola el semáforo final. La IA debía limitarse a generar una predicción bruta del tipo Verde / NoVerde para la campaña siguiente, y esa señal se utilizaría dentro de Power BI como motor de prealerta. La traducción final a un nivel operativo visible para el usuario se haría mediante reglas adicionales.

Esta decisión fue especialmente coherente con la naturaleza del caso de estudio. La auscultación de una ladera vinculada a un embalse no puede resumirse de manera fiable en una salida binaria aislada. El comportamiento relevante no depende únicamente de la última predicción, sino también

de la persistencia temporal, de la posición espacial, del tipo de técnica y de la comparación con campañas previas. De ahí que el panel necesite una lógica propia para elevar una predicción a aviso o a alarma. La regla de persistencia en campañas consecutivas se adoptó precisamente para filtrar señales puntuales y dar más peso a los patrones repetidos.

Esta solución permite explicar con precisión qué aporta Azure ML y qué sigue aportando Power BI. El servicio *cloud* resuelve la inferencia y devuelve una señal predictiva; el cuadro de mando interpreta esa señal dentro de un contexto temporal filtrado y la presenta con criterios visuales y operativos consistentes con el resto de las páginas. La frontera entre ambos papeles queda así bien delimitada.

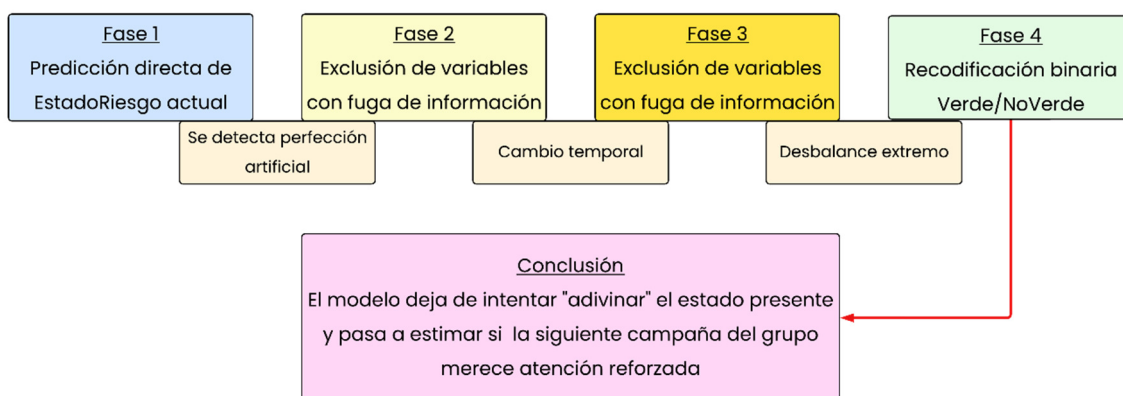


Ilustración 137. Evolución de la formulación del problema predictivo hasta llegar al objetivo futuro binario. Elaboración propia

Tabla 44. Evolución de las formulaciones del problema y motivo de cada cambio. Elaboración propia

Fase	Objetivo planteado	Problema detectado	Decisión adoptada
1	EstadoRiesgo actual	Perfección artificial y posible fuga de información	Revisar variables y replantear el <i>target</i>
2	Estado actual depurado	Sigue siendo una pregunta demasiado contemporánea	Pasar a campaña siguiente
3	EstadoRiesgo_sig multiclase	Desbalance extremo entre Verde, Amarillo y Rojo	Simplificar a binario
4	EstadoRiesgo_sig binario	Dependencia fuerte de la métrica elegida	Comparar <i>AUCWeighted</i> y <i>NormMacroRecall</i>
5	Prealerta binaria operativa	No debe decidir sola el semáforo final	Combinar con persistencia en Power BI

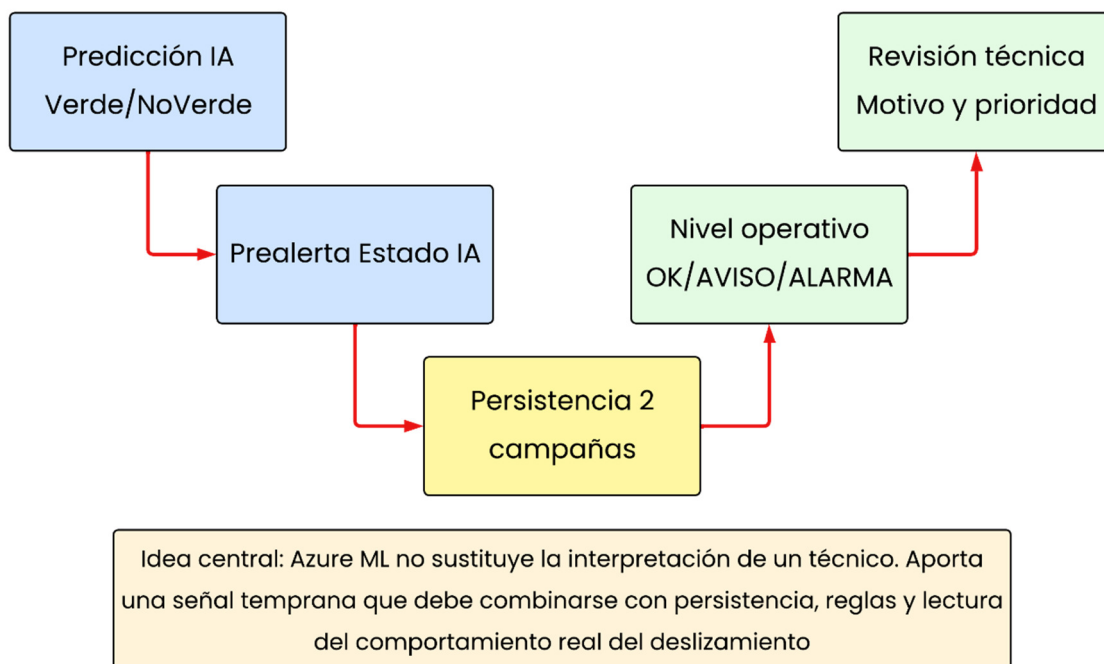


Ilustración 138. Lógica de explotación acordada para combinar predicción IA y criterio técnico. Elaboración propia

5.6.10 Registro del modelo y primeros intentos de despliegue *batch*

Una vez seleccionada la formulación binaria y el criterio de explotación general, el trabajo se desplazó desde el entrenamiento hacia la puesta en operación de la inferencia. A partir del *job* de *AutoML* completado se registró el modelo *MLflow* en el *workspace* de Azure Machine Learning, manteniendo la trazabilidad con el experimento original y dejando preparada la posibilidad de desplegarlo como *endpoint batch* (puntos de conexión por lotes). Sobre el papel, esta era una solución atractiva: permitía ejecutar inferencias en bloque dentro del propio ecosistema de Azure ML y aspiraba a generar una salida reutilizable por Power BI.

El primer despliegue *batch* llegó a funcionar y produjo una salida de *score*. Sin embargo, al intentar revisar esa salida desde la interfaz y pensar en su utilización posterior, aparecieron las primeras dificultades. La estructura generada por el servicio no resultaba especialmente cómoda para un consumo analítico directo. No bastaba con que existiera una predicción; esa predicción tenía que poder localizarse, entenderse, descargarse y gobernarse con seguridad dentro de un flujo de explotación que no dependiera de operaciones manuales oscuras o difíciles de repetir.

Con la intención de mejorar ese punto, se abrió una segunda línea de trabajo orientada a forzar una salida más limpia mediante script y entorno personalizados. En esta fase se configuraron implementaciones *batch* con código de *scoring* propio y con dependencias definidas expresamente. El propósito era bueno: obtener un fichero final controlado por el usuario y no por el formato estándar del servicio. Sin embargo, el camino se volvió más costoso de lo previsto en términos de tiempo y depuración.

5.6.11 Incidencias de la vía *batch* y razones para no mantenerla como solución principal

La interfaz de Studio no siempre reflejó con claridad si el script y el entorno personalizados quedaban verdaderamente ligados a la implementación. Ello obligó a rehacer parte del proceso mediante CLI y ficheros YAML, fijando explícitamente el modelo, el compute, el *scoring_script*, el *environment* y otros parámetros de ejecución. Esta maniobra permitió avanzar, pero también mostró que la solución se alejaba de la sencillez deseable para el proyecto.

Durante la depuración aparecieron además incidencias de dependencias. En distintos momentos faltaron módulos necesarios para la ejecución del *runtime batch*, lo que obligó a reconstruir entornos y a relanzar trabajos. Aunque finalmente se consiguió que la implementación llegara a estado *Completed*, la materialización de un resultado fácilmente explotable seguía sin quedar resuelta de un modo satisfactorio. Se alcanzaba, por decirlo así, una validez técnica parcial del despliegue, pero no una cadena limpia de explotación para Power BI.

La conclusión práctica fue clara: Azure ML seguiría siendo el motor de predicción, pero la vía *batch* personalizada no debía mantenerse como solución principal para alimentar el panel. Había que buscar una arquitectura más sencilla, estable y trazable.

5.6.12 Replanteamiento de la arquitectura de intercambio y adopción de Azure SQL Database

El replanteamiento de la arquitectura respondió a una idea muy simple: si el problema estaba en la fragilidad del formato intermedio, convenía sustituir ese formato por un repositorio estructurado y persistente. *Azure SQL Database* ofrecía justamente eso. En lugar de depender de un CSV limpio generado de forma indirecta por la lógica *batch*, podía insertarse la salida ya preparada en una tabla con esquema conocido y dejar que Power BI leyera directamente desde ella. La arquitectura

resultante era menos vistosa desde el punto de vista tecnológico, pero mucho más robusta para el objetivo perseguido.

El paso a *Azure SQL Database* aportó varias ventajas inmediatas. En primer lugar, introdujo una capa intermedia estable, donde las predicciones podían almacenarse con campos definidos, claves lógicas y metadatos. En segundo lugar, simplificó la conexión con Power BI, que trabaja con absoluta naturalidad sobre tablas SQL. En tercer lugar, permitió gobernar de manera más clara la granularidad real del modelo. La tabla final podía diseñarse expresamente a nivel de grupo analítico, fecha de campaña y versión de modelo, en lugar de intentar encajar la información en una estructura pensada para sensores individuales.

Esta decisión, además, no rompe la coherencia del sistema general. El modelo y las páginas históricas siguen operando con su lógica espacial y por activo donde corresponde. La capa predictiva, sin embargo, se reconoce a sí misma como una capa de grupo analítico. El panel final puede mostrar esa información sin fingir una precisión superior a la realmente disponible. Desde el punto de vista metodológico, es una de las fortalezas del bloque.

5.6.13 Creación y validación inicial de la base de datos Azure SQL

Con la decisión ya tomada, el siguiente paso fue crear un servidor SQL específico y, sobre él, una base de datos individual con configuración básica suficiente para el alcance del trabajo. El objetivo de esta fase no era todavía cargar el resultado definitivo del modelo, sino comprobar que el ciclo de conexión, escritura y lectura resultaba estable. En proyectos con plazos ajustados, esta validación temprana del canal técnico es muy valiosa, porque evita invertir esfuerzo en generar tablas complejas antes de confirmar que el origen de datos podrá ser consumido sin incidencias.

Una vez desplegada la base de datos, se accedió a ella mediante el editor de consultas del portal y se generó una primera tabla de prueba. Esta operación fue útil por dos razones. Por un lado, permitió verificar que la lógica básica de creación de esquema funcionaba correctamente. Por otro, sirvió para ensayar el futuro comportamiento de Power BI ante un origen SQL alojado en Azure, confirmando que la conexión era viable y que los datos podían recuperarse sin recurrir a soluciones intermedias más frágiles.

Esta fase de comprobación puede parecer elemental, pero en realidad fue decisiva para dar seguridad al bloque. A partir de ese momento, el desarrollo dejaba de depender de la posibilidad incierta de obtener un fichero de salida exacto desde un *job batch* y pasaba a apoyarse en una base de datos controlada. Desde una perspectiva de ingeniería, el sistema ganaba mucha más estabilidad de la que aparenta a primera vista.

5.6.14 Reconocimiento de la granularidad real del modelo y consecuencias para el panel

La primera importación en Power BI de una tabla de prueba procedente de Azure SQL permitió comprobar que la conexión funcionaba. Sin embargo, también puso de manifiesto una cuestión de fondo: el modelo predictivo no estaba trabajando a nivel *AssetID*, sino a nivel de GrupoAnalítico y FechaCampana. Este hallazgo obligó a abandonar cualquier tentativa de presentar la capa IA como si fuera una predicción individual por sensor. Hacerlo habría generado una falsa apariencia de precisión y, además, habría introducido inconsistencias al relacionar la tabla con el resto del modelo.

Reconocer la granularidad real del sistema implicó rediseñar la tabla final para respetar exactamente el nivel al que el modelo operaba. La clave lógica pasó a estar formada por GrupoAnalítico, FechaCampana y ModeloVersion. Esta decisión permitía conservar la trazabilidad del resultado, distinguir distintas versiones del modelo si fuera necesario y, sobre todo, evitar duplicidades o relaciones artificiales con entidades que el algoritmo no estaba utilizando como unidad de predicción.

Desde el punto de vista del cuadro de mando, esta decisión tiene una traducción visual clara. La página PREDICCIÓN IA no debía plantearse como una ficha por instrumento, sino como una vista comparativa por grupo, capaz de mostrar cuál de los grupos analíticos presenta mayor prioridad dentro del periodo visible. Esa lectura, lejos de ser una limitación, encaja muy bien con la finalidad de la página: orientar la atención del técnico hacia sectores o agrupaciones que merecen revisión, antes de descender de nuevo al detalle histórico por técnica o por activo.

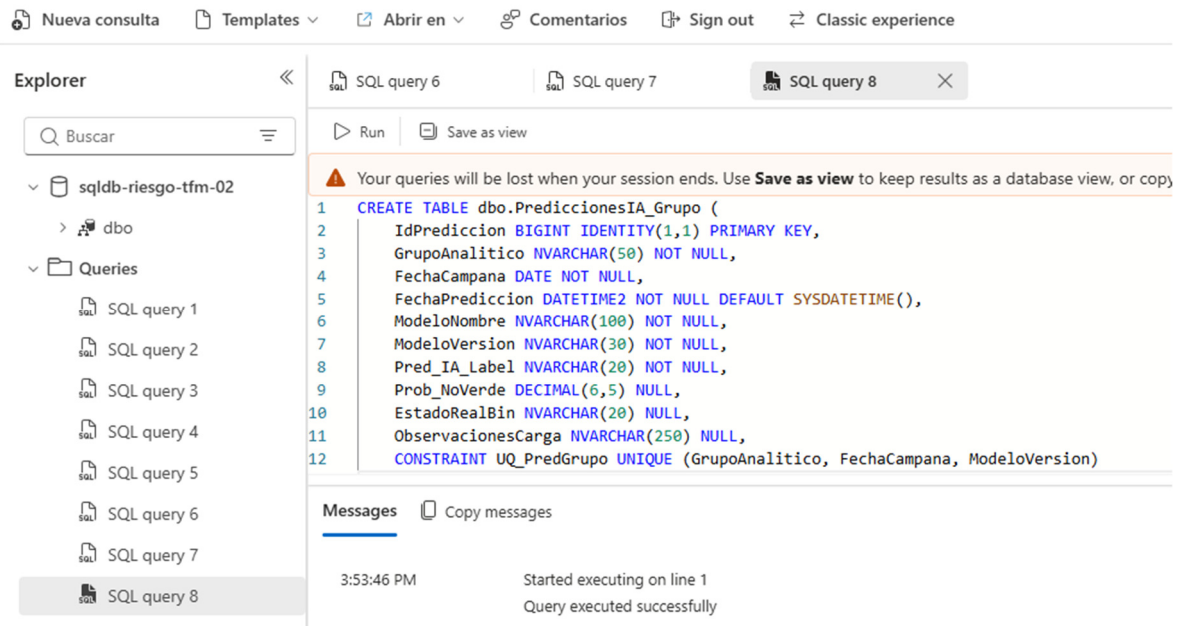


Ilustración 139. Creación de la tabla en Azure SQL Database mediante el editor de consultas del portal, ya con una estructura pensada para explotación analítica. Captura procedente del documento operativo.

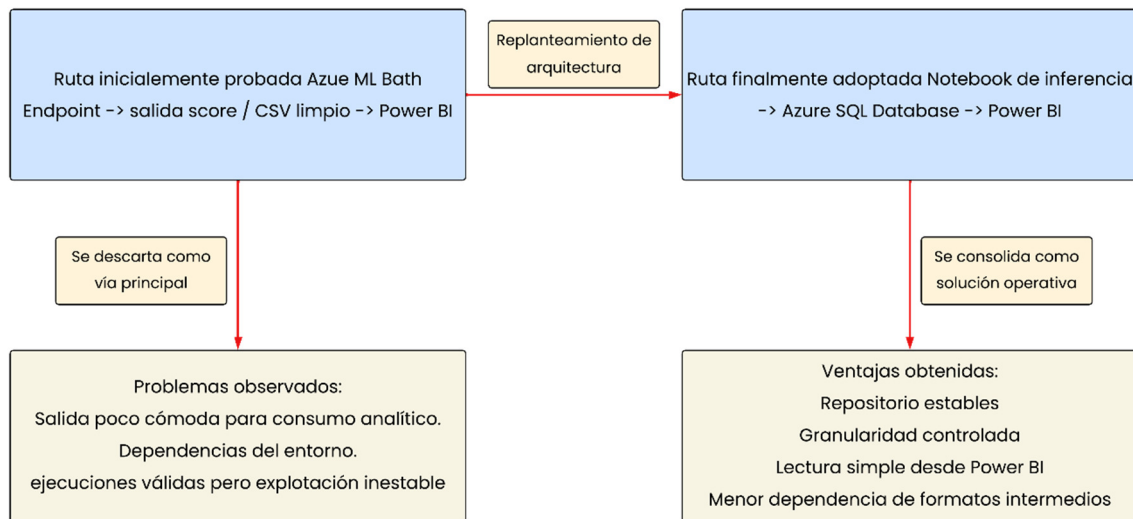


Ilustración 140. Comparación entre la ruta batch inicialmente probada y la arquitectura finalmente adoptada. Elaboración propia.

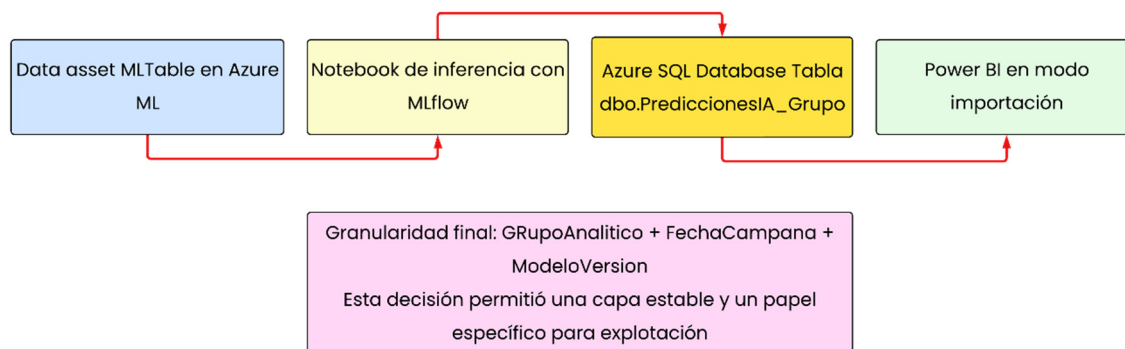


Ilustración 141. Arquitectura finalmente adoptada para conectar el modelo de Azure ML con la explotación en Power BI mediante Azure SQL Database. Elaboración propia

5.6.15 Notebook de Azure Machine Learning y lectura del histórico real

Con la arquitectura ya definida, se creó dentro del *workspace* un notebook específico para gestionar toda la secuencia de lectura del *data asset*, descarga del modelo registrado, ejecución de la inferencia y carga posterior a SQL. Esta elección fue importante porque permitía concentrar en un mismo punto una cadena completa y transparente de operaciones, sin depender de automatismos poco visibles. En un entorno académico y con finalidad demostrativa, disponer de esa trazabilidad en un notebook aporta un valor añadido notable.

El *data asset* leído correspondía al conjunto histórico binario utilizado en la fase final de modelización. Su lectura devolvió 2.739 filas y 13 columnas, confirmando que la variable temporal relevante era *DateISO* y que la identificación operativa del resultado debía resolverse mediante los cuatro grupos analíticos presentes en el *dataset*. Esta comprobación cerró definitivamente cualquier duda sobre la escala de trabajo del modelo.

El modelo registrado se descargó desde el registro del *workspace* y se ejecutó mediante *MLflow* en un entorno Conda aislado. La elección de un entorno aislado evitó buena parte de los problemas de dependencias que habían aparecido durante la vía *batch*. La inferencia sobre el histórico completo pudo así realizarse de manera controlada, generando una predicción para cada fila y permitiendo construir después un *DataFrame* ya adaptado a la estructura de la tabla SQL.

5.6.16 Construcción de la tabla final dbo.PrediccionesIA Grupo y carga masiva

Una vez obtenidas las predicciones, se preparó la tabla final dbo.PrediccionesIA_Grupo. La estructura se definió con un número contenido de columnas, pero suficiente para mantener la información verdaderamente útil de explotación. Junto al identificador de grupo y a la fecha de campaña, la tabla incluía la fecha de predicción, la versión del modelo, la etiqueta predicha, un indicador de prealerta y varios campos de metadatos y observaciones de carga. Con ello se conseguía que la tabla fuera a la vez ligera para el panel y suficientemente expresiva para trazabilidad.

Antes de insertar el resultado en SQL se comprobó que no existían duplicados para la clave lógica GrupoAnalitico + FechaCampana + ModeloVersion. Esta comprobación era importante porque una duplicidad en ese nivel habría generado un comportamiento ambiguo en el panel, especialmente en tablas, rankings y medidas de última campaña. Verificada la unicidad, se procedió a la carga masiva de las 2.739 filas en la tabla definitiva.

Desde el punto de vista metodológico, este paso marca el cierre del tránsito entre la fase de modelización y la fase de explotación. A partir de aquí, Azure ML deja de ser un entorno aislado de pruebas para convertirse en un productor de resultados que se insertan de forma estable en una base de datos. En ese momento la cadena ya puede ser leída, gobernada y visualizada dentro del cuadro de mando general.

5.6.17 Importación en Power BI y reconstrucción de la lógica operativa

La tabla PrediccionesIA_Grupo se importó en Power BI como nueva fuente de trabajo y pasó a sustituir a las tablas provisionales utilizadas durante los ensayos de conexión. Desde ese momento, el reto ya no consistía en obtener una predicción, sino en traducirla a una lectura operativa visualmente coherente con el resto del informe. Para ello se reconstruyó la lógica mediante columnas calculadas y medidas DAX específicas.

Entre las columnas más relevantes figuraban Persistencia_2camp, Nivel_operativo_final, Motivo_alerta, MesCampana y MesCampana_Txt. La primera recogía la existencia de repetición en dos campañas consecutivas de la señal no verde y actuaba como filtro básico para elevar la prealerta. La segunda sintetizaba el nivel operativo que iba a mostrarse en la página. La tercera

proporcionaba una justificación textual de la alerta. Las variables de mes se incorporaron para facilitar un gráfico temporal limpio y comprensible.

En esta fase apareció una incidencia especialmente interesante. La columna estática `Es_Ultima_Campana` no resultaba válida cuando el usuario filtraba periodos históricos dentro del informe, porque solo marcaba la última campaña absoluta de toda la tabla. En consecuencia, la página se comportaba mal cuando se cambiaba el intervalo visible. La solución adoptada fue sustituir esa lógica por una medida dinámica, `Mostrar_Ultima_En_Contexto`, capaz de localizar la fecha máxima dentro del contexto filtrado y de respetar así el periodo realmente visible para el usuario. Este ajuste fue decisivo para la consistencia técnica del panel.

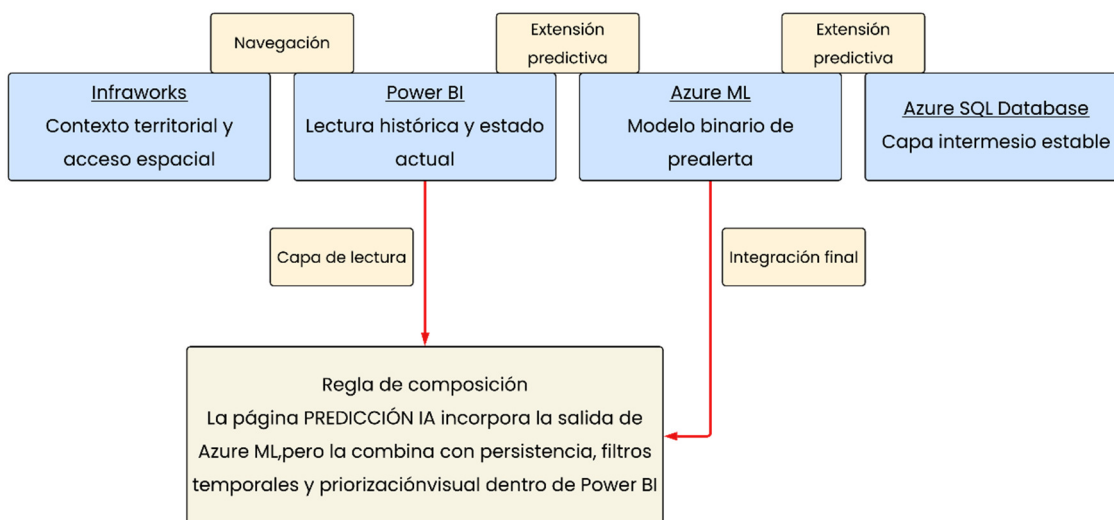


Ilustración 142. Capas funcionales de la arquitectura final: contexto territorial, lectura histórica, inferencia y repositorio intermedio. Elaboración propia

5.6.18 Desarrollo de la página PREDICCIÓN IA en Power BI

La página PREDICCIÓN IA se diseñó siguiendo el mismo formato visual que el resto del cuadro de mando. La cabecera se resolvió con cajas azules y tarjetas de estado; la zona central quedó ocupada por una tabla principal y un ranking de grupos; la banda inferior reunió contadores resumidos y, finalmente, una franja destacada de prioridad operativa cerró la lectura. Este planteamiento evitó introducir una estética ajena al sistema ya construido y facilitó que el usuario interpretase la nueva página como una extensión natural del informe.

En la franja superior se dispusieron los principales campos de contexto: Grupo Analítico, Modelo, Estado IA, Última Campaña, Periodo de Estudio y Grupo activo. La zona central se reservó para una tabla con el detalle de predicción por campaña y para un ranking resumido de los grupos, de manera que el usuario pudiera obtener a la vez una lectura tabular y una priorización rápida. En la banda inferior se colocaron las tarjetas de Grupos en ALARMA, AVISO y CONTROL, junto con un gráfico de conteo por nivel operativo agrupado por mes. La franja final de prioridad actual se dejó como un mensaje dinámico en color, pensado para comunicar en una sola línea qué grupo merecía atención inmediata.

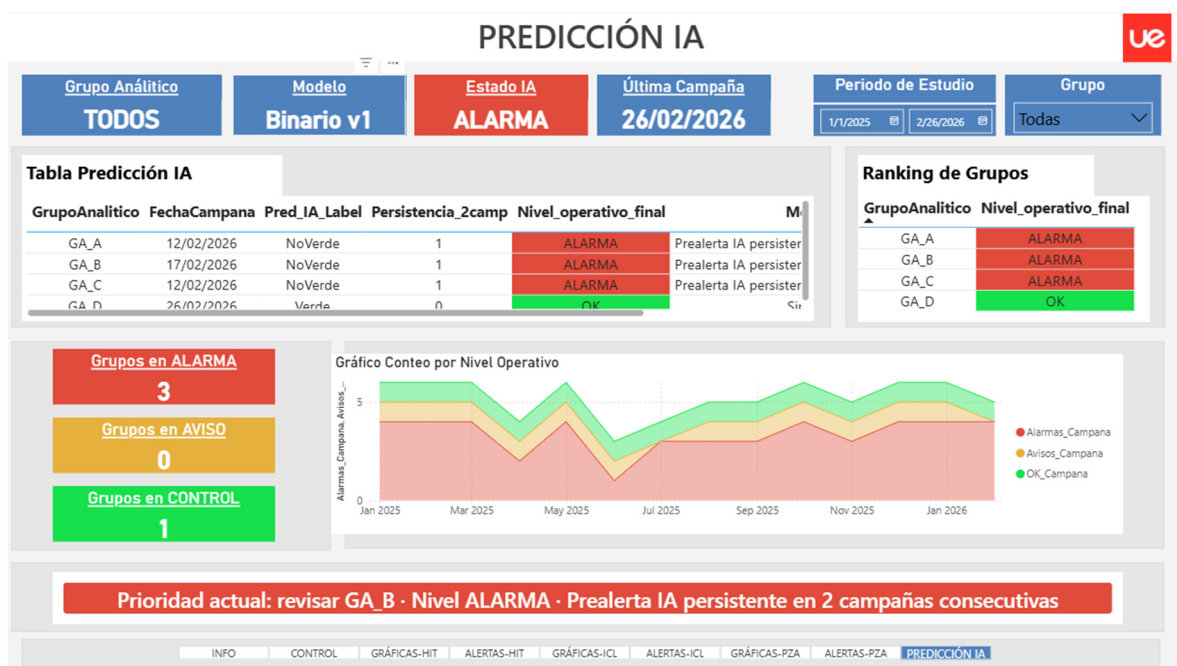


Ilustración 143. Estado final de la página PREDICCIÓN IA en Power BI. Elaboración propia

5.6.19 Criterio de navegación desde CONTROL y necesidad de apertura limpia

La nueva página debía integrarse en la lógica general del informe sin perturbar el modo de acceso construido previamente desde InfraWorks y desde la página CONTROL. Se acordó por ello que la navegación hacia PREDICCIÓN IA se realizaría dentro del mismo informe, pero evitando que arrastrase filtros contextuales de páginas pensadas para el detalle por activo. El problema era claro: si la página predictiva heredaba determinados filtros previos, corría el riesgo de abrirse en un estado incompleto o poco representativo de la información de grupo que debía mostrar.

La solución adoptada fue preparar la página en un estado limpio y crear un *bookmark* específico para acceder a ella sin arrastrar el contexto anterior. Desde CONTROL se implementó un botón con acción de marcador, de modo que la entrada en PREDICCIÓN IA reprodujera siempre la vista prevista por diseño. Este detalle de navegación, aparentemente menor, es en realidad muy importante. Sin él, el usuario podría llegar a interpretar la capa predictiva como una prolongación por activo de páginas que en realidad responden a otra granularidad.

Desde una perspectiva de explotación, el criterio es coherente: InfraWorks conduce al usuario hacia CONTROL dentro del contexto espacial del elemento seleccionado; desde CONTROL, el técnico decide si entra en páginas históricas por técnica o si abre la vista predictiva limpia para revisar el conjunto de grupos. De esta manera, el flujo completo conserva el equilibrio entre contexto espacial, detalle histórico y síntesis anticipativa.

5.6.20 Validación técnica de la cadena completa

La validación del bloque descrito en este capítulo no se limitó a comprobar que los visuales quedaran correctamente maquetados. Se realizó una verificación por etapas que reproducía el mismo itinerario de uso previsto para un técnico de explotación. En primer lugar, se contrastó que la lógica del modelo y las predicciones generadas en el Notebook fueran coherentes con la estructura del histórico y con la definición binaria adoptada. En segundo lugar, se verificó que la tabla SQL recibía la carga completa sin duplicidades de clave lógica. En tercer lugar, se revisó la página en Power BI Desktop, donde era más sencillo identificar problemas de medida, formato o contexto.

Superada esa fase, la comprobación continuó en Power BI Service. Esta transición es importante porque algunos errores no aparecen en el entorno local y sí se manifiestan tras la publicación, especialmente cuando intervienen *bookmarks*, filtros de navegación o comportamientos ligeramente distintos en los visuales. Finalmente, se contrastó la secuencia de apertura desde CONTROL, asegurando que la página PREDICCIÓN IA se mostraba limpia y que el panel mantenía la coherencia interna una vez dentro.

El criterio de aceptación fue, por tanto, exigente. El bloque se consideró cerrado solo cuando coincidieron cuatro niveles:

- Validez de la inferencia.
- Corrección de la tabla intermedia.
- Coherencia del modelo Power BI.
- Comportamiento estable de la navegación dentro del informe.

Esta forma de validar resulta especialmente adecuada en un TFM aplicado, porque evita dar por bueno un resultado que funciona en una pieza aislada, pero se rompe cuando se inserta en la cadena completa de uso.

5.6.21 Resultado alcanzado y aportación del bloque al seguimiento del deslizamiento

El resultado alcanzado puede resumirse como la incorporación de una capa predictiva prudente, explicable y operativa dentro del cuadro de mando general. El sistema final no presenta a Azure Machine Learning como un oráculo, sino como un productor de señales de prealerta que, una vez trasladadas a SQL y leídas por Power BI, pasan a formar parte de una página nueva de priorización. Esta página no reemplaza las históricas ni invalida los umbrales definidos a partir de la auscultación, pero añade un nivel de anticipación que antes no existía.

Desde el punto de vista de la explotación del deslizamiento, la aportación es clara. El técnico no necesita esperar a una lectura puramente retrospectiva de campañas para saber por dónde conviene empezar la revisión. Puede abrir la página PREDICCIÓN IA y obtener, para el periodo visible, una jerarquía de grupos que merecen atención reforzada. Después puede descender de nuevo al detalle histórico por técnica y contrastar si esa señal predictiva encuentra apoyo en las series temporales, en las tasas o en la posición espacial de los instrumentos implicados.

En otras palabras, este bloque amplía la capacidad del sistema sin traicionar su filosofía inicial. La integración BIM - BI seguía siendo el eje de lectura territorial y de consulta analítica. La incorporación de Azure ML añade ahora una capa adicional de priorización. Esa combinación entre territorio, histórico y anticipación es precisamente uno de los elementos de mayor valor.

5.6.22 Discusión técnica: ventajas, límites y lectura crítica del sistema

La principal ventaja de la solución adoptada es que separa bien los papeles y evita forzar a cada herramienta a hacer lo que no le corresponde. Azure ML se utiliza para entrenar y ejecutar un

modelo de clasificación binaria sobre el histórico preparado. Azure SQL funciona como repositorio estable y trazable. Power BI integra la capa predictiva con el resto de la lógica de explotación, incluyendo reglas temporales, resúmenes visuales y navegación dentro del informe. Gracias a esta separación, el sistema resulta mucho más comprensible que si toda la complejidad se hubiera concentrado en una única plataforma o en una cadena opaca de scripts.

La segunda ventaja es de tipo metodológico. El bloque no se limita a mostrar un resultado final, sino que deja constancia de los errores detectados y de las decisiones adoptadas para corregirlos. Se parte de una primera formulación engañosa, se corrige la definición del objetivo, se reconoce el desbalance de clases, se elige conscientemente una métrica que prioriza la sensibilidad y se establece un papel prudente para la IA. Esta secuencia, lejos de ser un rodeo, constituye una parte valiosa del aprendizaje técnico.

No obstante, también existen límites claros. El modelo trabaja con un histórico concreto y con una granularidad por grupo analítico; por tanto, no debe interpretarse como una predicción fina por sensor. Su salida es una prealerta, no una certeza de comportamiento futuro. Además, la propia necesidad de incorporar persistencia en Power BI pone de manifiesto que la predicción aislada puede producir ruido y que no debe convertirse automáticamente en una alarma operativa. Por otro lado, el sistema depende de que el histórico y las campañas futuras sigan preparándose con disciplina y con criterios homogéneos.

En definitiva, la lectura crítica más justa del bloque es la siguiente: el sistema no resuelve por sí solo el problema del deslizamiento, pero sí demuestra que una capa de predicción integrada y bien gobernada puede reforzar la explotación técnica del caso.

5.6.23 Condiciones necesarias para su mantenimiento y posibles mejoras futuras

Para que la solución desarrollada pueda mantenerse en campañas futuras es necesario conservar varias condiciones de trabajo. La primera es la estabilidad de la estructura de datos. El histórico que alimenta al modelo debe seguir organizándose con los mismos criterios de grupo analítico, fecha y variables de entrada, o bien documentar claramente cualquier cambio de estructura. La segunda condición es la gobernanza de versiones del modelo. Aunque en el bloque se ha trabajado con una

versión concreta, la tabla SQL ya se ha diseñado para poder distinguir diferentes versiones si más adelante se decide reentrenar o ajustar el algoritmo.

La tercera condición es la disciplina de validación tras cada cambio relevante. Cada vez que se modifique la tabla de entrada, se actualice la lógica de persistencia o se cambie la navegación del informe, conviene recorrer de nuevo la cadena completa: notebook, SQL, Power BI Desktop, Power BI Service y acceso desde CONTROL. Esta práctica puede parecer laboriosa, pero es mucho menos costosa que dar por válida una actualización que haya roto silenciosamente la coherencia del sistema.

En cuanto a posibles mejoras, el bloque deja abiertas varias líneas. Podría estudiarse una actualización más automatizada de la tabla SQL, una comparación entre diferentes horizontes temporales de predicción, un enriquecimiento del conjunto de variables o incluso una validación cruzada más profunda del rendimiento del modelo cuando se disponga de nuevas campañas. Sin embargo, el sistema ya alcanza una madurez suficiente: la cadena técnica es funcional, el resultado se visualiza con claridad y la aportación al seguimiento del deslizamiento es comprensible y defendible.

5.6.24 Conclusiones

El desarrollo de este bloque puede leerse como una cadena de decisiones bien encadenadas. Primero se detectó que la simple consulta histórica del capítulo 5.5 no bastaba para cubrir la necesidad de anticipación. Después se exploró Azure Machine Learning y se comprobó que las primeras métricas aparentemente excelentes ocultaban una mala formulación del problema. A continuación, se reformuló el objetivo hacia la campaña siguiente, se simplificó la clasificación a un esquema binario y se eligió una métrica que priorizara la sensibilidad ante los casos no verdes. Seguidamente se intentó una vía *batch* directa, se identificaron sus limitaciones prácticas y se optó por una arquitectura más robusta basada en *Azure SQL Database*. Finalmente, la salida del modelo se integró en Power BI mediante una página específica de predicción, coherente con el resto del informe y respaldada por reglas de persistencia y validación.

Este recorrido no solo cierra un bloque funcional del TFM, sino que además refuerza la idea central de toda la memoria: la monitorización y el análisis del deslizamiento mejoran cuando la información

se organiza en capas compatibles entre sí. El territorio, el histórico, el diagnóstico visual y la predicción no compiten; se complementan. Ese es, en última instancia, el sentido de la integración desarrollada.

6 CONCLUSIONES

El principal problema en la auscultación de un deslizamiento asociado a un embalse no es únicamente disponer de datos, sino conseguir que esos datos puedan relacionarse entre sí, manteniendo trazables y transformarse en información útil para la explotación. A lo largo del trabajo se ha comprobado que la información existente sobre la ladera estudiada era abundante y valiosa desde el punto de vista técnico, pero también heterogénea, dispersa y difícil de consultar de forma integrada. Por eso, una de las aportaciones más relevantes del TFM ha sido construir una lógica de trabajo capaz de conectar el modelo territorial, las campañas de auscultación, la lectura histórica y la interpretación operativa dentro de una misma estructura.

En relación con los objetivos planteados al inicio del TFM, puede afirmarse que el trabajo ha alcanzado de manera satisfactoria su propósito general. Se ha definido e implantado un sistema basado en un modelo BIM y en una analítica de datos con el que es posible integrar, gestionar y explotar la auscultación existente del deslizamiento, mejorando la visualización, la trazabilidad y el apoyo a la detección temprana de comportamientos anómalos. Esta afirmación no se apoya en una propuesta meramente conceptual, sino en una aplicación real sobre un caso de estudio concreto, lo que confiere al TFM un carácter claramente práctico y directamente vinculado con la explotación de la infraestructura.

Otra conclusión importante es que la reconstrucción del contexto geológico, geotécnico e hidrológico ha resultado imprescindible para dar sentido a la parte digital del trabajo. El sistema desarrollado no habría sido sólido si se hubiese limitado a conectar software y tablas de datos. La ladera estudiada responde a una dinámica compleja, condicionada por la evolución geomorfológica del entorno, por la presencia del embalse y por el papel de las presiones intersticiales en la estabilidad del talud. En consecuencia, la integración digital solo adquiere valor real cuando se apoya en una lectura técnica previa del fenómeno, de sus posibles mecanismos de inestabilidad y del papel específico que juega cada técnica de auscultación en la interpretación del comportamiento observado.

Desde el punto de vista metodológico, el trabajo ha demostrado que es posible traducir un conjunto heterogéneo de mediciones a una lógica operativa comprensible. La definición de umbrales de aviso

y alarma ha permitido pasar del dato bruto al dato interpretable, estableciendo criterios de lectura que facilitan la revisión del comportamiento de la ladera por parte del técnico. Aunque dichos umbrales conservan un componente de interpretación ingenieril y no pueden entenderse como valores universales, sí constituyen una base operativa defendible, obtenida a partir del análisis del histórico real y adaptada a las características del caso de estudio. Esta transformación de series temporales dispersas en criterios de estado ha sido uno de los pasos más útiles de todo el trabajo.

En cuanto a la integración InfraWorks – Power BI, puede concluirse que el sistema desarrollado aporta una mejora clara respecto a una consulta tradicional basada únicamente en hojas de cálculo, documentos de campaña o listados independientes. InfraWorks actúa como puerta de entrada territorial, permitiendo localizar cada instrumento en su contexto geométrico y espacial, mientras que Power BI concentra la lógica de explotación y hace posible consultar estados, gráficos históricos, tablas de apoyo y páginas específicas por técnica. El resultado no es solo una mejora visual, sino una mejora de método: el técnico puede pasar del territorio al dato, y del dato al diagnóstico, dentro de una secuencia más rápida, más ordenada y coherente con el trabajo real de seguimiento.

La incorporación de Azure Machine Learning permite extraer otra conclusión relevante. En el contexto de este TFM, la inteligencia artificial no debía plantearse como un decisor autónomo, sino como una ayuda prudente a la priorización. El proceso seguido durante los entrenamientos ha mostrado que unas métricas aparentemente excelentes pueden ser engañosas si el problema está mal formulado o si las clases están desbalanceadas. Precisamente por eso, una de las principales fortalezas del trabajo ha sido adoptar una lectura crítica del bloque predictivo, reformulando el objetivo, simplificando el problema y situando la salida del modelo en el lugar que realmente le corresponde: una señal de prealerta que ayuda a orientar la vigilancia, pero que no sustituye el juicio técnico ni los criterios de explotación ya establecidos.

También debe señalarse que el sistema alcanzado representa una solución operativa, pero todavía no una arquitectura completa cerrada. El trabajo deja abiertas varias limitaciones: persiste una dependencia de procesos manuales o semimanuales para determinadas actualizaciones; el modelo predictivo trabaja con un histórico limitado y con una granularidad agregada por grupos analíticos; no se han incorporado todavía todas las fuentes previstas, especialmente el aforo de filtraciones dentro de la capa de IA; y la automatización integral entre captura del dato, entrenamiento,

despliegue e integración final no se ha terminado de implantar. Estas limitaciones no invalidan el trabajo realizado, pero sí marcan con claridad el alcance real de la versión finalmente ejecutada.

A pesar de ello, la valoración global del TFM es claramente positiva. El trabajo ha permitido pasar de una situación inicial caracterizada por la dispersión de la información a una solución estructurada en la que el modelo BIM, el cuadro de mando y la capa predictiva se apoyan mutuamente. Esta integración mejora la legibilidad del caso, facilita la revisión técnica y deja establecida una base muy útil para continuar evolucionando el sistema en fases posteriores. En consecuencia, la principal conclusión del TFM es que la combinación entre nuevas tecnologías y criterio ingenieril no solo es viable en la auscultación de laderas inestables, sino que puede convertirse en una herramienta real de ayuda a la explotación cuando se implanta con prudencia, con trazabilidad y con un enfoque claramente orientado al comportamiento físico del problema.

Desde la perspectiva de la sostenibilidad, el sistema propuesto aporta valor en tres planos complementarios:

- Seguridad.
- Eficiencia en el uso de recursos.
- Resiliencia de la infraestructura.

En primer lugar, la integración digital de la auscultación y explotación analítica del dato permite una detección más temprana de comportamientos anómalos y reduce el riesgo de evolución no controlada del deslizamiento y, con ello, la probabilidad de fallos graves con afección a las personas, servicios, ecosistemas y recursos hídricos. Esta mejora resulta especialmente relevante en un embalse, donde la estabilidad de la ladera influye directamente en la seguridad de la explotación y en variables como la calidad del agua, la capacidad útil o la operatividad del entorno, aspectos ya señalados en este propio TFM.

En segundo lugar, la digitalización de la información y explotación integrada de campañas, sensores y alertas favorecen una gestión más de los recursos técnicos y económicos. El sistema permite priorizar revisiones, evitar consultas dispersas, reducir duplicidades en el tratamiento de datos y orientar mejor las intervenciones de mantenimiento y seguimiento. Esto no solo mejora la operatividad, sino que también contribuye a un uso más racional de medios humanos, desplazamiento, campañas extraordinarias y actuaciones correctivas costosas.

En tercer lugar, el enfoque refuerza la resiliencia de la infraestructura, porque mejora su capacidad para anticipar escenarios desfavorables, responder con mayor rapidez antes cambios de comportamiento y conservar trazabilidad técnica a lo largo del tiempo. En una infraestructura hidráulica sometida a variaciones de nivel, episodios de lluvia y posibles situaciones de inestabilidad, disponer de una base digital ordenada, verificable y actualizable constituye una aportación clara a las sostenibilidad a largo plazo. No se trata solo de medir, más, sino de decidir mejor, antes y con menor incertidumbre.

En este sentido, el trabajo puede alinearse de forma directa con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible.



Por su relación con la gestión sostenible del agua y con la protección de los ecosistemas vinculados al medio hídrico. Dentro de este objetivo, la meta 6.6 se refiere expresamente a proteger y restaurar los ecosistemas relacionados con el agua.



La meta 9.1 plantea desarrollar infraestructuras de calidad, fiables, sostenibles y resilientes.



La meta 11.b vincula la planificación integrada con la eficiencia de recursos, la adaptación al cambio climático y la resiliencia frente a desastres.



La meta 12.2 está orientado a la gestión sostenible y al uso eficiente de los recursos naturales.



La meta 13.1 persigue reforzar la resiliencia y la capacidad de adaptación frente a riesgos climáticos y desastres naturales.

Más allá de la validación funcional del sistema desarrollado, resulta necesario incorporar una valoración crítica de su alcance, de sus limitaciones y de la aportación real que ofrece frente a los métodos tradicionales de auscultación.

La propuesta desarrollada ha permitido integrar en un único entorno coherente una información que hasta ahora aparecía dispersa entre series temporales, instrumentación, contexto geométrico

y estado operativo. Esto supone una mejora clara en términos de trazabilidad y accesibilidad del dato. Frente a esquemas tradicionales apoyados en hojas de cálculo o informes independientes, el sistema facilita una lectura conjunta del comportamiento del deslizamiento, reduce los tiempos de interpretación y favorece la identificación de patrones.

No obstante, esta mejora se ha contrastado principalmente desde una perspectiva cualitativa. El trabajo no incorpora métricas cuantitativas que permitan valorar con precisión el incremento de eficiencia, la reducción de los tiempos de análisis o la mejora en la capacidad de detección temprana. En este sentido, una línea evidente de mejora pasa por definir indicadores objetivos de rendimiento (KPIs), como el tiempo medio de detección de anomalías, el número de incidencias detectadas o la reducción de la incertidumbre en la interpretación.

El sistema propuesto presenta, además, una serie de limitaciones que conviene tener en cuenta tanto para interpretar adecuadamente sus resultados como para valorar su posible implantación en otros contextos.

Por un lado, existe una dependencia importante de herramientas software concretas, como InfraWorks, Power BI o Azure, lo que puede condicionar la escalabilidad del sistema y dificultar su adopción en entornos con infraestructuras tecnológicas diferentes. La interoperabilidad mediante estándares abiertos, como IFC o las APIs de sensores, atenúa en parte esta limitación, aunque no llega a eliminarla por completo.

A ello se suma que la calidad del sistema depende directamente de la calidad, continuidad y coherencia de los datos de entrada. La existencia de lagunas en las series temporales, cambios en los criterios de medición o errores instrumentales puede afectar de forma significativa tanto a la interpretación de los resultados como al funcionamiento de los modelos analíticos.

Asimismo, el sistema exige un mantenimiento continuo, no solo en lo relativo a la actualización de los datos, sino también en la revisión de modelos, umbrales y visualizaciones. Esto implica disponer de personal técnico cualificado y de una estructura organizativa capaz de garantizar su operatividad a largo plazo.

La incorporación de inteligencia artificial dentro del sistema debe interpretarse con cautela. Aunque se ha comprobado su utilidad como herramienta de apoyo para detectar situaciones

potencialmente anómalas, su capacidad predictiva real sigue estando condicionada por diversos factores.

Entre ellos, el volumen y la calidad de los datos disponibles influyen de forma directa en el rendimiento del modelo. La presencia de conjuntos de datos desbalanceados, con pocos episodios de inestabilidad significativa, dificulta la construcción de modelos robustos y con verdadera capacidad de generalización.

Además, los resultados obtenidos no han sido evaluados mediante métricas estándar de validación, como *Accuracy*, *Recall* o *F1-score*, lo que impide cuantificar de forma objetiva su nivel de fiabilidad.

Por este motivo, el sistema de IA debe entenderse como un mecanismo de prealerta orientado a priorizar la revisión técnica, y no como un sistema de decisión autónomo. El criterio ingenieril sigue siendo el elemento central en la interpretación del comportamiento del deslizamiento.

Desde el punto de vista operativo, el sistema desarrollado supone un avance respecto a los enfoques tradicionales basados en el análisis manual de series temporales y en la revisión de informes independientes.

Las principales mejoras identificadas son:

- Integración de información en un único entorno.
- Visualización espacial del comportamiento.
- Automatización parcial de la interpretación.
- Capacidad de análisis histórico y detección de tendencias.

Sin embargo, estos beneficios deben valorarse junto con los costes de implantación, la complejidad técnica del sistema y la necesidad de mantenimiento continuo. En este sentido, la solución resulta especialmente adecuada para infraestructuras críticas o con un alto nivel de instrumentación, donde el volumen de datos disponible justifica su implantación.

7 FUTURAS LÍNEAS DE MEJORA E INVESTIGACIÓN

7.1 LÍNEAS FUTURAS EN EL ÁMBITO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y DE LA GESTIÓN DEL DATO

Las futuras actuaciones en este apartado deben entenderse como la prolongación natural de la metodología ya desarrollada en el TFM. La solución implantada ha demostrado que es posible conectar la auscultación existente con un entorno de explotación digital útil, pero también ha puesto de manifiesto que la arquitectura prevista inicialmente era más amplia que la versión finalmente ejecutada. Una primera línea prioritaria consiste, por tanto, en completar la automatización del flujo de datos desde las campañas de auscultación hasta su disponibilidad final para análisis, entrenamiento e interpretación. En términos prácticos, esto implica reducir la dependencia actual de procesos manuales o semimanuales y consolidar una cadena más estable entre captura, validación, almacenamiento y explotación de la información.

Dentro de ese mismo bloque, resulta especialmente importante realizar un análisis más profundo de la situación actual de la ladera a partir de todo el histórico de auscultación ya disponible. El modelo implantado en este trabajo ha permitido construir una primera capa de prealerta, pero una fase posterior debería revisar con mayor detalle la evolución temporal de los distintos sectores del deslizamiento, la coherencia entre las técnicas de auscultación y la relación entre movimientos superficiales, deformación en profundidad, presiones intersticiales y caudales observados. Esta revisión permitiría no solo mejorar el conocimiento del estado actual del fenómeno, sino también refinar la construcción del conjunto de variables que posteriormente alimentará la capa predictiva.

Otra línea de trabajo consiste en mejorar la capacidad predictiva del modelo con nuevos entrenamientos y con una mayor riqueza de variables de entrada. En la versión actual, Azure Machine Learning se ha utilizado como un generador de señales de prealerta. Sin embargo, una evolución lógica del sistema debería orientarse a reducir falsos positivos y a avanzar, progresivamente, desde esa prealerta hacia la predicción de estados operativos más próximos a avisos y alarmas reales. Para ello será necesario ampliar el histórico, revisar el criterio de etiquetado,

probar horizontes temporales alternativos, incorporar ventanas temporales y acumulados, y comparar diferentes estrategias de balanceo y entrenamiento.

En relación directa con lo anterior, también queda pendiente la automatización de la actualización de datos de auscultación para su incorporación periódica a Azure Machine Learning. El TFM ha llegado a una solución funcional, pero todavía no a un ciclo completo de reentrenamiento reproducible. Una fase posterior debería dejar preparada una infraestructura estable de trabajo en Azure, con *datasets* versionados, entrenamientos repetibles, inferencias programadas y mecanismos de seguimiento del rendimiento del modelo. Esta evolución permitiría que el sistema no dependiera de operaciones puntuales, sino que pudiera mantenerse vivo con nuevas campañas y mejorar de forma progresiva con el paso del tiempo.

Del mismo modo, es necesario incorporar al modelo predictivo el conjunto completo de técnicas de auscultación disponibles. En la versión actual no se han integrado todavía todas las variables previstas inicialmente, y el caso más claro es el aforo de filtraciones, cuya incorporación sigue siendo una tarea pendiente tanto en la capa de IA como en la explotación analítica. Incluir esta información permitiría enriquecer la lectura hidráulica del deslizamiento y aproximar mejor el comportamiento del sistema a la realidad física de la ladera, especialmente en lo relativo a la interacción entre piezometría, deformación y respuesta del drenaje.

Finalmente, dentro del ámbito de la inteligencia artificial, también se abren líneas de investigación más avanzadas que no se han abordado en este TFM. Entre ellas destacan la fusión multisensor más profunda, los modelos secuenciales, la comparación entre distintos horizontes de predicción, la monitorización continua de la deriva del modelo y la adopción de esquemas híbridos capaces de combinar lectura estadística y criterio físico del problema. Estas líneas no suponen un cambio de rumbo respecto al trabajo realizado, sino una maduración del sistema ya implantado hacia una solución más robusta y próxima a un verdadero entorno de alerta temprana.

7.2 LÍNEAS FUTURAS EN EL ÁMBITO DE POWER BI Y DE LA EXPLOTACIÓN OPERATIVA

En el entorno Power BI, una de las mejoras más claras consiste en automatizar la emisión de avisos cuando el sistema detecte condiciones de aviso o alarma. Actualmente, el cuadro de mando requiere una consulta activa por parte del técnico, lo que resulta válido para una fase de explotación

supervisada, pero todavía limitado desde el punto de vista operativo. Una futura evolución debería permitir el envío programado de correos electrónicos o notificaciones cuando se cumplan determinadas condiciones, de forma que el panel no solo sirva para consultar información, sino también para empujar el dato crítico hacia el responsable de la revisión.

Otra actuación necesaria dentro de este bloque es incorporar de forma completa los valores del aforo de filtraciones en el entorno analítico. Aunque esta técnica forma parte del planteamiento metodológico general y tiene un interés claro en la interpretación del comportamiento hidráulico de la ladera, su desarrollo dentro del cuadro de mando sigue siendo más limitado que el de la piezometría, la topografía o la inclinometría. Su integración permitiría disponer de una lectura más completa y reforzar la comparación entre caudal, nivel piezométrico y deformación, mejorando con ello la capacidad interpretativa del sistema.

Junto a estas dos mejoras principales, también conviene avanzar en el perfeccionamiento de la lógica operativa del informe. El sistema actual ha alcanzado una madurez suficiente para ser demostrado y utilizado, pero aún puede mejorar en aspectos como la persistencia temporal de estados, la histéresis entre categorías, la validación cruzada entre páginas y la generación de resúmenes automáticos más orientados a la explotación. Todo ello permitiría consolidar el cuadro de mando no solo como herramienta de consulta, sino como auténtico soporte de vigilancia y priorización técnica.

7.3 LÍNEAS FUTURAS DE CARÁCTER GENERAL, GEOTÉCNICO Y DE INTEGRACIÓN DIGITAL

Fuera del ámbito estrictamente analítico, una línea de mejora de gran interés consiste en generar superficies piezométricas que puedan visualizarse en InfraWorks de forma automática o, al menos, semiautomática. Esta actuación permitiría pasar de la lectura puntual de los piezómetros a una interpretación espacial continua del estado hidráulico de la ladera. Su interés técnico es evidente, ya que facilitaría la identificación de gradientes, zonas de respuesta diferenciada y posibles relaciones entre la distribución de presiones intersticiales y la evolución del movimiento observado.

Otra línea consiste en mejorar el cálculo de los umbrales de aviso y alarma mediante procedimientos que reduzcan la dependencia del juicio de valor del técnico. Los umbrales obtenidos en este TFM son válidos como herramienta operativa y responden a un análisis razonado del histórico, pero una

fase posterior debería explorar métodos complementarios basados en estadística robusta, enfoques probabilísticos, análisis de sensibilidad o contraste con escenarios de estabilidad. El objetivo no sería sustituir el criterio ingenieril, sino reforzarlo con una base más objetiva, reproducible y justificable frente a futuras revisiones del sistema.

También resulta aconsejable profundizar en la explotación geométrica y territorial del caso mediante campañas comparativas de superficies, nubes de puntos y vuelos LiDAR o UAV. El propio desarrollo del TFM ha mostrado el valor que tendría disponer de comparaciones sistemáticas entre campañas para detectar cambios morfológicos, analizar deformaciones distribuidas y relacionar mejor la lectura instrumental con la evolución real de la ladera. Esta línea contribuiría, además, a consolidar el concepto de gemelo digital del deslizamiento, integrando geometría, auscultación y resultados analíticos dentro de una misma lógica de seguimiento.

Por último, debe contemplarse la posible integración de plataformas específicas de automatización para ingeniería civil, como VIKTOR.AI, u otras herramientas equivalentes que permitan desarrollar aplicaciones propias de cálculo, visualización o explotación de datos. Este tipo de plataformas no sustituiría a InfraWorks, Power BI o Azure Machine Learning, pero sí podría actuar como capa complementaria para automatizar flujos de trabajo, conectar modelos de cálculo con datos de auscultación y generar aplicaciones internas más orientadas a la ingeniería del caso. Su estudio constituye, por tanto, una línea razonable de investigación para una fase posterior del sistema.

En síntesis, las líneas futuras planteadas no deben interpretarse como un listado aislado de mejoras posibles, sino como una continuación coherente del camino iniciado en este TFM. La base ya construida demuestra que la integración entre modelo territorial, auscultación, analítica y prealerta es viable. La siguiente fase lógica consiste en aumentar el grado de automatización, enriquecer las fuentes de información, perfeccionar la capacidad predictiva y profundizar en la lectura geotécnica del fenómeno, con el objetivo último de disponer de un sistema cada vez más fiable, más trazable y útil para la explotación real del deslizamiento.

8 BIBLIOGRAFÍA

(ESA), EUROPEAN SPACE AGENCY. 2011. Differential GNSS. *Navipedia*. [En línea] 2011. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Differential_GNSS.

(IGS), INTERNATIONAL GNSS SERVICE. 2020. INTERNATIONAL GNSS SERVICE (IGS). [En línea] 2020. <https://igs.org/data-products-overview/>.

ABRAMSON, L. W., et al. 2001. *Slope Stability and Stabilization Methods*. 2nd. s.l. : Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2001.

AKOSAH, Stephen, et al. 2024. Application of Artificial Intelligence and Remote Sensing for Landslide Detection and Prediction: Systematic Review. *Remote Sensing. MDPI*. [Online] 2024. <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/16/2947>.

ASTM International. 2021. *ASTM D6230-21e1: Standard Practice for Monitoring Horizontal Movements Using Inclinometers*. s.l. : ASTM International, 2021.

AYALA CARCEDO, F. J., y otros. 2006. *Manual de ingeniería de taludes*. Madrid : Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2006.

buildingSMART INTERNATIONAL. s. f.-b. buildingSMART INTERNATIONAL. [En línea] s. f.-b. <https://www.buildingsmart.org/what-is-bsdd/>.

buildingSMART International. s.f.. *Industry Foundation Classes (IFC)*. s.l. : buildingSMART Technical, s.f.

buildingSMART INTERNATIONAL. s.f.-a. Information Delivery Specification (IDS). *buildingSMART INTERNATIONAL*. [En línea] s.f.-a. <https://technical.buildingsmart.org/standards/ids/>.

Chandola, V. and Banerjee, A: Kumar, V. 2009. Anomaly Detection: A Survey. <https://dl.acm.org/journal/csur>. [Online] 2009. https://vs.inf.ethz.ch/edu/HS2011/CPS/papers/chandola09_anomaly-detection-survey.pdf.

CONSOL GEO TECHNOLOGIES. 2022. *CONSOL GEO TECHNOLOGIES. monCalc - Brochure (instrument monitoring y ajuste de observaciones)*. s.l. : CONSOL GEO TECHNOLOGIES, 2022.

Cruden, D. M y Varnes, D. J. 1996. *Landslide Types and Processes*. [ed.] A. K. TURNER y R. L. SCHUSTER. s.l. : Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, 1996. Vol. 247.

Cruden, D.M. 1991. *A simple definition of a landslide*. s.l. : Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1991. págs. 27-29. Vol. 43.

DUNCAN, J. M., WRIGHT, S. G. and BRANDON, T. L. 2014. *Soil Strength and Slope Stabilit*. 2nd. s.l. : Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2014.

DUNNICLIFF, John. 1993. *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. New York : John Wiley & Sons, 1993.

España. 2021. *Real Decreto 264/2021, de 13 de abril, por el que se aprueban las*. s.l. : Boletín oficial del Estado, 2021. Vols. BOE» núm. 89, de 14 de abril de 2021.

Federal Energy Regulatory Commission (FERC). 2024. Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects: Chapter 9 - Instrumentation and Monitoring. <https://www.ferc.gov/>. [En línea] 2024. <https://www.ferc.gov/industries-data/hydropower/dam-safety-and-inspections/engineering-guidelines>.

FELL, R., et al. 2008. *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning*. s.l. : Engineering Geology, 2008.

FEMA. 2004. *Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification System for Dams (FEMA 333*. Washington, DC : FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA), 2004.

GARCÍA-ASENJO, L., LUJÁN, R. y BASELGA, S. 2025. *Mitigation of the Refraction Error in Total Station Based Deformation Monitoring: Case Study Cortes de Pallás Landslide*. In: *Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM 2025)*. 2025.

GUZZETTI, Fausto, et al. 2020. Geographical landslide early warning systems. *Earth-Science Reviews*. <https://www.sciencedirect.com/>. [Online] 2020. <https://geomorphology.irpi.cnr.it/publications/repository/public/journals/2020/guzzetti-et-al-2020-geographical-landslide-early-warning-systems.pdf>.

Highland, L. M. 2004. *Landslide Types and Processes*. s.l. : U.S. Geological Survey, 2004.

Highland, L. M.; Bobrowsky, P. 2008. *The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides.* s.l. : U.S. Geological Survey, 2008. Vol. Circular 1325.

Hungr, O.; Leroueil, S.; Picarelli, L. 2014. *The Varnes classification of landslide types, an update.* s.l. : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. págs. 167-194. Vol. 11.

ICOLD, s. f. *Technology of dams.* s.l. : INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD).

ICOLD/CIGB. 2018. Dam Surveillance Guide. [Online] 2018. https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/s3-euw1-ap-pe-ws4-cws-documents-ri-prod/icoldportal/9781351035774_webpdf.pdf. Bulletin 158.

IFC4.3 Add2 — ISO 16739-1:2024. *ISO 16739-1:2024. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries — Part 1: Data schema.* s.l. : INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO).

ISO. 2024. *ISO 16739-1:2024. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries - Part 1: Data schema.* s.l. : International Organization for Standardization, 2024.

ISO, 2018a. *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles.* Geneva : INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO).

ISO, 2018b. *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the assets.* Geneva : INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO).

ISO, 2018c. *ISO 17123-5:2018. Optics and optical instruments — Field procedures for testing geodetic and surveying instruments — Part 5: Total stations.* Geneve : INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO).

IUGS/WG. 1995. *A suggested method for describing the rate of movement of a landslide.* *Bulletin of Engineering Geology and the Environment.* 1995.

KalmanFilter.net. s.f. KalmanFilter.net. <https://kalmanfilter.net>. [Online] s.f., https://kalmanfilter.net/ES/default_es.aspx#aboutSpanishVer.

National Institute of Standards and Technology (NIST). 2023. Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0). <https://nvlpubs.nist.gov>. [En línea] 2023. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ai/NIST.AI.100-1.pdf>.

PICIULLO, Luca, et al. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106228>. <https://www.sciencedirect.com/>. [Online] 2024. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106228>.

Rasmussen, C.E. and Williams, C.K.I. 2006. *Gaussian Processes for Machine Learning*. s.l. : the MIT Press, 2006.

RODRIGUEZ, Jorge; DEANE, Emily; HENDRY, M. Trevor; MACCIOTTA, Renato; EVANS, Tad; GRÄPEL, Chris; SKIRROW, Roger. 2021. *Practical evaluation of single-frequency dGNSS for monitoring slow-moving landslides*. 2021.

SCHUSTER, R. L. 1979. *Reservoir-induced landslides*. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. 1979. págs. 8-15. Vol. 20.

Serrano, Andre. *Study and monitoring the construction of a concrete face rockfill dam (CFRD)*. Lisboa : Instituto Superior Técnico, s.f.

SGU, s. f. *Tailings Storage Facility*. s.l. : SWADISH GEOLOGICAL SURVEY (SGU). Vol. Chapter 12.

SHEAR KNOWLEDGE BROKERS TEAM. 2021. *Introduction to Landslide Early Warning Systems*. Practical Action Publishing. <https://practicalactionpublishing.com/>. [En línea] 2021. https://practicalactionpublishing.com/app/uploads/2021/11/Introduction_to_Landslide_Early_Warning_Systems.pdf.

SKEMPTON, A. W. and HUTCHINSON, J. N. 1969. *Stability of natural slopes and embankment foundations*. Mexico : International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), 1969.

TERZAGHI, K., PECK, R. B. and MESRI, G. 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd. s.l. : John Wiley & Sons, 1996.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 2003. *EM 1110-2-1902: Slope Stability.* Washington, DC : Department of the Army, 2003.

U.S. Geological Survey (USGS). 2025. What is a landslide and what causes one? <https://www.usgs.gov/>. [En línea] 2025. <https://www.usgs.gov/faqs/what-a-landslide-and-what-causes-one>.

UNESCO WP/WLI. 1993. *A suggested method for describing the activity of a landslide.* 1993.

USACE. 1994. *Arch Dam Design.* s.l. : U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE), 1994. Vols. EM 1110-2-2201.

USACE. 2004. *General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams.* s.l. : U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE), 2004.

USACE. 2000. *Roller-Compacted Concrete.* s.l. : U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE), 2000.

USBR. 2019. *E-5 Risk Analysis for Concrete Buttress Dams. En: Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis (Version 4.1).* s.l. : U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR, BUREAU OF RECLAMATION (USBR), 2019.

Varnes, D. J. 1978. *Slope movement types and processes.* [ed.] R. L. SCHUSTER y R. J. KRIZEK. s.l. : Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board, 1978. págs. 11-33. 176.

Welch, G. and Bishop, G. 2006. *An introduction to the Kalman Filter.* 2006.

XU, Jian and ZHANG, Yi. 2025. AI-Powered Digital Twin Technology for Highway System Slope Stability Risk Monitoring. *Geotechnics.* <https://www.mdpi.com>. [Online] 2025. <https://www.mdpi.com/2673-7094/5/1/19>.

ZHOU, Y., LIU, H. and DUAN, L. 2021. *Accuracy analysis of dam deformation monitoring system based on robotic total station.* *PLOS ONE.* [ed.] Al Mansour University College-Baghdad-Iraq, IRAQ Ahmed Mancy Mosa. 2021.

ANEXO Nº 1. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz tipo de movimiento × tipo de material (versión abreviada de Varnes, 1978). Fuente: U.S. Geological Survey (Highland, 2004), Fig. 2.....	8
Tabla 2. Guía rápida de diagnóstico (observables - tipología probable)	16
Tabla 3. Tabla de clasificación del potencial de daño (hazard potential) para presas. Fuente: FEMA (2004), Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification System for Dams, Tabla de clasificación (p. 6).....	22
Tabla 4. Comparativa cualitativa de tipologías de presas (material–mecanismo–condicionantes). Elaboración propia	22
Tabla 5. Clasificación de potencial de daños (hazard potential) según FEMA 333. (FEMA, 2004)...	24
Tabla 6. Condicionantes geológicos e hidrogeológicos y su traducción a variables geotécnicas (síntesis a partir de (SCHUSTER, 1979), (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2003), (Highland, L. M.; Bobrowsky, P., 2008), (AYALA CARCEDO, y otros, 2006) y (DUNCAN, et al., 2014).	26
Tabla 7. Parámetros geotécnicos y su relación con el análisis y la instrumentación (síntesis a partir de (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2003), (TERZAGHI, et al., 1996), (DUNCAN, et al., 2014) y (ABRAMSON, et al., 2001).	30
Tabla 8. Resumen de técnicas de auscultación consideradas y variable principal.....	30
Tabla 9. Variables críticas de calidad en series GNSS para auscultación.....	32
Tabla 10. Checklist técnico mínimo para inclinometría en deslizamientos.....	35
Tabla 11. Piezometría abierta: ventajas, limitaciones y usos recomendados.	37
Tabla 12. Fuentes habituales de incertidumbre en monitorización con RTS y medidas de control. 39	
Tabla 13. Matriz de información recomendada para objetos de instrumentación en un modelo BIM	42
Tabla 14. Técnicas de IA aplicables a auscultación: objetivos, entradas y consideraciones.....	44
Tabla 15. Diccionario de datos mínimo. Elaboración propia.....	47
Tabla 16. Modelo de tabla de georreferenciación. Elaboración propia.	48
Tabla 17. Consultas típicas de la API (patrón SensorThings).....	49

Tabla 18. Reglas QA/QC.....	50
Tabla 19. Propiedades BIM mínimas por objeto de instrumentación. Elaboración propia.....	51
Tabla 20. Indicadores derivados (features) para interpretación y predicción. Elaboración propia..	52
Tabla 21. Definición de escenarios operativos. Elaboración propia.....	53
Tabla 22. Matriz de alertas y acciones asociadas. Elaboración propia.....	54
Tabla 23. Inventario maestro. Elaboración propia.	55
Tabla 24. Ejemplos de consultas. Elaboración propia.	56
Tabla 25. Resultados de QA/QC por tipo de dato. Elaboración propia.	57
Tabla 26. Caso de alerta: condición, verificación y acción	58
Tabla 27. Umbrales para Topografía. Elaboración propia.....	80
Tabla 28. Umbrales para Inclimetría. Elaboración propia	80
Tabla 29. Umbrales para Piezometría. Elaboración propia	80
Tabla 30. Composición integración Infraworks – Power BI. Elaboración propia	83
Tabla 31. Contenido de tablas y usos. Elaboración propia	87
Tabla 32. Ejemplos de tablas empleadas. Elaboración propia	93
Tabla 33. Umbrales. Elaboración propia.....	93
Tabla 34. Secuencia de validación. Elaboración propia.....	104
Tabla 35. Control de calidad. Elaboración propia.....	110
Tabla 36. Secuencia se actuación para un técnico. Elaboración propia	112
Tabla 37. Comparación de técnicas. Elaboración propia.....	113
Tabla 38. Condiciones de mantenimientos del sistema. Elaboración propia.....	116
Tabla 39. Grupo Analítico A. Elaboración propia.....	120
Tabla 40. Grupo Analítico B. Elaboración propia	121
Tabla 41. Grupo Analítico C. Elaboración propia.....	121

Tabla 42. Grupo Analítico D. Elaboración propia.....	122
Tabla 43. Comparativa de resultados entre modelos.....	129
Tabla 44. Evolución de las formulaciones del problema y motivo de cada cambio. Elaboración propia	130

ANEXO Nº 2. ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Nomenclatura de las partes de un deslizamiento tipo slump–earthflow (corona, escarpe, cuerpo, pie, etc.). Fuente: U.S. Geological Survey (Highland, 2004), Fig. 1.....	6
Ilustración 2. Ejemplo de deslizamiento/earthflow en La Conchita (California, EE. UU.). Fuente: U.S. Geological Survey (Highland, 2004), fotografía de R.L. Schuster (USGS)	7
Ilustración 3. Esquemas de tipos principales de movimientos en ladera. Fuente: U.S. Geological Survey (Highland, 2004), Fig. 3.....	9
Ilustración 4. Fuente: U.S. Geological Survey (Highland, 2004), Fig. 3.....	10
Ilustración 5. Fuente: U.S. Geological Survey (Highland, 2004), Fig. 3.....	11
Ilustración 6. Ejemplo de deslizamiento rotacional que puede evolucionar a flujo de tierra (slump–earthflow). Fuente: USGS, Highland (2004)	12
Ilustración 7. Fuente: U.S. Geological Survey (Highland, 2004), Fig. 3.....	13
Ilustración 8. Ilustración 7. Fuente: U.S. Geological Survey (Highland, 2004), Fig. 3.....	14
Ilustración 9. Sección tipo de la presa de la Rambla del Judío. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura a través de www.eselagua.com	17
Ilustración 10. Esquema conceptual de sección en arco y sección en ménsula (presas de arco). Fuente: USACE (1994) EM 1110-2-2201, Fig. 1-1.....	18
Ilustración 11. Presa de Montearagón (Huesca). Fuente: Elaboración propia.....	18
Ilustración 12. Ejemplos representativos de presas de contrafuertes (variantes y morfologías). Fuente: USBR y USACE (2019), Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis, Cap. E-5, Fig. E-5-.....	19
Ilustración 13. Secciones típicas de presas de tierra (homogéneas y con núcleo). Fuente: USACE (2004), EM 1110-2-2300, Fig. 2-1.....	20
Ilustración 14. Dos configuraciones típicas de presas de enrocado (zona impermeable inclinada y núcleo central). Fuente: USACE (2004), EM 1110-2-2300, Fig. 2-2.....	21
Ilustración 15. Influencia conceptual de la presión intersticial en la resistencia al corte (tensiones efectivas). Basado en (TERZAGHI, et al., 1996) y (DUNCAN, et al., 2014).....	27

Ilustración 16. Esquema conceptual de ladera en cola de embalse con superficie de rotura e instrumentación (inclinómetro, piezómetro abierto y control topográfico). Basado en criterios de observación y modelización de estabilidad de taludes (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2003) y en discusiones sobre laderas inducidas por embalses (SCHUSTER, 1979).....	28
Ilustración 17. Esquema conceptual de una solución DGNSS/RTK con transmisión de correcciones (RTCM/NTRIP).....	32
Ilustración 18. Equipo de tomas de datos de Inclinometría. Fuente: PROESZA, S.L. (Elaboración propia).....	33
Ilustración 19. Gráfico inclinometría (incremental). Fuente: PROESZA, S.L. (Elaboración propia) ..	34
Ilustración 20. Gráfico inclinometría (acumulativo). Fuente: PROESZA, S.L. (Elaboración propia) .	34
Ilustración 21. Inclinometría: medición de deformación lateral versus profundidad y localización de zona de cizalla (esquema). Fuente: internet	35
Ilustración 22. Sondeo de medición para piezometría abierta. Fuente: PROESZA, S.L. (Elaboración propia).....	36
Ilustración 23. Piezometría abierta: lectura del nivel de agua en el standpipe para estimar la carga hidráulica (esquema). Fuente: internet.....	37
Ilustración 24. Estación total robotizada. Fuente: PROESZA, S.L. (Elaboración propia).....	38
Ilustración 25. Esquema de monitorización con estación total robotizada. Fuente: PROESZA, S.L. (Elaboración propia).....	39
Ilustración 26. Arquitectura típica de integración de auscultación en gemelo digital: sensores, control de calidad, datos, analítica y enlace al modelo BIM. Fuente: Elaboración propia.....	42
Ilustración 27. Arquitectura BIM–BD–IA–Alertas (esquema). Elaboración propia.....	46
Ilustración 28. Estados típicos del CDE (WIP–Shared–Published–Archive). Elaboración propia.....	49
Ilustración 29. Modelo de datos simplificado (entidades principales). Elaboración propia.	49
Ilustración 30. Flujo ETL/QA-QC por campañas. Elaboración propia.	50
Ilustración 31. Enlace BIM–Base de datos mediante AssetID. Elaboración propia.	51

Ilustración 32. Cadena de interpretación con IA (conceptual). Elaboración propia.....	52
Ilustración 33. Motor de escenarios y predicción con incertidumbre. Elaboración propia.	53
Ilustración 34. Niveles de alerta con persistencia. Elaboración propia.....	53
Ilustración 35. Ejemplo de panel para explotación. Elaboración propia.....	54
Ilustración 36. Vista general del modelo BIM en Infracworks. Elaboración propia	55
Ilustración 37. Vista de la ladera en Infracworks. Elaboración propia	55
Ilustración 38. Vista de detalle con Hitos Topográficos y Piezómetro en Infracworks. Elaboración propia	56
Ilustración 39. Resumen QA/QC por campaña. Elaboración propia.	57
Ilustración 40. Serie temporal con anomalía detectada (ejemplo con datos sintéticos). Elaboración propia.	58
Ilustración 41. Predicción con banda de confianza y umbral (ejemplo con datos sintéticos). Elaboración propia.	58
Ilustración 42. Vista general de la ladera desde la orilla contraria. Elaboración propia	60
Ilustración 43. Ortofoto de la zona del deslizamiento. Fuente: PNOA.....	62
Ilustración 44. Croquis de delimitación del embalse. Fuente: Proyecto de Drenaje para estabilización del deslizamiento I-13 en el vaso de la presa de XXXXXXXXXXXX (Febrero de 2017).	62
Ilustración 45. Estimación de la zona movida del deslizamiento I-13. Fuente: Proyecto de Drenaje para estabilización del deslizamiento I-13 en el vaso de la presa de XXXXXXXXXXXX (febrero de 2017).	62
Ilustración 46. Evolución de movimientos. Fuente: Nota técnica sobre el deslizamiento I-13 de la ladera del río XXXXXX (abril de 2007).....	63
Ilustración 47. Evolución de movimientos. Fuente: Nota técnica sobre el deslizamiento I-13 de la ladera del río XXXXXX (abril de 2007).....	63
Ilustración 48. Evolución de movimientos. Fuente: Nota técnica sobre el deslizamiento I-13 de la ladera del río XXXXXX (abril de 2007).....	64

Ilustración 49. Mapa de movimientos horizontales acumulados. Fuente: - Proyecto de Drenaje para estabilización del deslizamiento I-13 en el vaso de la presa de XXXXXXXXXXXX. Anejo nº 3 (febrero de 2017).	65
Ilustración 50. Ortofoto con ubicación de elementos de auscultación. Elaboración propia.....	67
Ilustración 51. Hito HIT001.....	72
Ilustración 52. Hito HIT002.....	72
Ilustración 53. Hito HIT003.....	72
Ilustración 54. Hito HIT004.....	72
Ilustración 55. Hito HIT005.....	72
Ilustración 56. Hito HIT006.....	72
Ilustración 57. Hito HIT007.....	73
Ilustración 58. Hito HIT008.....	73
Ilustración 59. Hito HIT009.....	73
Ilustración 60. Hito HIT010.....	73
Ilustración 61. Hito HIT011.....	73
Ilustración 62. Hito HIT012.....	73
Ilustración 63. Hito HIT013.....	73
Ilustración 64. Hito HIT014.....	73
Ilustración 65. Hito HIT015.....	73
Ilustración 66. Hito HIT121.....	74
Ilustración 67. Hito HIT231.....	74
Ilustración 68. Hito HIT232.....	74
Ilustración 69. Hito HIT233.....	74
Ilustración 70. Hito HIT234.....	74

Ilustración 71. Hito HIT235.....	74
Ilustración 72. Hito HIT341.....	74
Ilustración 73. Hito HIT342.....	74
Ilustración 74. Hito HIT343.....	74
Ilustración 75 Inclinómetro ICLI01	75
Ilustración 76 Inclinómetro ICLI02	75
Ilustración 77 Inclinómetro ICLI03	75
Ilustración 78 Inclinómetro ICLI05	75
Ilustración 79 Inclinómetro ICLM06.....	75
Ilustración 80 Piezómetro PZA001	75
Ilustración 81 Piezómetro PZA002	75
Ilustración 82 Piezómetro PZA003	75
Ilustración 83 Piezómetro PZA004	76
Ilustración 84 Piezómetro PZA005	76
Ilustración 85 Piezómetro PZA006	76
Ilustración 86 Piezómetro PZA007	76
Ilustración 87 Piezómetro PZA008	76
Ilustración 88 Piezómetro PZA009	76
Ilustración 89 Piezómetro PZA010	76
Ilustración 90 Piezómetro PZA011	76
Ilustración 91 Piezómetro PZA012	76
Ilustración 92 Piezómetro PZA013	77
Ilustración 93 Piezómetro PZA014	77
Ilustración 94 Piezómetro PZA015	77

Ilustración 95 Piezómetro PZA016	77
Ilustración 96 Piezómetro PZA017	77
Ilustración 97 Piezómetro PZA018	77
Ilustración 98 Piezómetro PZA019	77
Ilustración 99. Tabla 3-17 (Cruden, D. M y Varnes, D. J., 1996).....	78
Ilustración 100. Procedimiento para definición de umbrales	79
Ilustración 101. Esquema general de integración Infracworks – Power BI. Elaboración propia.....	82
Ilustración 102. Vista general de la cola del embalse en Infracwork. Elaboración propia.....	82
Ilustración 103. Vista de parte de la ladera en Infracworks. Elaboración propia.....	82
Ilustración 104. Página principal Cuadro de mando. Elaboración propia	82
Ilustración 105. Modelo de datos de Power BI. Elaboración propia	82
Ilustración 106. Criterios generales. Elaboración propia.....	84
Ilustración 107. Flujo de trabajo del bloque. Elaboración propia	85
Ilustración 108. Árbol de carpetas principales del CDE. Elaboración propia.....	87
Ilustración 109. Vista general del modelo en Infracworks. Elaboración propia.....	89
Ilustración 110. Vista de la ladera en Infracworks. Elaboración propia	89
Ilustración 111. Vista detallada del modelo en Infracworks. Elaboración propia.....	89
Ilustración 112. Conexión Infracworks – Power BI Service mediante AssetID. Elaboración propia...	90
Ilustración 113. Procedimiento de acceso a los datos. Elaboración propia	91
Ilustración 114. Algunas tablas y medidas en Power BI. Elaboración propia.....	94
Ilustración 115. Vista de Modelo de Power BI. Elaboración propia	95
Ilustración 116. Vista de la página CONTROL accediendo desde Infracworks a través del HIT006. Elaboración propia	96

Ilustración 117. Vista de la página GRÁFICAS-HIT seleccionando en el slicer el HIT343. Elaboración propia	97
Ilustración 118. Vista de la página ALERTAS-HIT seleccionando en el slicer el HIT343. Elaboración propia	98
<i>Ilustración 119. Vista de la página GRÁFICAS-ICL seleccionando en el slicer el ICLM06. Elaboración propia</i>	<i>99</i>
Ilustración 120. Vista de la página ALERTAS-ICL seleccionando en el slicer el ICLM06. Elaboración propia	100
Ilustración 121. Vista de la página GRÁFICAS-PZA seleccionando en el slicer el PZA017. Elaboración propia	101
Ilustración 122. Vista de la página ALERTAS-PZA seleccionando en el slicer el PZA001. Elaboración propia	102
Ilustración 123. Secuencia de validación desde Infraworks. Elaboración propia.....	103
Ilustración 124. Esquema de mantenimiento y actualización del sistema. Elaboración propia	106
Ilustración 125. Construcción de la página CONTROL en Power BI. Elaboración propia	108
Ilustración 126. Encabezados de varias páginas. Elaboración propia	109
Ilustración 127. Cadena de control de la calidad. Elaboración propia	109
Ilustración 128, Guía de uso de un técnico desde el modelo en Infraworks hasta alerta. Elaboración propia	111
Ilustración 129. Continuidad metodológica entre el bloque de lectura histórica y la capa predictiva. Elaboración propia	118
Ilustración 130. Secuencia de construcción del dataset de modelado. Elaboración propia	120
Ilustración 131. Entorno de trabajo en Azure Machine Learning Studio. Elaboración propia	123
Ilustración 132. Resultado del primer entrenamiento directo sobre EstadoRiesgo. Elaboración propia	124

Ilustración 133. Reformulación del problema predictivo desde el estado actual al estado de la campaña siguiente. Elaboración propia	125
Ilustración 134. Métricas y matriz de confusión del experimento multiclase a campaña siguiente. Elaboración propia	127
Ilustración 135. Criterio seguido para seleccionar el modelo de referencia. Elaboración propia..	127
Ilustración 136. Métricas y matriz de confusión del modelo binario optimizado con NormMacroRecall. Elaboración propia	129
Ilustración 137. Evolución de la formulación del problema predictivo hasta llegar al objetivo futuro binario. Elaboración propia	130
Ilustración 138. Lógica de explotación acordada para combinar predicción IA y criterio técnico. Elaboración propia	131
Ilustración 139. Creación de la tabla en Azure SQL Database mediante el editor de consultas del portal, ya con una estructura pensada para explotación analítica. Captura procedente del documento operativo.....	135
Ilustración 140. Comparación entre la ruta batch inicialmente probada y la arquitectura finalmente adoptada. Elaboración propia.	135
Ilustración 141. Arquitectura finalmente adoptada para conectar el modelo de Azure ML con la explotación en Power BI mediante Azure SQL Database. Elaboración propia	136
Ilustración 142. Capas funcionales de la arquitectura final: contexto territorial, lectura histórica, inferencia y repositorio intermedio. Elaboración propia	138
Ilustración 143. Estado final de la página PREDICCIÓN IA en Power BI. Elaboración propia	139

ANEXO Nº 3. DIAGRAMAS E ILUSTRACIONES RELEVANTES

ILUSTRACIÓN 42. VISTA GENERAL DE LA LADERA DESDE LA ORILLA CONTRARIA. ELABORACIÓN PROPIA



ILUSTRACIÓN 50. ORTOFOTO CON UBICACIÓN DE ELEMENTOS DE AUSCULTACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA

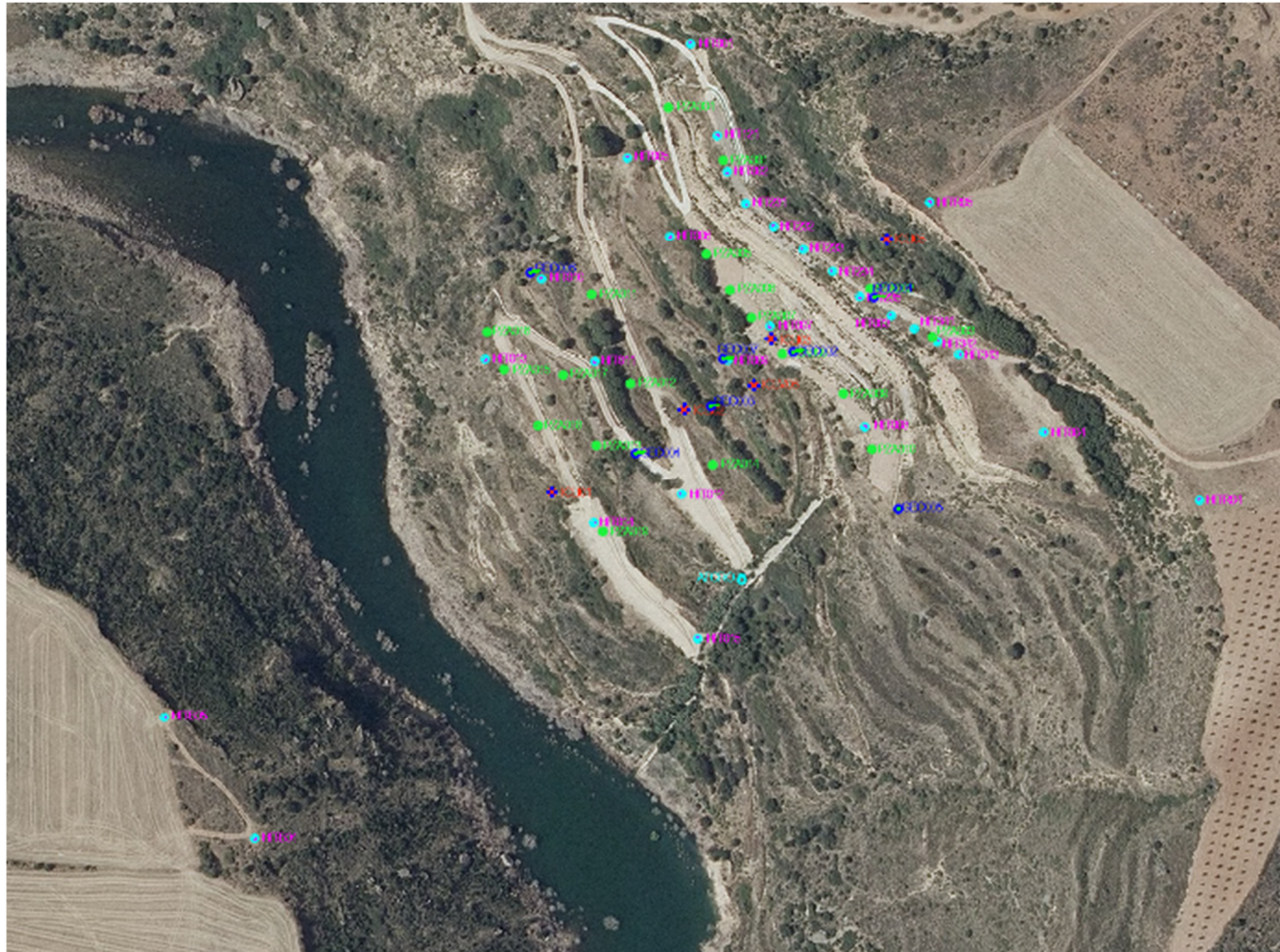


ILUSTRACIÓN 27. ARQUITECTURA BIM–BD–IA–ALERTAS (ESQUEMA). ELABORACIÓN PROPIA.

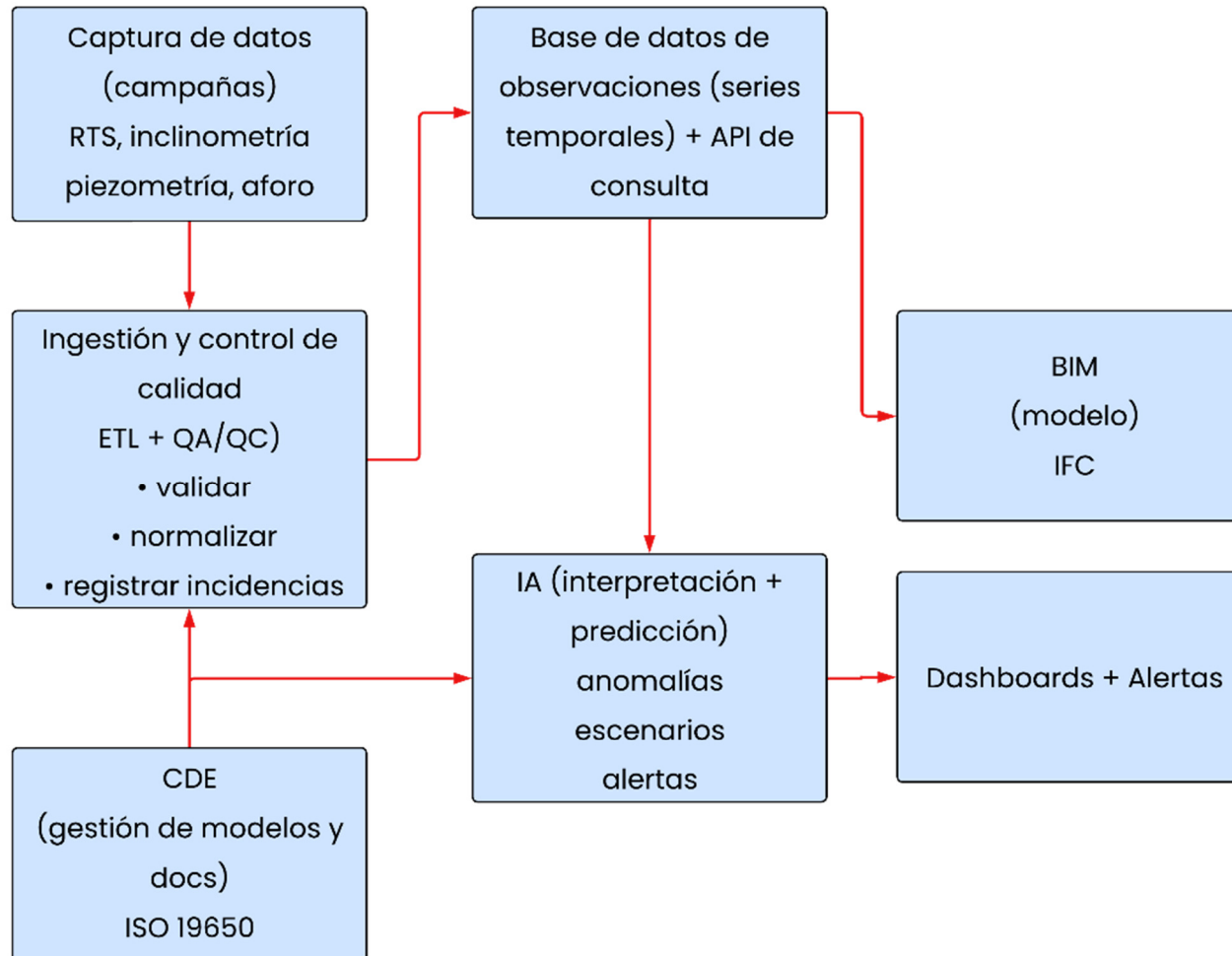


ILUSTRACIÓN 28. ESTADOS TÍPICOS DEL CDE (WIP-SHARED-PUBLISHED-ARCHIVE). ELABORACIÓN PROPIA

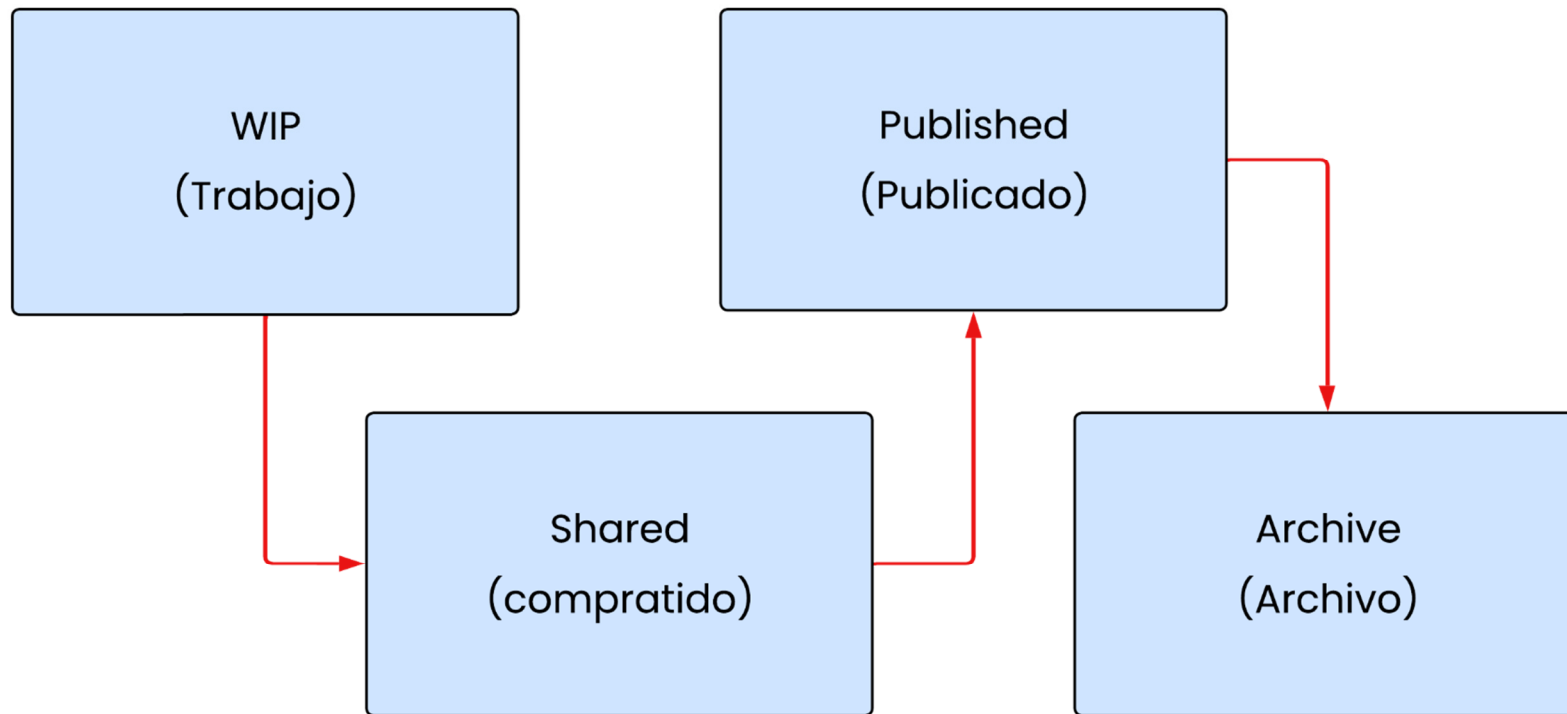


ILUSTRACIÓN 100. PROCEDIMIENTO PARA DEFINICIÓN DE UMBRALES

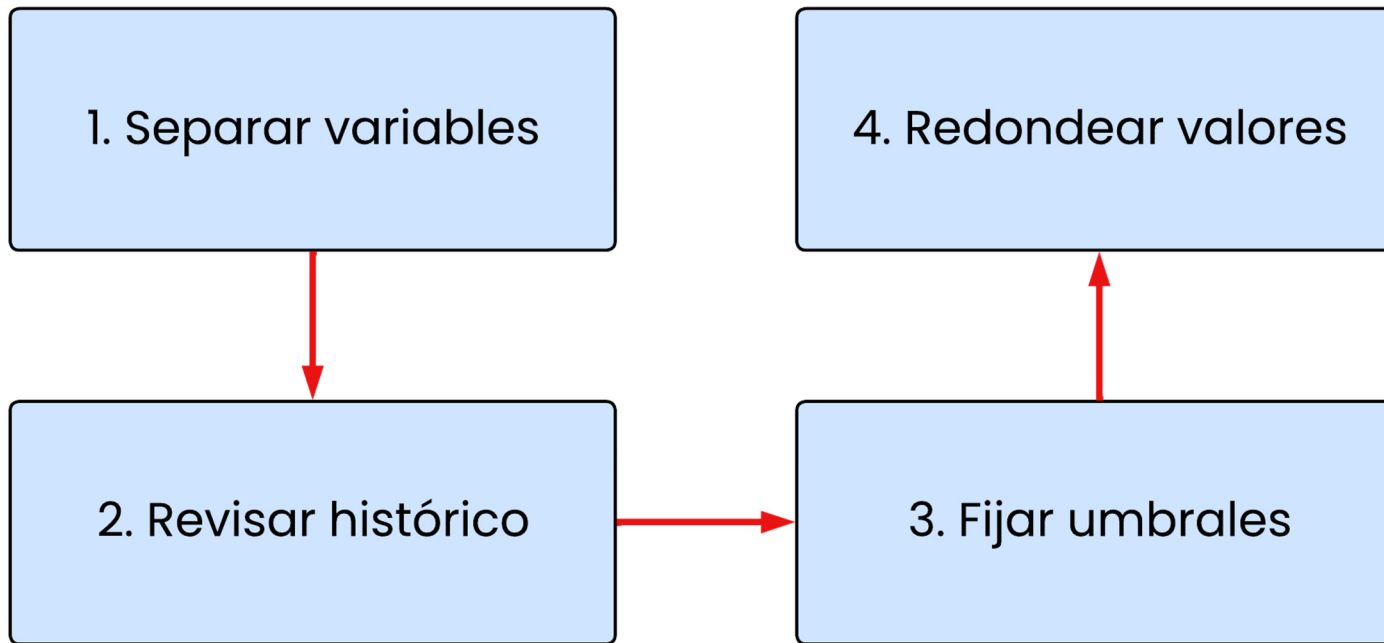


ILUSTRACIÓN 101. ESQUEMA GENERAL DE INTEGRACIÓN INFRAWORKS – POWER BI. ELABORACIÓN PROPIA

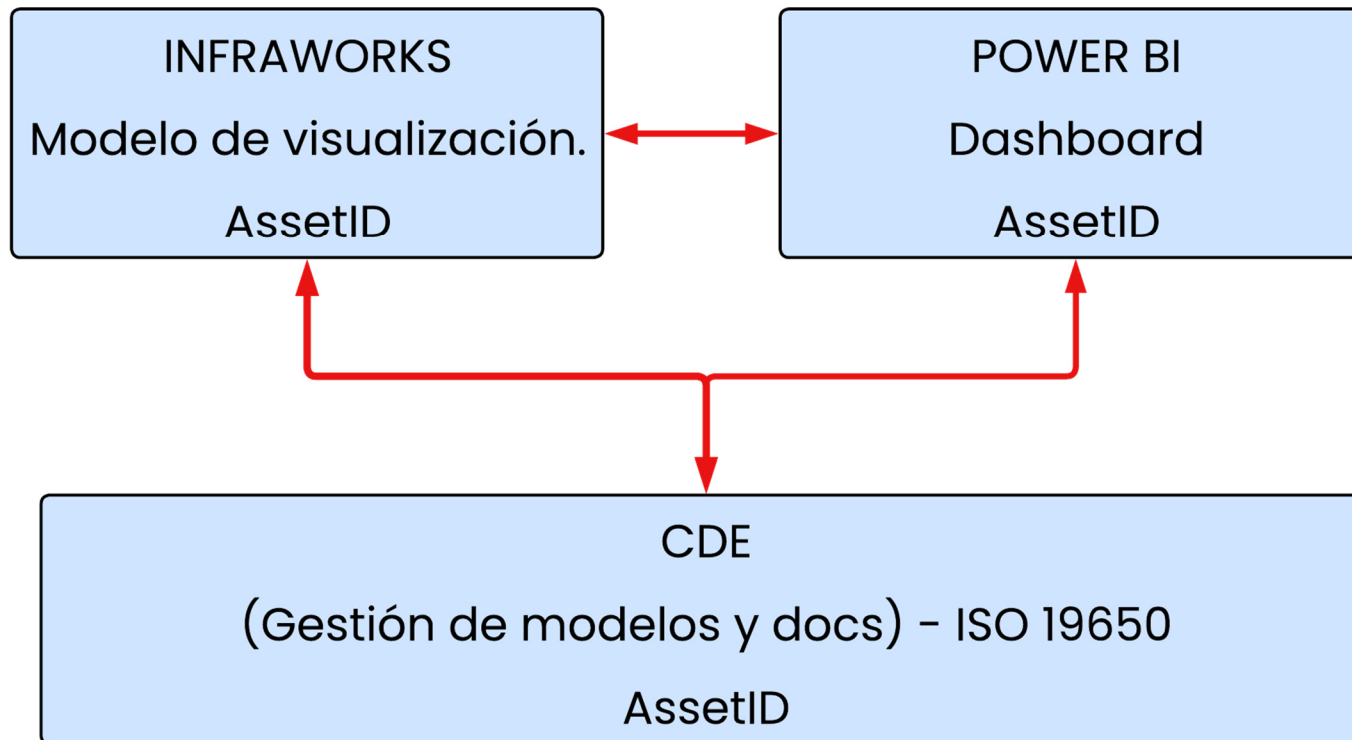


ILUSTRACIÓN 112. CONEXIÓN INFRAWORKS – POWER BI SERVICE MEDIANTE ASSETID. ELABORACIÓN PROPIA



ILUSTRACIÓN 115. VISTA DE MODELO DE POWER BI. ELABORACIÓN PROPIA

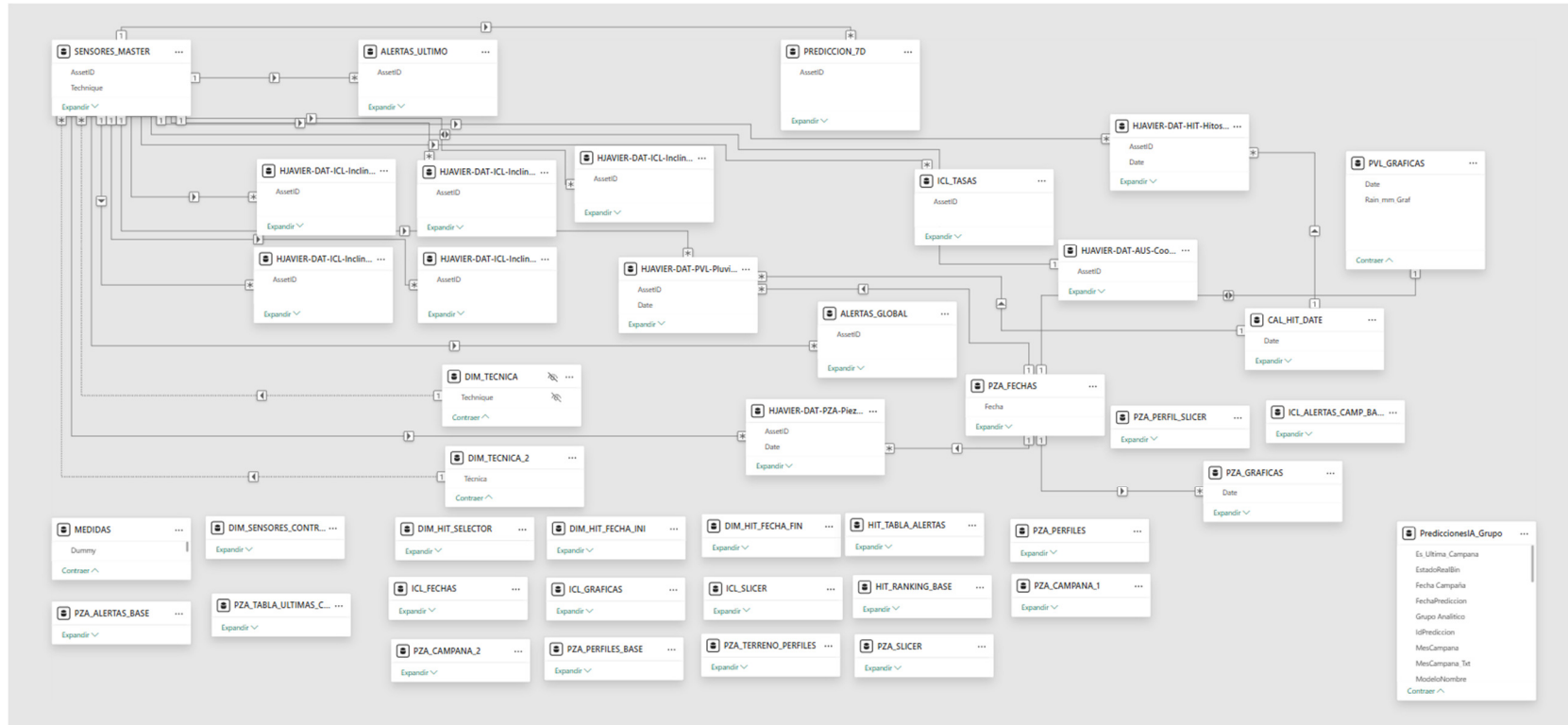


ILUSTRACIÓN 128, GUÍA DE USO DE UN TÉCNICO DESDE EL MODELO EN INFRAWORKS HASTA ALERTA.
ELABORACIÓN PROPIA

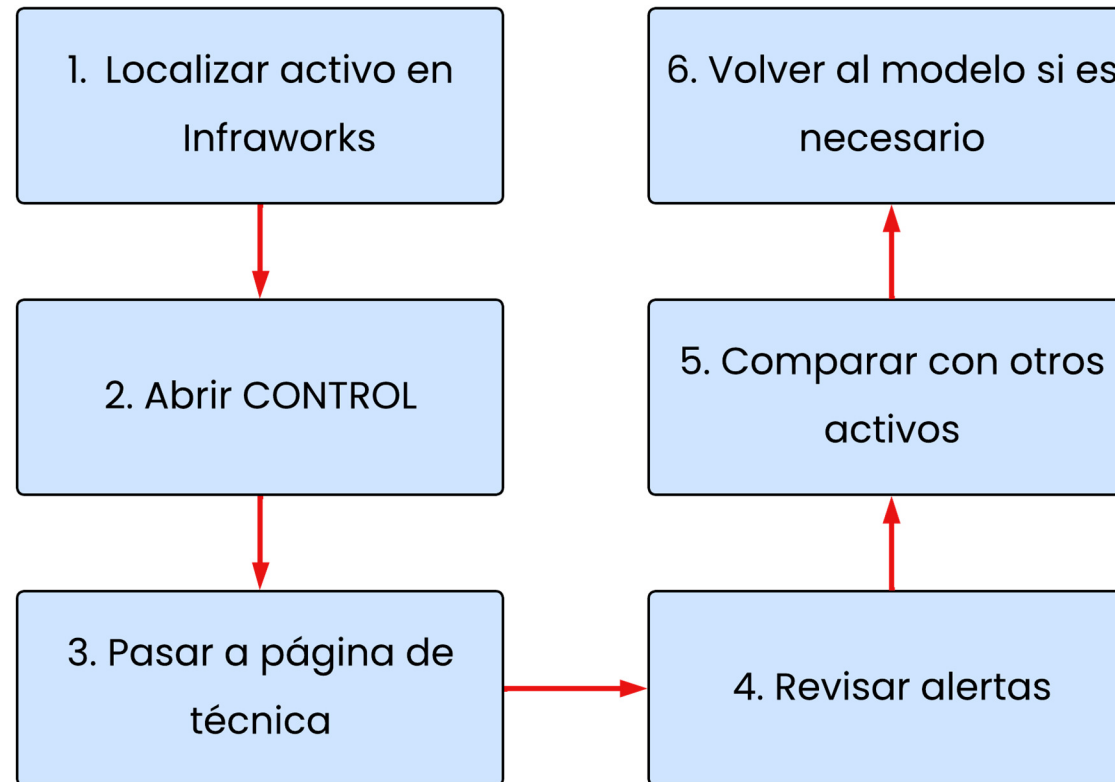
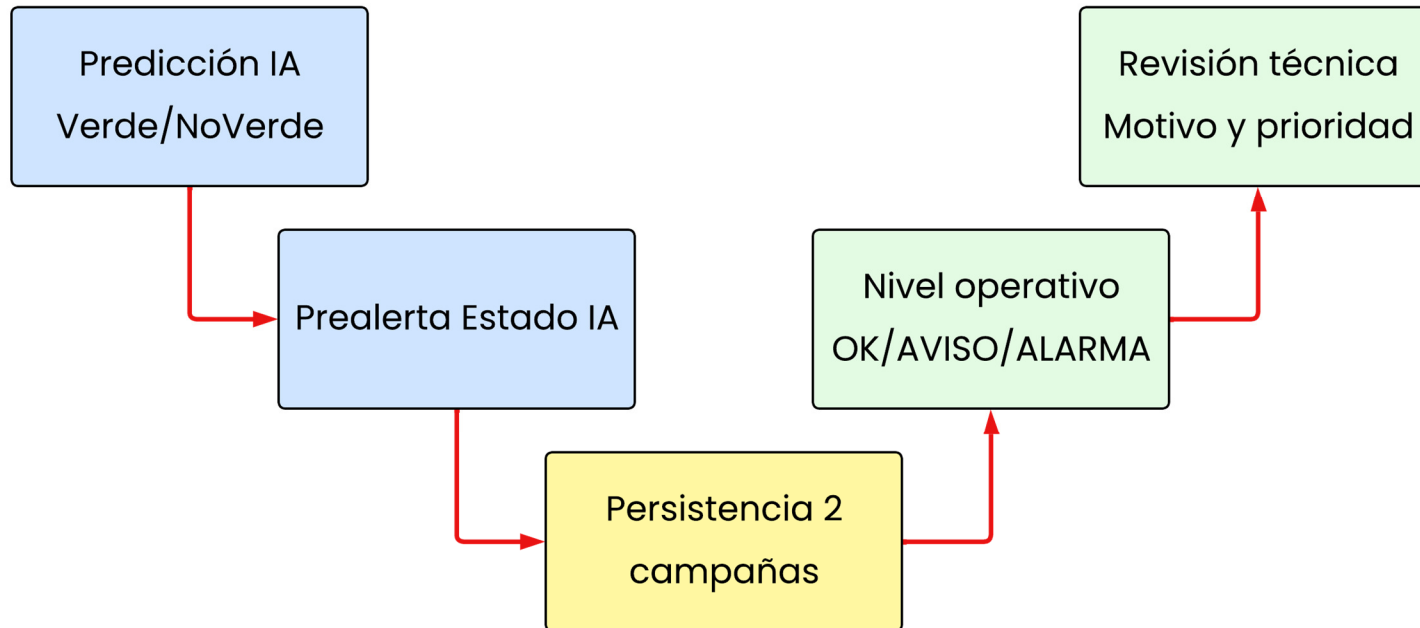


ILUSTRACIÓN 138. LÓGICA DE EXPLOTACIÓN ACORDADA PARA COMBINAR PREDICCIÓN IA Y CRITERIO TÉCNICO. ELABORACIÓN PROPIA



Idea central: Azure ML no sustituye la interpretación de un técnico. Aporta una señal temprana que debe combinarse con persistencia, reglas y lectura del comportamiento real del deslizamiento

ILUSTRACIÓN 142. CAPAS FUNCIONALES DE LA ARQUITECTURA FINAL: CONTEXTO TERRITORIAL, LECTURA HISTÓRICA, INFERENCIA Y REPOSITORIO INTERMEDIO. ELABORACIÓN PROPIA

