

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS DE AUSCULTACIÓN

(Continuación de "Auscultación y monitoreo de presas de fabricas"
Conferencia 9.3.1999 - 5.20 / 102.1-R-117)

Ente Nacional de Energía Eléctrica
Honduras, El Cajón, febrero de 2001

por

Dr. Ing. Dr. h.c. Giovanni Lombardi

INDICE

	página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS DE LA AUSCULTACIÓN	1
3. TIPO DE PRESAS Y DE FALLAS	2
4. INSTRUMENTOS	4
5. FRECUENCIA DE LECTURA	8
6. REPRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS	9
7. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA AUSCULTACIÓN	10
7.1 En general	10
7.2 Estadística uni-dimensional	12
7.3 Estadística pluri-dimensional	14
7.4 Modelización	14
7.5 Estudio de los residuos	16
7.6 Limites de la modelización	18
8. ERRORES DE INTERPRETACIÓN	18
9. TOMA DE DECISIÓN	19
10. CONCLUSIONES	21

1. INTRODUCCIÓN

Hace dos años tuve la oportunidad de presentar algunos comentarios sobre "Auscultación y monitoreo de presas de fabrica" (102.1-R-117).

Me se ha pedido de ser más preciso en el asunto de los "Límites de tolerancia máximas para los distintos instrumentos".

Me parece oportuno, antes de tratar el tema en detalle, de recordar los criterios más importantes ya discutidos en la charla anterior. (Tabla I)

TABLA I	
TOPICOS PRINCIPALES	
1.	INTRODUCCIÓN
2.	OBJETIVOS DE LA AUSCULTACIÓN
3.	TIPO DE PRESAS Y DE FALLAS
4.	INSTRUMENTOS
5.	FRECUENCIA DE LECTURA
6.	REPRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS
7.	INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA AUSCULTACIÓN
7.1	En general
7.2	Estadística unidimensional
7.3	Estadística pluri-dimensional
7.4	Modelización
7.5	Estudio de los residuos
7.6	Limites de la modelización
8.	ERRORES DE INTERPRETACIÓN
9.	TOMA DE DECISIÓN
10.	CONCLUSIONES

2. OBJETIVOS DE LA AUSCULTACIÓN

Es claro de antemano que para nosotros el objetivo de la auscultación es de contribuir a la seguridad de la obra, pero también al estudio de un eventual envejecimiento de la misma con posible limitación de su vida útil y entonces de su valor.

Es obvio también que la auscultación por instrumentación puede detectar únicamente ciertos aspectos de los fenómenos involucrados y que otros pueden única-

mente ser detectados por inspección visual. De hecho nosotros tenemos un cierto campo de visión y de entendimiento, mientras que los instrumentos se refieren a aspectos particulares localizados, ni piensan. (Tabla II)

<p style="text-align: center;">TABLA II</p> <p style="text-align: center;">SUPERVISIÓN DEL COMPORTAMIENTO</p> <ul style="list-style-type: none">◆ Inspecciones visuales◆ Instrumentación y mediciones◆ Interpretación de las mediciones◆ Toma de decisiones◆ Archivos de los datos medidos
--

Se trata de hecho de detectar cualquier debilidad de la obra antes obviamente que se haya producido una falla, debido a que después no sirve mucho que la auscultación indique que una falla se ha producido, excepto posiblemente para disparar una alarma generalizada aguas abajo de la obra antes que llegue la ola de inundación para que la gente pueda huyerse.

Según ya dice, la información proporcionada es valiosa únicamente si es perfectamente confiable, exacta e inmediatamente disponible. En caso contrario no solamente es inútil sino puede también ser peligrosa o sea ocultando un peligro real o sea creando alarmas inútiles y pérdida de confianza en la obra y sus operadores.

3. TIPO DE PRESAS Y DE FALLAS

Simplificando algo, puede decirse que hay razonablemente dos tipos de presas: (Tabla III)

- las que se apoyan en las laderas de valles relativamente estrechos con una fuerte componente de fuerzas horizontales transversales, y esas son las presas de arco, tal El Cajón, y
- las que se apoyan esencialmente en el fondo de valles generalmente más amplios y son de hecho globalmente presa de gravedad como:

- presas de gravedad clásicas de concreto
- presas de gravedad de concreto rollado
- presas de gravedad aliviadas
- presas de contrafuertes
- presas de arcos múltiples, y obviamente las
- presas de materiales sueltos homogéneas
- presas de materiales sueltos zonificadas
- presas de escollera con núcleo impermeable o
- presas de escollera con cara impermeable sin contar las
- múltiples combinaciones posibles

TABLA III

TIPOS DE PRESA Y PROBLEMAS PRINCIPALES

Apoyo en la cimentación esencialmente	Materiales	
	Concretos (varios tipos)	Sueltos (varios tipos)
- lateral - en el fondo valle	presas bóvedas presas gravedad	— diques
Problemas posibles - en presa - en cimentación - edad	estructurales hidráulicos alteración del concreto	hidráulicos hidráulicos alteración de la pantalla
Mediciones principales - en presa - en cimentación	deformaciones presiones y caudales	presiones y caudales presiones y caudales

Los materiales de construcción son normalmente de dos categorías:

- concreto (de varios tipos), y
- materiales sueltos (también de varios tipos).

Las posibles fallas son de tipo esencialmente estructural para las presas de concreto y típicamente de tipo hidráulico para las presas de materiales sueltos, mientras los posibles problemas de la cimentación se encuentran en ambas clases de obras.

Como consecuencia los tipos de medición que más importan son, de manera muy simplificada:

- de deformaciones para las obras de concreto,
- de sub-presiones y de caudales para las obras de materiales sueltos, e igual
- de sub-presiones y caudales para las cimentaciones.

4. INSTRUMENTOS

Para entender el comportamiento de la obra no se trata simplemente de medir los mencionados efectos de deformaciones y de valores hidráulicos sino también sus causas principales que son:

- nivel de embalse,
- nivel de los sedimentos,
- temperaturas (aire, agua),
- radiación solar,
- cargas sísmicas,
- olas (por ejemplo debidas a derrumbes en el vaso)
- hielo,
- cargas varias.

Los instrumentos utilizados para estas mediciones son bien conocidos y no se necesita desglosarlos aquí.

Solamente se puede anotar que existen cadenas lógicas que permiten mediciones a diferentes niveles. (Tabla IV)

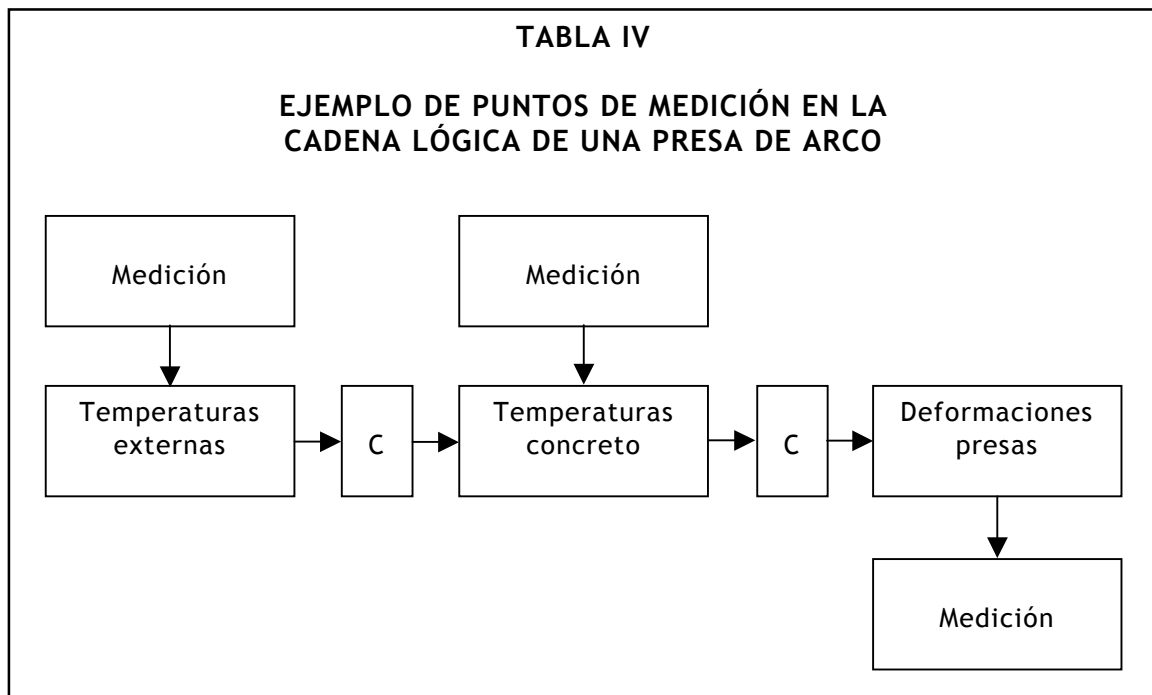
Por ejemplo, en una obra de concreto la situación es la siguiente.

Las temperaturas externas, como la del agua, la del aire y la radiación solar con sus variaciones, determinan el campo térmico en el interior de la maza de concreto. A su vez este campo térmico determina las deformaciones de la obra y su estado tensional.

Se puede entonces

- obien:
 - medir las temperaturas externas (y la radiación solar)
 - computar el campo térmico interno, y
 - computar las deformaciones inducidas

- obien:
 - medir directamente el campo térmico interno, y
 - computar las deformaciones inducidas.



Sin embargo, la experiencia enseña que una combinación de ambos métodos es la que produce los mejores resultados (es decir medir temperaturas internas y externas).

Bien se entiende que instrumentar una presa no consiste simplemente en colocar el número más grande posible de instrumentos, sino de diseñar un sistema lógico de instrumentación. Lamentablemente, no siempre se llega a tal resultado.

Las presas de arco presentan una gran ventaja respecto a otros tipos de presa, y esto es que, digamos, todos los puntos de la presa son conectados rígidamente entre sí de manera que cualquier evento extraordinario se puede notar hasta a gran distancia de su origen, lo que facilita claramente su detección.

No así en una larga presa de materiales sueltos, donde una falla por sifonaje puede producirse en un sector de la obra sin que se note nada en otros largos tramos de la presa. (Figura 1)

Es difícil entonces entender que en presas de tierra largas se tenga la costumbre de concentrar un gran número de piezómetros en el núcleo en muy pocas secciones transversales, mientras que entre una sección y la siguiente se encuentran largos tramos no instrumentados y entonces sin posibilidad de control de seguridad.

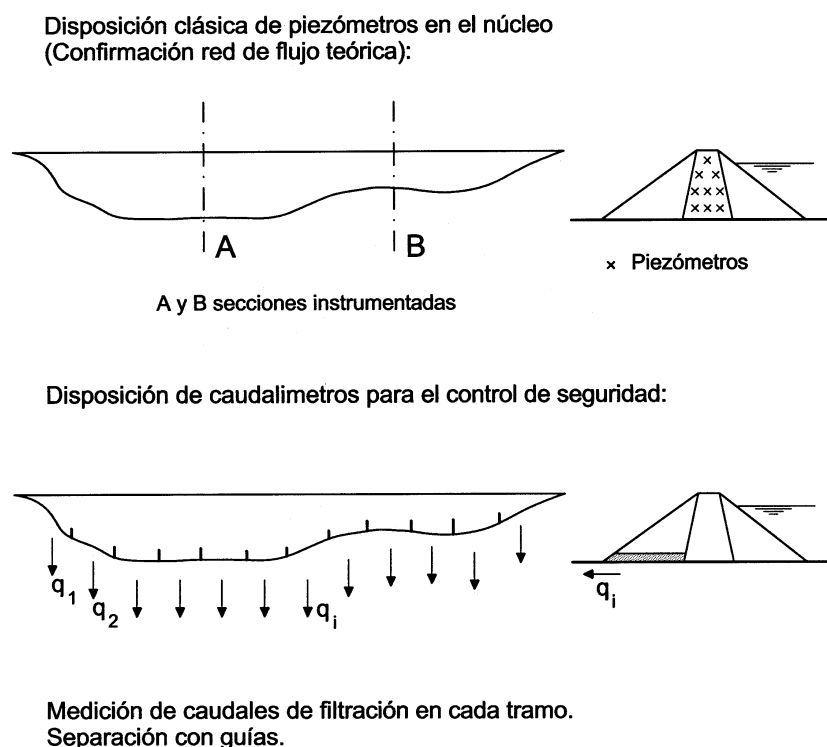


Figura 1: Instrumentación dique de "tierra" con núcleo.

En mi opinión sería mucho más eficiente subdividir la presa en tramos cortos y medir los caudales de filtración en cada tramo y así tener una auscultación real de toda la obra.

Sin embargo, no quiero discutir ahora, si colocar piezómetros en un núcleo de arcilla tiene mucho sentido.

Por lo que es del tipo de instrumentos ya dice que en mi opinión deber ser: (Tabla V)

- sencillos
- robustos
- removibles es decir reemplazables
- confiables y estables
- fácil de leer y de indicación física directa
- y por fin que tengan ciento grado de redundancia.

Que las lecturas sean hechas visualmente - o manualmente como se dice - obien automáticamente a distancia, es por el momento un aspecto secundario del pro-

blema. El esencial es que sean hechas correctamente y con mucho cuidado y que puedan ser evitados errores de transmisión.

TABLA V	
INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN: REQUISITOS	
◆	Simple y robustos
◆	Accesibles
◆	Reemplazables (continuidad serie de datos)
◆	Indicación directa valores útiles
◆	Confiables
◆	Estables
◆	Lectura fácil
◆	Cierta redundancia

Debido a que, en mi opinión, todo, incluso la auscultación de presas, debe ser hecho de la manera más económica posible - siempre que sea bien hecho - es oportuno clasificar los instrumentos en dos categorías: (Tabla VI)

- los "detectores" o instrumentos principales, y
- los de apoyos o complementarios o de control.

TABLA VI	
ESTRATEGIA GENERAL	
◆	Instrumentos detectores <ul style="list-style-type: none">- sensibles a efectos globales- lectura relativamente frecuente- llaman la atención sobre anomalías
◆	Instrumentos auxiliares (de apoyo) <ul style="list-style-type: none">- más sensibles a efectos locales- lectura ocasional (y de mantenimiento)- ayudan a explicar anomalía

5. FRECUENCIA DE LECTURA

La frecuencia de lectura de cada instrumento debe ser adaptada a su naturaleza y al objetivo que tiene.

El criterio es que en el intervalo de tiempo entre una lectura y la siguiente no pueda pasar nada de importante y de potencialmente peligroso.

Esta frecuencia depende entonces de los valores físicos medidos. Así no sirve de nada medir cada minuto ni hasta cada día, ni semana, una temperatura en la maza de concreto cuando se sabe que dicha temperatura varía de solamente pocos grados a lo largo del año.

Eso quiere decir que a tenerse lecturas automáticas continuas, deben ser extraídos ciertos valores en intervalos adecuados para su ulterior procesamiento, mientras que los valores intermedios pueden ser descartados. Mejor es todavía conservar solamente los valores promedios en ciertos intervalos para compensar variaciones accidentales de medición.

Con eso se entiende que el objetivo de la auscultación es proporcionar datos - o mejor dicho una base de datos - para estar en condición de desarrollar otras operaciones de análisis. Entre ellas hay tres mayores la "representación", la "interpretación" y la "toma de decisiones". (Tabla VII)

Es muy importante hacer una bien clara distinción entre representación e interpretación de los resultados de la auscultación.

<p style="text-align: center;">TABLA VII</p> <p style="text-align: center;">LOS ELEMENTOS BÁSICOS DEL ANÁLISIS DE SEGURIDAD SON:</p> <ul style="list-style-type: none">◆ Inspecciones (observaciones)◆ Instrumentación◆ Auscultación (mediciones)◆ Representación mediciones◆ Interpretación mediciones y observaciones◆ Toma de decisión
--

6. REPRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

La forma de representación que siempre se encuentra es la forma cronológica y muchos son los ingenieros que creen que con esto ya todo sea arreglado. Se limitan a mirar los gráficos y después de un corto pensamiento deciden perentoriamente que todo es más o menos como el año anterior y que entonces no existen problemas. (Figura 2) No siempre esta conclusión es tan simple.

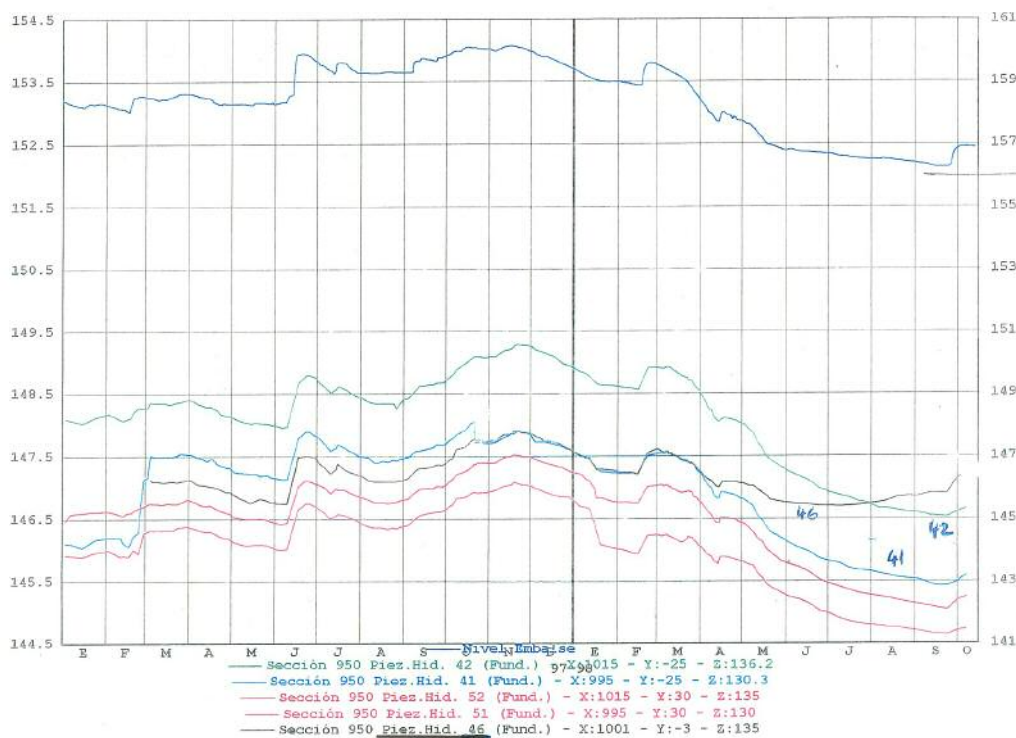


Figura 2: Auscultación - Representación cronológica. En el punto 46 se produce algo raro a investigar.

Posiblemente dibujan también un gráfico de, por ejemplo, una deformación o de un caudal de infiltración en función de la cota de embalse y se encuentran complacidos ya que ambos aumentan en función del grado de llenado del reservorio. Este comportamiento es algo sencillo. Hablo obviamente del comportamiento de los que miran los gráficos, no de la presa cuyo comportamiento puede ser algo menos sencillo.

De hecho, casos de comportamiento anormal se pueden detectar frecuentemente solamente después de un análisis mucho más fino de los resultados de auscultación.

Puede decirse que (Tabla VIII):

- una auscultación sin representación gráfica de los datos no sirve de nada, y que
- una simple representación de los datos sin interpretación precisa sirve muy poco.

TABLA VIII		
REPRESENTACIÓN E INTERPRETACIÓN		
MEDICIONES		
♦	Representación	
	- cronológica	
	- funcional (por ejemplo en función nivel embalse)	
	- correlacional	
♦	Interpretación	
	- método estadístico	ME
	- método determinístico	MD
	- método combinado (ME+MD)	MIC
♦	Comentarios	
	- auscultación sin representación es inútil	
	- representación sin interpretación es poco útil	

7. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA AUSCULTACIÓN

7.1 En general

La interpretación de los resultados de la auscultación debe contestar por lo menos las siguientes preguntas: (Tabla IX)

- ¿Sigue la presa comportándose como hizo hasta la fecha, es decir en los años pasados? ¿O bien pasa algo de nuevo?
- ¿La presa se comporta como el ingeniero que la diseñó y la calculó, considera que debe hacerlo?
- ¿Si hay discrepancias, bajo uno u otro criterio, a que son debidas?
 - ¿a errores de medición? o transmisión de datos?
 - ¿a casos de carga no esperados?

- ¿a una evolución lenta de las características de los materiales?
- ¿a cambios bruscos que pueden indicar un problema y el acercarse de un peligro?

TABLA IX	
SEGURIDAD DE PRESAS	
Preguntas a contestar	
◆	¿Comportamiento igual a los años anteriores?
◆	¿Comportamiento corresponde a diseño?
◆	Eventuales discrepancias debidas a:
-	¿error de medición?
-	¿error de transmisión?
-	¿deriva lenta instrumento?
-	¿caso de carga no esperado?
-	¿evolución lenta materiales?
-	¿cambios bruscos?
-	¿falla instrumento?
-	¿peligro?
-	¿otros eventos?
Contestaciones	
◆	método estadístico
◆	modelización
◆	método combinado (MIC)

La contestación a la primera pregunta puede, en general pero no siempre, encontrarse en un simple estudio estadístico.

De hecho hay varios casos en los cuales la interpretación se limita a consideraciones de esta naturaleza, que pero no son siempre conclusivas, por ejemplo cuando se ofrecen por la primera vez casos de carga particulares; como:

- una crecida máxima, y entonces una cota de embalse que no se había producido hasta la fecha, obien
- una combinación de cotas de embalse y de condiciones térmicas que hasta la fecha no se habían presentado, obien
- casos particulares como el que se produjo por la primera vez, hace dos años con la caída de una avalancha sobre la presa de arco de Ferden (en Suiza), obien
- cualquier nueva carga.

En todos estos casos se necesita una análisis basada sobre un modelo de comportamiento desarrollado de antemano.

De hecho la experiencia enseña que una clara contestación se la puede obtener solamente con un sistema combinado, como lo utiliza el sistema MIC (Modelo Interpretativo Combinado) que ya se mencionó hace dos años aquí mismo. En el antedicho caso de la avalancha de Ferden, el sistema MIC pudo confirmar que la presa no había subido daños a pesar del golpe recibido y del fuerte cambio de las condiciones térmicas debidas a la masa de nieve acumulada en contra de la cara de aguas abajo de la presa.

7.2 Estadística uni-dimensional

Un estudio estadístico unidimensional es fácil de establecer, a condición que la presa tenga ya una cierta edad y que se queden a disposición los datos de auscultación de los años anteriores. No puede entonces utilizarse en los primeros años, mientras se sabe que el mayor riesgo de falla se presenta justamente en estos primeros años de vida de la obra que nunca fue ensayada hasta el entonces bajo estas condiciones de carga.

Sin embargo, el estudio estadístico sobre base del tiempo es útil si se tiene por ejemplo un ciclo anual de llenado y variado del embalse que se repite regularmente en coincidencia con el ciclo estacional.

Pero, no siempre, es así y el sistema falla si se produce una combinación de cota y temperaturas no normal o no esperada.

La Figura 3 indica como una simple análisis harmónica puede ser engañadora.

También la base puede ser otra que el tiempo. (Figura 4) Se puede, por ejemplo, indicar la deformación de una bóveda en función de la cota de embalse, lo que es muy significativo a condición que otros efectos, como los de la temperatura sean de importancia reducida, y siempre que se haya ya llegado a cotas elevadas del embalse.

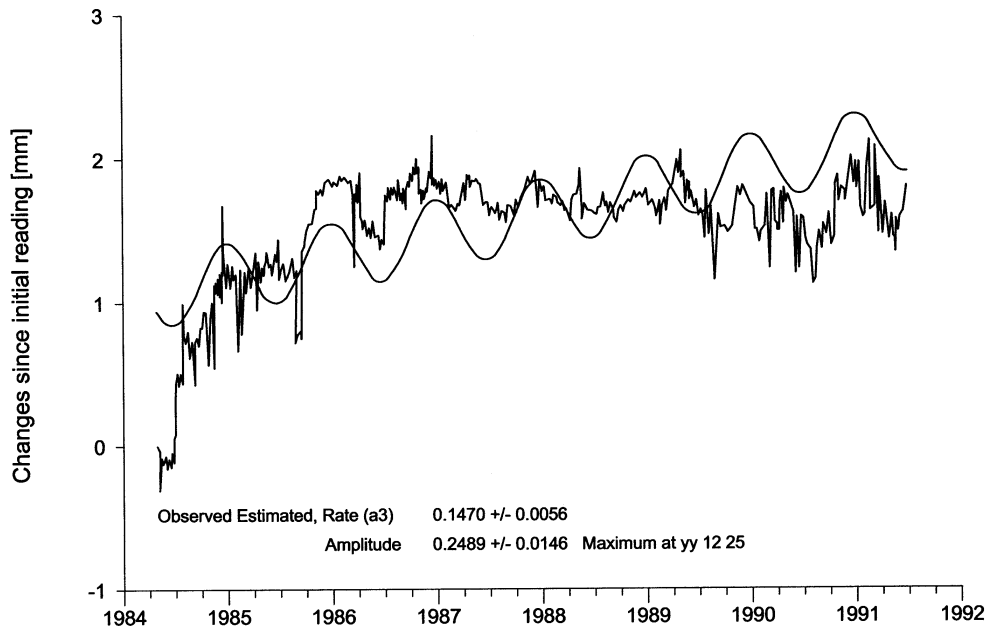


Figura 3: Ejemplo de simulación no adecuada. La función armónica indica una tendencia continua al aumento, mientras el fenómeno se estabilizó ya desde 5 años.

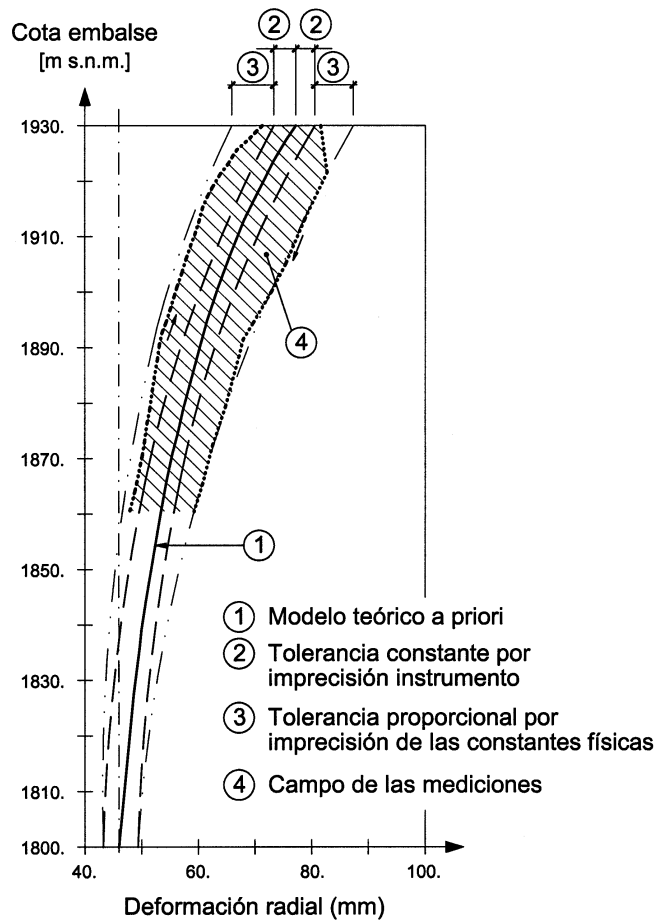


Figura 4: Ejemplo de chequeo de plausibilidad de tipo funcional.

7.3 Estadística pluri-dimensional

Un desarrollo del método estadístico unidimensional se lo puede conseguir con un análisis pluri-dimensional. Por ejemplo se puede tratar de interpretar las deformaciones de una presa, digamos de arco, como función del embalse y de una variable estacional.

La situación mejora. Sin embargo, no siempre es suficientemente satisfactoria. En particular, no se puede extrapolar a casos que no se han presentados en la fecha, por ejemplo efectos sísmicos. Claramente tampoco se puede separar, de esta manera, los efectos de causas que varían con la misma frecuencia (por ejemplo anual).

7.4 Modelización

Una solución más eficiente es la modelización de la obra, o mejor dicho del valor medido por cada instrumento detector bien definido.

De hecho se trata de superponer los efectos de los varios factores que tienen una influencia sobre una data reacción de la obra y eso utilizando los estudios estructurales desarrollados. (Tabla X)

Si consideramos por ejemplo una presa de concreto, la deformación en un cierto punto y en un cierto periodo puede ser representada como función de valores momentáneos de

- el nivel del embalse,
- ev. nivel del remanso aguas abajo,
- la temperatura del agua (y su variación con la profundidad),
- la temperatura del aire,
- la temperatura del concreto en varios puntos,
- la presión intersticial en la cimentación en varios puntos, y
- otros efectos más.

También puede haberse una influencia de valores anteriores. Por ejemplo en caso exista una cierta viscosidad del concreto, no es solamente la cota instantánea del embalse que cuenta sino también las cotas en los días y semanas anteriores.

TABLA X	
PRINCIPIOS DE LA MODELIZACIÓN	
Ejemplo = presa de arco, deformación	
δ_m	= deformación medida en un cierto punto
δ_c	= deformación teórica calculada en el mismo punto
$\delta_c = f(h) + \sum c_i \times T_i + e(t)$	
con:	<p>h = cota embalse</p> <p>$f(h)$ = deformación inducida por embalse</p> <p>T_i = temperatura en cualquier punto</p> <p>c_i = su influencia sobre la deformación</p> <p>$\sum c_i \times T_i$ = influencia de todas las temperaturas</p> <p>t = tiempo (fecha)</p> <p>$e(t)$ = eventual corrección estacional</p>
$\Delta = \delta_m - \delta_c$	
con:	Δ = residuo que es:
$\Delta = e_m + \varepsilon + l(t) + D$	
con:	<p>e_m = error modelo</p> <p>ε = error medición</p> <p>$l(t)$ = evolución a largo plazo</p> <p>D = discrepancia accidental</p>
Tareas:	<ul style="list-style-type: none"> - eliminar (en lo posible) error modelo e_m - reducir errores medición ε - determinar evolución a largo plazo $l(t)$ - explicar discrepancia accidental D

En la tabla anterior se indica como se presenta una tal análisis y una tal modelización. Este tipo de interpretación equivale a definir condiciones de referencia constantes para el embalse, la temperatura y otras condiciones. De hecho se trata de calcular cual sería la deformación de la presa en "condiciones iguales" de la obra; es decir por ejemplo misma cota de embalse y mismo estadio térmico.

Es ventajoso que estas condiciones de base sean una cota de embalse alta (sin ser el máximo) y las temperaturas anuales promediadas.

Claramente debe siempre tomarse en consideración un cierto "residuo" que indica la diferencia entre la deformación que se mide y la deformación que se debería tener, es decir medir. Este residuo debe ser explicado y se puede considerar que se compone de:

– errores de medición (de la variable y de sus causas como la temperatura),

- imprecisiones del modelo interpretativo,
- variaciones de comportamiento de la presa (por ejemplo aumento del modulo de elasticidad con la edad del concreto),
- efectos a largo plazo como por ejemplo expansión del concreto,
- formación de fisuras por tracción,
- efectos bruscos como daños a un instrumento, deslizamiento a lo largo de una junta o de la cimentación, y
- según el caso otras causas más.

7.5 Estudio de los residuos

Un estudio estadístico de los residuos o "diferencias" es entonces sumamente importante para entender el verdadero comportamiento de la obra. (Figura 5)

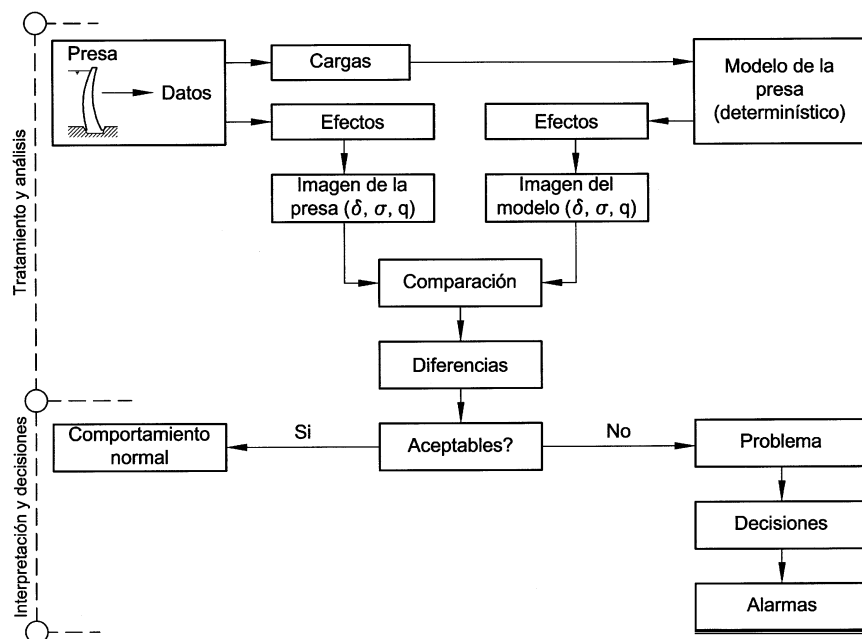


Figura 5: Estudio determinístico del comportamiento de la presa.

La representación de los residuos a escala suficiente es siempre muy útil.

Las franjas de tolerancia y los límites de alarma pueden ser variables en función de varios parámetros como temporada o nivel de embalse.

En la Figura 6 la variable de la franja de tolerancia experimental indica que el modelo de simulación no es perfecto ya que contiene una influencia de la temporada que podría ser eliminada con una pequeña corrección.

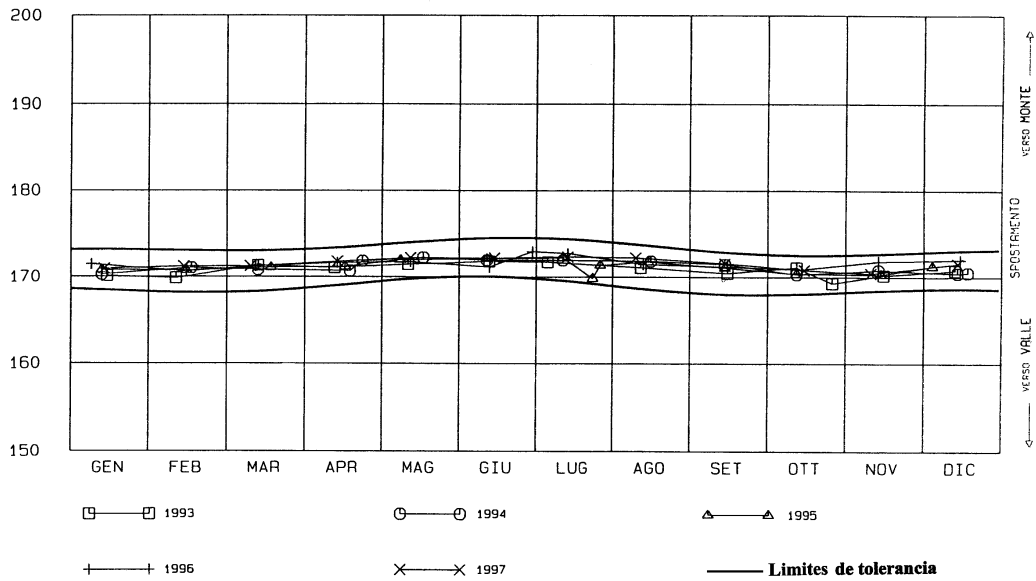


Figura 6: Presa de Roggiasca.
 Plomada radial L2 a cota 921.5 m s.n.m., años 1993-1997.
 Mediciones con corrección del efecto de temperatura y del embalse.

En ciertos casos se nota una estabilidad perfecta de la obra a lo largo de decenios y los residuos son sumamente reducidos.

En otros casos se pone por ejemplo en evidencia una expansión continua del concreto y se considera que se la puede aceptar por un cierto lapso de tiempo limitado.

Figura 7 indica las posibles definiciones de los límites en los casos mencionados.

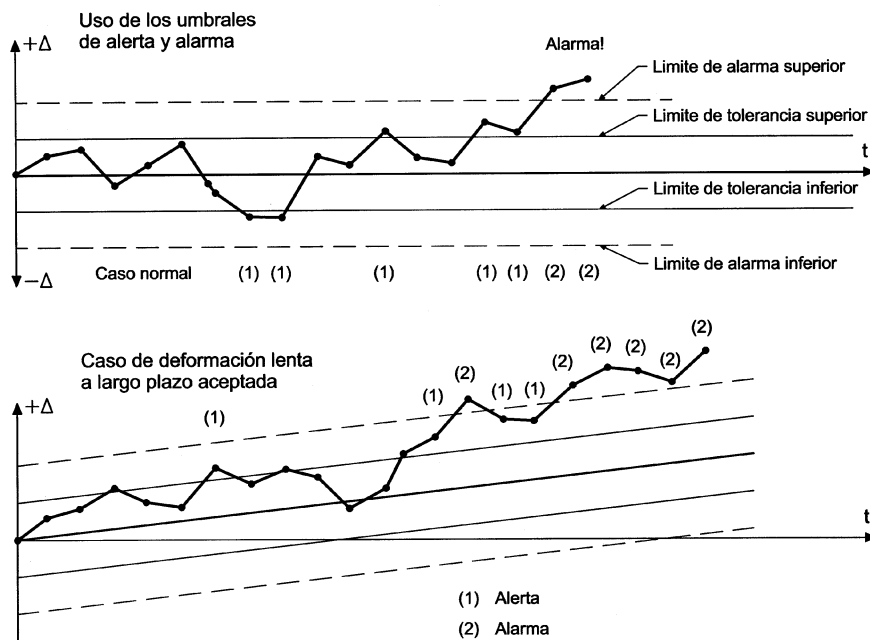


Figura 7: Representación de la franja de tolerancia.

7.6 Limites de la modelización

Claramente existen valores que no pueden ser modelizados, o que no se sabe como modelizar. Por ejemplo, al momento de diseñar una presa y de construirla no se puede indicar cual será el caudal de infiltración en tal o tal otro dren. Dicho caudal puede ser entonces modelizado solamente a posteriori utilizando métodos estadísticos.

Sin embargo una vez modelizado de esta manera, el valor de la variable puede ser introducido en el sistema de análisis como cualquier otro.

8. ERRORES DE INTERPRETACIÓN

En todas estas análisis se utilizan varios métodos matemáticos y programas de cálculos. Lamentablemente los que utilizan dichas herramientas no siempre entienden lo que hacen. Un ejemplo estupendo de mala interpretación se lo presenta a la Figura 8.

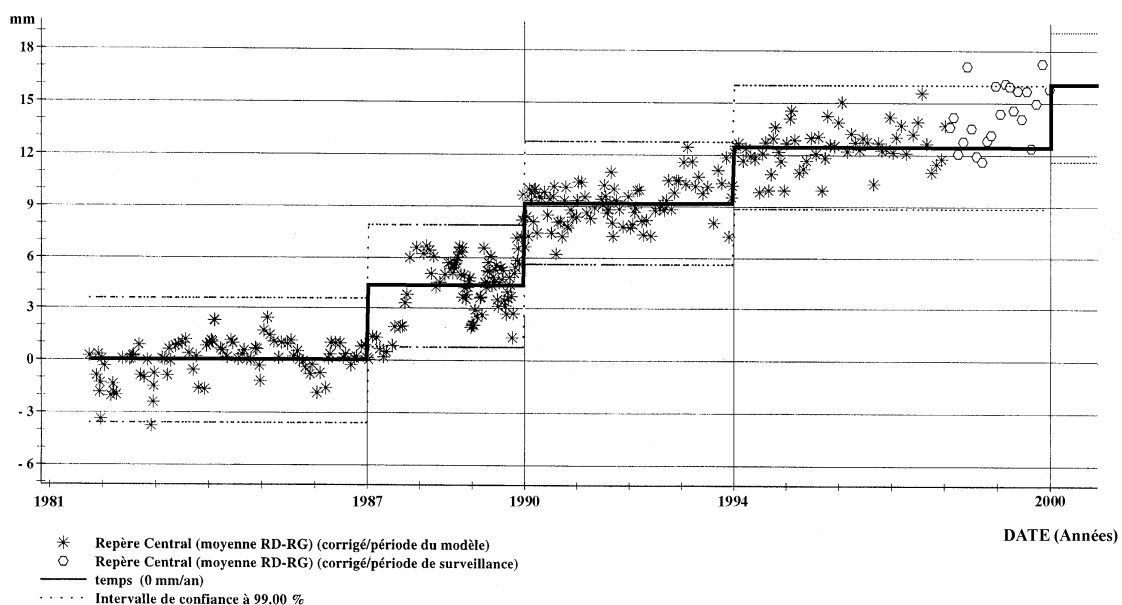


Figura 8: Deformación de una presa.
Interpretación por un modelo no adecuado.

Una presa de arcos múltiples indica una deformación no reversible hacia aguas abajo. El ingeniero encargado de la supervisión utilizando un modelo matemático

no adecuado llegó a descubrir "saltos" de la deformación hacia aguas abajo en los años 1987, 1990, 1994 y 2000.

Como consecuencia se iba tratando de encontrar deslizamientos de la obra sobre la cimentación o cualquier otro fenómeno que pudiese explicar los saltos "detectados" por el análisis.

Por fin se pudo convencerse que los saltos no existían realmente y que habían sido "inventados" por el método de interpretación utilizado que no era adecuado.

De hecho se trata en dicha presa de un fenómeno de reacción alcali-silicato que produce una deformación prácticamente lineal en el tiempo. La misma conclusión podría haber sido "descubierta" por lo menos diez años antes si un método correcto de interpretación hubiese sido utilizado.

9. TOMA DE DECISIÓN

¡El punto crítico es ahora de como utilizar todos los análisis desarrollados para tomar una decisión, y cual decisión!

Las acciones a tomar pueden ser de dos tipos:

- las acciones sencillas, y
- las acciones graves.

Las acciones sencillas pueden ser consideradas ser de competencia de los equipos de mantenimiento.

Se trata en primer lugar de corregir lecturas no precisas o errores, y de arreglar los instrumentos no confiables, por ejemplo, limpiar canaletas que pueden afectar la lectura de caudalímetros, reemplazar instrumentos viejos con otros más precisos y seguros, etc. En este último caso se trata de tomar las acciones oportunas para garantizar la continuidad de la serie de datos.

Es entonces útil que al sistema de interpretación indique con un primer límite de desviación - o umbral de tolerancia que es necesario y oportuno tomar dichas medidas sencillas.

Se trata de hecho de definir una primera franja, justamente de tolerancia, para los residuos de cada valor correspondiente a un instrumento detector. A sobrepasarla se dispara una señal de "alerta".

Una otra sería de límites más anchos se refiere a los umbrales de "alarma". En este caso se trata de un asunto más grave que puede necesitar decisiones hasta muy serias. Las decisiones de este tipo tienen que ser tomadas a un nivel ingenieril superior después de un cuidadoso examen de la situación. En particular se trata de poner en el balance las indicaciones de todos los instrumentos de toda la obra, así como las observaciones durante las inspecciones.

La pregunta inicial que se me hizo con relación al ancho de las franjas de tolerancia y de alarma es muy difícil de contestar de manera general de antemano.

La misma depende

- del valor normal o máximo de la variable considerada,
- de la precisión de las mediciones,
- de la "calidad" de los instrumentos,
- de la adecuadez del modelo interpretativo utilizado y de su precisión,
- de la naturaleza, cantidad y calidad de los datos históricos disponibles,
- del hecho si se trata de condiciones de carga ya experimentados o todavía no, así como
- de las consecuencias que cada desviación puede tener. (Siendo ciertos instrumentos más sensibles e importantes que otros.)

Debe entonces apuntarse que no todos los instrumentos - aún que sean del mismo tipo - pueden tener la misma franja, debido a que las condiciones varían mucho de uno a otro. Por ejemplo las deformaciones de una presa bóveda son más fáciles a modelizar en la parte baja que en la coronación. Este hecho es debido al efecto de la radiación solar sobre la coronación de la bóveda.

En casos muy favorable se llega a precisiones de muy pocos milímetros, (Figura 9) en otros puede tratarse de varias veces más.

Una buena regla es de empezar con franjas relativamente anchas y de estrecharlas según los resultados conseguidos y conforme a la experiencia de operación de la obra.

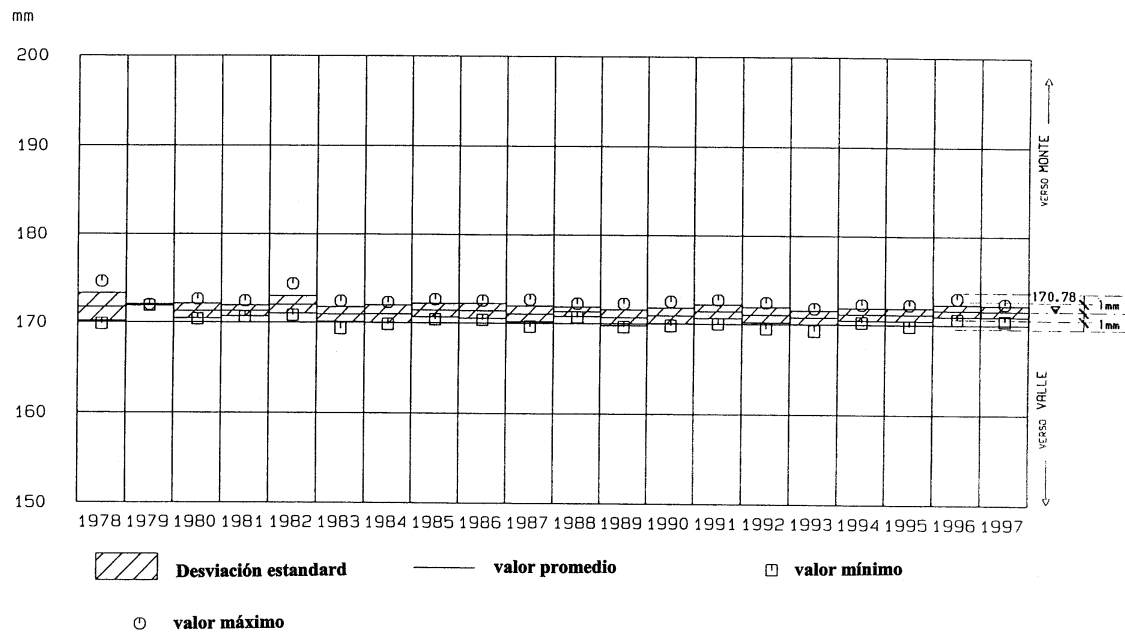


Figura 9: Presa de Roggiasca (Suiza).
Plomada radial L2 a cota 921.5 m s.n.m. años 1978-1997.
Evolución del residuo después de las correcciones por efecto de temperatura y embalse.

10. CONCLUSIONES

Por fin se pueden repetir las conclusiones ya presentadas hace dos años, es decir que: (Tabla XI)

- obviamente cada obra tiene sus particularidades que deben ser tomadas en consideración de manera adecuada;
- en mi opinión, el sistema de auscultación debe ser simple, robusto, confiable, fácil de lectura: el debe interesar la presa, su cimentación y el embalse;
- la auscultación debe ser combinada con inspecciones cuidadosas;
- la frecuencia de lectura debe ser razonable y adaptada a las condiciones reales de riesgo;
- la interpretación de las mediciones debe ser lo más inmediata posible; no es suficiente y sirve poco una simple representación de los valores medidos;
- es sumamente útil y ventajoso implementar una estrategia de auscultación del tipo: "instrumentos detectores" con el apoyo de "instrumentos auxiliares";
- la interpretación debe utilizar la estadística y la modelización, y por fin
- las decisiones deben ser rápidas y adecuadas.

TABLA XI

CONCLUSIONES

- ◆ Cada obra es particular (prototipo)
- ◆ Auscultación más inspecciones
- ◆ Auscultación:
 - sistema: simple y claro
 - instrumentos: sencillos, robustos, confiables y reemplazables
 - lectura: fácil y directa
 - frecuencia: adecuada a riesgo
- ◆ Representación y interpretación:
 - inmediata
 - criterios definidos de antemano
- ◆ Estrategia:
 - detectores y instrumentos de apoyo
 - estadística y modelación
- ◆ Toma de decisiones: rápidas y adecuadas

Obviamente todo lo antedicho son las "buenas intenciones" del auscultador de la presa. Lamentablemente ocurre que se deba tomar en cuenta condiciones particulares o preexistentes, obien que las antedichas ideas pueden en la realidad ser implementadas solo paso a paso con la paciencia necesaria.

En el ámbito de esta paciencia se encuentra también la definición de las franjas de alerta y de alarma.