



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
“MÁSTER UNIVERSITARIO EN MINERÍA SOSTENIBLE”



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
**MÁSTER UNIVERSITARIO EN MINERÍA SOSTENIBLE**  
TRABAJO FIN DE MÁSTER

“ESTUDIO DE LA METODOLOGÍA DE  
EVALUACIÓN DE RIESGOS MÁS EFICAZ  
PARA INSTALACIONES ABANDONADAS DE  
RESIDUOS MINEROS.”

AUTOR: Rocio SURICHAQUI DÍAZ

TUTOR:  
José Antonio Espí Rodríguez

CO-TUTOR:  
Julio César Arranz González

Madrid, Marzo del 2016



## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo va dirigido a todas las personas quienes me han apoyado durante el desarrollo de esta tesis de master.

Primeramente agradecer a José Antonio Espí y Julio Cesar Arranz, director y co-director de esta tesis respectivamente por todo su apoyo brindado durante la realización de este estudio.

A Roberto Rodríguez por su aportación y consejos para este trabajo

Mencionar nuevamente a José Antonio y Juana, quienes me brindaron todo su apoyo durante mi estadía en este país. Para ellos mis más profundos agradecimientos.

Mis gratitudes a mis padres Werner y Victoria, que a pesar de la distancia, siempre estuvieron pendiente de mí en todo momento.

A mis abuelos Clemente y Angélica, quienes siempre fueron como mis segundos padres.

A mi novio Antoine, por su apoyo incondicional.

Y a todos mis amigos con quienes compartí buenos momentos.



## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	2
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	10
RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES .....	14
2. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE EVALUACIÓN DE RIESGOS DE INSTALACIONES DE INDUSTRIAS EXTRACTIVAS CERRADAS O ABANDONADAS REALIZADA POR EL INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (IGME) .....	17
2.1. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO IGME.....	17
2.2. EJEMPLOS DE APLICACIÓN .....	33
3. METODOLOGÍA DEL ÁRBOL DE FALLOS O FAULT TREE ANALYSIS (FTA) .....	34
3.1. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO FTA.....	34
3.1.1. DEFINICIONES.....	35
3.1.2. REPRESENTACIÓN DEL ÁRBOL.....	36
3.1.3. IDENTIFICACIÓN DE LOS “TOP EVENTS” .....	37
3.1.4. COLOCACIÓN DE LOS CONTRIBUIDORES AL ÁRBOL DE FALLOS.....	38
3.1.5. ESTIMACIÓN DE LAS PROBABILIDADES .....	38
3.1.6. RESULTADOS DEL FTA .....	40
3.2. APLICACIÓN DEL FTA A LA GENERACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS EN MINERÍA .....	41
4. APLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS A UNA PRESA SELECCIONADA EN PERÚ (TICAPAMPA-ÁNCASH).....	42
4.1. JUSTIFICACIÓN .....	42
4.2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA A EVALUAR .....	42
4.2.1. UBICACIÓN .....	42
4.2.2. ORIGEN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICA .....	44
4.2.2.1. GEOLOGÍA .....	45
4.2.3. EDAFOLOGÍA .....	49
4.2.4. HIDROGRAFÍA E HIDROLOGÍA.....	51
4.3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGOS DEL IGME .....	53



4.3.1. Escenario de generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales: C1.....	53
4.3.1.1. Índice de Probabilidad de Ocurrencia de generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales $I_P$ (C1)	53
4.3.1.2. Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población derivados de la contaminación de las aguas superficiales por efluentes procedentes de los residuos mineros: $I_S$ (C1PO) ....	57
4.3.1.3. Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la contaminación de las aguas superficiales, por efluentes procedentes de los residuos mineros : $I_S$ (C1NA).....	59
4.3.1.4. Índice de Severidad de los efectos sobre el medio socioeconómico derivados de la contaminación de los recursos hídricos superficiales debido a efluentes contaminantes: $I_S$ (C1SE) .....	62
4.3.2. Escenario de generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas subterráneas: C2.....	62
4.3.2.1. Índice de Probabilidad de Ocurrencia de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos: $I_P$ (C2).....	62
4.3.3. Escenario de movilización de material particulado por acción del viento: C3 .....	63
4.3.3.1. Índice de Probabilidad de Ocurrencia de la movilización de material particulado por acción del viento: $I_P$ (C3) .....	63
4.3.3.2. Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población derivados de la movilización de material particulado por acción del viento: $I_S$ (C3PO).....	68
4.3.3.3. Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la movilización de material particulado por acción del viento $I_S$ (C3NA) .....	70
4.3.3.4. Índice de Severidad de los efectos sobre el medio socioeconómico derivados de la movilización de material particulado por acción del viento $I_S$ (C3SE) .....	71
4.3.4. Escenario de emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica : C4 .....	71
4.3.4.1. Índice de Probabilidad de Ocurrencia de emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica $I_P$ (C4).....	71
4.3.4.2. Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población derivados de la afección a suelos por emisión de sedimentos contaminantes procedentes de los residuos mineros: $I_S$ (C4PO).....	75



4.3.4.3.	Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la afección a suelos y aguas por emisión de sedimentos contaminantes procedentes de los residuos mineros: $I_S$ (C4NA).....	76
4.3.5.	Escenario de contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades: CD.....	76
4.3.5.1.	Índice de Probabilidad de Ocurrencia del contacto directo con efectos sobre las personas y la población de los residuos mineros: $I_P$ (CD).....	76
4.3.5.2.	Índice de Severidad del contacto directo con efectos sobre las personas y la población de los residuos mineros: $I_S$ (CD).....	78
4.3.6.	Escenario de fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros: FPRE.....	78
4.3.6.1.	Índice de Probabilidad del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros: $I_P$ (FPRE).....	78
4.3.6.2.	Índice de Severidad de los efectos sobre las personas y la población derivado del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros $I_S$ (FPREPO).....	84
4.3.6.3.	Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural derivado del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros $I_S$ (FPRENA).....	85
4.3.6.4.	Índice de Severidad de los efectos sobre el medio socioeconómico derivado del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros $I_S$ (FPRESE). ....	86
4.4.	VALORACIÓN DEL RIESGO CON EL MÉTODO DEL ÁRBOL DE FALLOS (FTA): .....	88
4.4.1.	ANTECEDENTES DE ROTURAS DE PRESAS DE RELAVES OCURRIDOS EN PERÚ.....	89
4.4.2.	DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y ALCANCE.....	90
4.4.3.	SELECCIÓN DEL SUCESO NO DESEADO O “SUCESO TOP” .....	90
4.4.4.	CONTRIBUIDORES PRIMARIOS AL “TOP EVENT” .....	91
4.4.4.1.	Avenidas extraordinaria sin aviso de peligro y con amplificación:..	91
4.4.4.2.	Licuefacción y derrumbe después de un sismo .....	97
4.4.5.	CONTRIBUIDORES SECUNDARIOS AL “TOP EVENT” .....	97
4.4.6.	SUCESOS BÁSICOS.....	98
4.4.7.	ESTIMACIÓN DE LAS PROBABILIDADES .....	107
4.4.8.	REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ÁRBOL DE FALLOS PARA EL CASO APLICADO.....	110
4.4.9.	DISCUSIÓN .....	111



5. CONCLUSIONES .....	116
6. BIBLIOGRAFIA.....	118
7. ANEXOS.....	122
ANEXO I. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGOS IGME A DOS PRESAS SELECCIONADAS EN ESPAÑA .....	122
ANEXO II. FICHAS DE EVALUACIÓN DE LAS PRESAS .....	153



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Escala general de valoración y calificación del Índice de Probabilidad.....	18
Tabla 2.2 Escala general de valoración y calificación del Índice de Severidad.....	22
Tabla 2.3 Valoración de los índices de Probabilidad y consecuencias para los escenarios C1PO, C1NA y C1SE.....	24
Tabla 2.4 Valoración de los índices de Probabilidad y consecuencias para los escenarios C2PO, C2NA y C2SE.....	25
Tabla 2.5 Valoración de los índices de Probabilidad y consecuencias para los escenarios C3PO, C3NA y C3SE.....	26
Tabla 2.6. Valoración de los índices de Probabilidad y consecuencias para los escenarios C4PO, C4NA y C4SE.....	27
Tabla 2.7 Valoración de los índices de Probabilidad y consecuencias para el escenario CD.....	28
Tabla 2.8 Valoración de los índices de Probabilidad y consecuencias para los escenarios FESCPO, FESCNA y FESCSE.....	29
Tabla 2.9 Valoración de los índices de Probabilidad y consecuencias para los escenarios FLIXPO, FLIXNA y FLIXSE.....	30
Tabla 2.10 Valoración de los índices de Probabilidad y consecuencias para los escenarios FPREPO, FPRENA y FPRESE.....	31
Tabla 2.11 Matriz para la valoración de las probabilidades y severidades del riesgo .....	32
Tabla 4.1 Datos de ensayos de lixiviación según método DIN 3814-S4 de muestra compuesta superficial en la presa de relaves de Ticapampa comparados con los niveles de contenidos en elementos según el estándar adoptado (expresados en µg/l) .....	57
Tabla 4.2 Valoraciones de los factores para determinar el Factor Superficie Desprotegida ( $F_{SD}$ ) para el escenario C1 asociado a la presa de relaves de Ticapampa.....	57
Tabla 4.3 Valores de los factores para hallar el Índice de Probabilidad de Ocurrencia de escenario C1 asociado a la presa de relaves de Ticapampa.....	57



Tabla 4.4 Especies de flora ribereñas amenazadas según el Decreto Supremo N° 043-2006-AG (Perú).....	60
Tabla 4.5 Valores de los factores del Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural escenario C1 asociado a la presa de relaves de Ticapampa.....	61
Tabla 4.6 Análisis granulométrico de la muestra compuesta de la presa de relaves Ticapampa.....	63
Tabla 4.7 Clasificación de zonas climáticas según el Índice de Aridez de Martonne.....	64
Tabla 4.8 Valores de los factores para hallar el Índice de Probabilidad de Ocurrencia de escenario C3 asociado a la presa de relaves de Ticapampa.....	67
Tabla 4.9 Valores de los factores para hallar el Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población del escenario C3 asociado a la presa de relaves de Ticapampa.....	69
Tabla 4.10 Valores de los factores para hallar el Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural población del escenario C3 asociado a la presa de relaves de Ticapampa.....	71
Tabla 4.11 Comparación de datos obtenidos por digestión con ácidos fuertes para metales pesados de una muestra compuesta en los sedimentos de la presa de relaves de Ticapampa y la media de los metales pesados en Ancash, utilizados como Nivel de Fondo de los suelos.....	74
Tabla 4.12 Valores de los factores para hallar el Índice de Ocurrencia del escenario C4 asociado a la presa de relaves de Ticapampa.....	75
Tabla 4.13 Valores de los contenidos en metales pesados de la presa de relaves Ticapampa tomados de Jara (2011) en comparación con el Estándar de Calidad Ambiental para usos del suelo Residencial/ parque D.S. N° 002-2013-MINAM (Peruana) que sirvió como los Niveles Genéricos de Referencia (NGR).....	76
Tabla 4.14 Valores de los factores para hallar el Índice de Probabilidad del escenario de contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades I <sub>P</sub> (CD) asociado a la presa de relaves de Ticapampa.....	78





Tabla 4.15 Criterios de valoración del Factor de diseño y características constructivas del dique (DC) para la presa de relaves Ticapampa.....	79
Tabla 4.16 Criterios de valoración del Factor Emplazamiento (EMP) para la presa de relaves Ticapampa.....	80
Tabla 4.17 Asignación de valores a los subfactores del Balance Hídrico (BH) relativos a la posición de la laguna de decantación, la posición del nivel freático en presas de residuos, entradas y salidas de agua sobre los residuos mineros para la presa de relaves Ticapampa.....	82
Tabla 4.18 Valores del Factor de Peligrosidad ante la rotura de $P_{ePRE}$ para la presa de relaves Ticapampa.....	83
Tabla 4.19 Criterios de valoración de la Vulnerabilidad del patrimonio cultural, sistema productivo, infraestructuras y servicios esenciales en la zona de riesgo por fallo de dique de contención o rotura del talud exterior de una presa de lodos.....	86
Tabla 4.20 Casos de rotura de presas de relaves ocurrida en Perú.....	89
Tabla 4.21 Precipitación Máxima en 24 Horas para Diferentes Periodos de Retorno (Fuente: Estación Chiquián).....	102
Tabla 4.22 Tabla para estimación de severidades de inundación según el metodología de Graham.....	109



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Matriz de riesgo propuesta por el IGME para la evaluación del riesgo y la calificación de los accidentes como graves o no graves en el ámbito de la Directiva 2006/21/CE .....	33
Figura 3.1. Símbolos lógicos utilizados en el Árbol de Fallos.....	37
Figura 3.2. Etapas de un Árbol de Fallos.....	37
Figura 3.3 Contribuidores de un Árbol de Fallos.....	38
Figura 3.4. Árbol de Fallos en la generación de aguas acidas de mina de la Faja Piríta Ibérica.....	41
Figura 4.1 Imagen satelital de la presa de relaves Ticapampa.....	43
Figura 4.2 Vista del margen derecho del depósito de relaves en Ticapampa...	44
Figura 4.3 Mapa geomorfológico y Estructural de Ticapampa y Recuay.....	49
Figura 4.4 Vista de la presa de relaves de Ticapampa junto al río Santa.....	52
Figura 4.5 Ubicación y distancia entre la presa de Relaves de Ticapampa y el río Santa.....	54
Figura 4.6 Gráfica que permite la asignación del Factor de Toxicidad ( $F_{TOX}$ ) en función del valor obtenido del cociente promedio de Peligrosidad ( $CPP_{LAB}$ ) para la presa de relaves de Ticapampa.....	56
Figura 4.7 Localización de las captaciones de agua para abastecimiento en Ticapampa y Recuay.....	59
Figura 4.8 La cuenca del río Santa y la Reserva de Biosfera Huascarán.....	61
Figura 4.9 Gráfica que permite asignar el valor del Factor de Aridez ( $F_{AR}$ ) en función de los datos obtenidos para Índice de Aridez de Martonne ( $I_a$ ) para la presa de relaves de Ticapampa.....	65
Figura 4.10 Ubicación aproximada de la presa de relaves Ticapampa según el Atlas Eólico Nacional desarrollado por el Ministerio de Energía y Minas con viento medio anual a una altura de 50 m.....	66
Figura 4.11 Gráfica que permite asignar valores del Factor del Viento ( $V_V$ ) en función de la Velocidad media ( $V_m$ ) en una estación cercana de Ticapampa.....	67



Figura 4.12 Guía para la valoración del Factor población expuesta ( $P_{EX}$ ) en un radio de 1km en torno a la presa de relaves Ticapampa.....	69
Figura 4.13 Erosión muy notable en el pie del talud del depósito de relaves de Ticapampa junto al río Santa.....	74
Figura 4.14 Valoración del Índice de Probabilidad de Ocurrencia $I_P$ (FPRE) en función de la Peligrosidad ( $P_{PRE}$ ) para la presa de relaves Ticapampa.....	84
Figura 4.15 Matriz de riesgos de valoración de la presa de relaves de Ticapampa.....	88
Figura 4.16 Esquema general del caso Ticapampa para la construcción del Árbol de Fallos.....	91
Figura 4.17 Sección aproximada del río Santa en un punto cercano a Ticapampa.....	94
Figura 4.18 Sección aproximada del río Chaupis en un punto cercano a Ticapampa.....	96
Figura 4.19 Estudio sísmico elaborado por EMV (2011).....	101
Figura 4.20 Precipitación Máxima en 24 Horas en mm, para diferentes Periodos de Retorno: Estación Chiquián.....	103
Figura 4.21 Representación del sistema ALARP sobre la aceptación de sucesos no deseados.....	111
Figura 4.22 Representación de la aceptación de un suceso no deseado para el caso analizado en la presa de relaves de Ticapampa.....	115



## RESUMEN

El análisis de riesgos es una técnica para identificar, caracterizar, cuantificar y evaluar peligros; el análisis de riesgos presenta dos fases distintas: una cualitativa de identificación, caracterización y ordenamiento, y otra cuantitativa que incluye tanto a la valoración de la probabilidad y severidad como a las consecuencias de la ocurrencia del peligro. También es una herramienta muy importante a la hora de tomar decisiones, ya que permite integrar toda la información referente a los escenarios más representativos.

En la actualidad cada vez más se toma en cuenta la “sostenibilidad” de los entornos ecológicos y sociales en los que existió una actividad minera (particularmente en el cierre de minas). Esto nos ayuda a buscar un método de valoración más fácil de entender y aplicar a fin de evaluar los riesgos que se puedan presentar después de un cierre de la actividad minera, tal como sucede en las instalaciones de antiguos residuos mineros

El objetivo principal de esta tesis es buscar la metodología más adecuada para el Análisis y Valoración de Riesgos aplicado a ejemplos característicos de la industria mineral de España y Perú. Por ello se eligen los distintos problemas que aparecen en el mantenimiento de acumulaciones de residuos referidos a la minería abandonada. Como esto no es suficiente para ejemplarizar el proceso, se introducen escenarios que afectan a la supervivencia de esas estructuras de residuos causando daños al medio social y ambiental.



## ABSTRACT

The “risk analysis” is a technique to identify, characterize, quantify and assess hazards. Generally, the risk analysis has two phases: a qualitative phase of identification, characterization and management and other quantitative phase including the probability assessment and its severity consequences.

The term of “sustainability” in ecological and social environments is related with the mining activity (in the mine closure) and frequently today is taken into account. The “risk analysis” method helps us to find a valuation method easier to understand and apply in order to assess the risks that may arise after the mining closure.

This work aims to find the most appropriate methodology for Analysis and Risk Assessment. Additionally this methodology is applied to mineral industry examples in both Spain and Peru. In this case is chosen several problems involved with maintenance tailings accumulations. As this is not enough to exemplify the process, some scenarios that affect the survival of tailings accumulations and their relation with social and environmental damage are introduced. Finally consequences on the methodology and its application advantages are defined.



## 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Como consecuencia de actividad minera y de los procesos industriales asociados al beneficio y transformación, existe un enorme legado de minas e instalaciones en estado de abandono, sin que muchas de ellas se hayan sometido a un proceso adecuado de cierre o rehabilitación, lo que da lugar a escenarios de riesgo para la seguridad y salud de las personas, así como para el medio ambiente y las actividades económicas situadas en el entorno. En Iberoamérica son conocidos como “pasivos ambientales mineros” (PAM), expresión que no se usa generalmente en España, salvo por profesionales que han establecido contacto con la realidad iberoamericana. Los PAM son aquellos elementos, tales como instalaciones, edificaciones, superficies afectadas por vertidos, depósitos de residuos mineros, tramos de cauces perturbados, áreas de talleres, parques de maquinaria o parques de mineral que, estando en la actualidad en entornos de minas abandonadas o paralizadas, constituyen un riesgo potencial permanente para la salud y seguridad de la población, para la biodiversidad y para el medio ambiente (ASGMI, 2009).

La existencia de pasivos ambientales mineros afecta a numerosos lugares de Iberoamérica y de la Península Ibérica: entorno de Río Tinto, Sierra Minera de Cartagena, Cordillera del Cóndor, Cerro Rico de Potosí, Río Pilcomayo, área de Zaruma-Portobelo, cuenca alta del Río Santa, etc. Toneladas de metales pesados son arrojadas a los ríos y lagos desde las viejas instalaciones de residuos. El polvo fugitivo amenaza la salud de poblaciones enteras. La posibilidad de rotura de grandes presas de lodos o relaves representa un peligro real para demasiadas personas y recursos. Además, la diferencia fundamental entre la minería activa y la minería abandonada es que la asignación de responsabilidades no está clara muchas veces. De hecho, uno de los principales escollos para resolver la problemática que supone la minería abandonada es la asignación de responsabilidades, o la definición de fórmulas para el reparto de las mismas entre propietarios de los terrenos, organismos de la administración, grupos empresariales, antiguos beneficiarios, etc. (Arranz González y Alberruche del Campo, 2008).



La problemática de la minería abandonada, en países con una importante minería histórica, ha obligado al desarrollo de políticas y actuaciones públicas encaminadas a conocer y controlar el riesgo que representan. En Europa han existido diversas iniciativas relacionadas con la elaboración de inventarios de sitios mineros abandonados, aplicando metodologías de análisis de riesgos con el objeto de establecer una jerarquización de estos pasivos basada en la amenaza que representan para la población y el medio ambiente. Sin embargo, la más destacable de todas las iniciativas, planteada para obligar a todos los estados miembros de la Unión Europea, es la Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de marzo de 2006, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas. En ella se establece que los Estados miembros deben confeccionar y actualizar periódicamente un inventario de las instalaciones de residuos cerradas, incluidas las instalaciones de residuos abandonadas situadas en su territorio, que tuvieran un impacto medioambiental grave o que pudieran convertirse, a medio o corto plazo, en una amenaza grave para la salud de las personas o para el medio ambiente.

Las metodologías para la realización de inventarios y para la evaluación preliminar de riesgos de las instalaciones de residuos cerradas o abandonadas han sido desarrolladas por el IGME entre los años 2010 y 2014 (Alberruche del Campo et al., 2014). En paralelo a estas actividades, y empleando las citadas metodologías, el IGME ha venido desarrollando trabajos de inventario y evaluación de riesgos de instalaciones de residuos mineros cerradas para la Dirección General de Política Energética y Minas (MICYT). La metodología de evaluación de riesgos elaborada puede considerarse un sistema de evaluación del riesgo simplificada (ERS) o de análisis preliminar del riesgo de instalaciones de residuos mineros.

Perú cuenta con una normativa específica que regula la gestión de pasivos mineros, a través de la Ley No. 28271, de fecha 02 de julio de 2004, modificada por la Ley No. 28526 de fecha 25 de mayo de 2005, y la Ley No. 242 de fecha 26 de junio de 2008; y el Reglamento No. 059-2005-EM de fecha 07 de julio de 2005, modificado por el No. 003-2009-EM de fecha 14 de enero de 2009. La normativa define a los PAMs como aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras



abandonados o inactivos, y que constituyen un riesgo permanente o potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad. Mediante la promulgación de estas normas, se da cuenta de la necesidad de inventariar, priorizar e intervenir para la remediación de áreas afectadas por pasivos ambientales mineros, de forma gradual, en función de los niveles de riesgo que representen, priorizándose la atención de las que generen mayor riesgo sobre la salud y seguridad de las personas y la calidad del ambiente. En esencia, por tanto, la normativa peruana persigue objetivos semejantes a la normativa europea.





## **2. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE EVALUACIÓN DE RIESGOS DE INSTALACIONES DE INDUSTRIAS EXTRACTIVAS CERRADAS O ABANDONADAS REALIZADA POR EL INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (IGME)**

### **2.1. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO IGME**

La metodología desarrollada por el IGME plantea en primer lugar la identificación ocho escenarios de riesgos, en función a las posibles consecuencias, tal como se menciona a continuación:

- a) Escenario de generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales (C1)
- b) Escenario de generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas subterráneas (C2 )
- c) Escenario de movilización de material particulado por acción del viento (C3)
- d) Escenario de emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica (C4)
- e) Escenario de contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades (CD)
- f) Escenario de fallo o rotura del talud de escombreras de desmonte, estériles o minerales de baja ley (FESC)
- g) Escenario de fallo o rotura del talud de pilas de residuos de lixiviación (FLIX)
- h) Escenario de fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros (FPRE)

La evaluación de la Probabilidad de Ocurrencia de los escenarios de riesgo se realiza a través de lo que han denominado índices de Probabilidad ( $I_P$ ) para cada caso, cuya escala propuesta es:



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
“MÁSTER UNIVERSITARIO EN MINERÍA SOSTENIBLE”

CALIFICACIÓN	VALOR DEL ÍNDICE DE PROBABILIDAD ( $I_p$ )
MUY ALTO	$\geq 4$
ALTO	$\geq 3$ y $< 4$
MEDIO	$\geq 2$ y $< 3$
BAJO	$\geq 1$ y $< 2$
MUY BAJO	$\geq 0$ y $< 1$

**Tabla 2.1.** Escala general de valoración y calificación del Índice de Probabilidad (Alberruche et al., 2014)

Los factores de Probabilidad para cada escenario son:

- Factor de Proximidad ( $P_R$ ): Factor que determina la posible afección a las aguas superficiales en función de la distancia entre el punto de contacto de la instalación de residuos mineros con el terreno natural situado a menor cota hasta el cauce o zona húmeda considerada.
- Factor de Toxicidad ( $F_{TOX}$ ): Indicador de la toxicidad de los residuos en base a ensayos de lixiviación en laboratorio, ensayos in situ o medidas de conductividad y pH.
- Factor de Superficie ( $F_S$ ): Factor función de la superficie de depósito Total expuesta a la meteorización e infiltración de agua de lluvia, medida su proyección en planta en el caso de los escenarios C1 y C2 y medida su dimensión real en los escenarios C3.
- Superficie Cubierta ( $S_C$ ): Superficie del depósito en la que los residuos se encuentran cubiertos por otros materiales y por tanto presentan cierta protección frente a la erosión y la infiltración de aguas de lluvia.
- Superficie Total del Depósito ( $S_{PL}$ ): Superficie Total del Depósito.
- Material de Cobertura ( $M_C$ ): Valor indicativo de la protección que ofrece el tipo de cobertura existente sobre la superficie de la instalación de residuos.
- Valor de Vegetación ( $V_C$ ): Valor indicativo de la protección que ofrece el tipo de vegetación existente sobre la superficie de la instalación de residuos.
- Factor de Vulnerabilidad ( $F_V$ ): Factor indicativo de la Vulnerabilidad de las aguas subterráneas en función de las clasificaciones DRASTIC y COP obtenibles en los mapas de Vulnerabilidad intrínseca de las masas



de agua subterránea elaborados por la Dirección General del Agua (DGA) y el IGME.

- Factor de Erodibilidad Eólica ( $E_e$ ): Factor que determina la susceptibilidad de la instalación a la erosión eólica en función de su contenido en partículas inferiores a 75  $\mu\text{m}$ .
- Factor de Aridez ( $F_{AR}$ ): Factor representativo de la resistencia a la erosión del residuo debido a su humedad, calculado en función del Índice de Aridez de Martonne  $I_a = P / (T+10)$ , siendo P la precipitación media anual en mm y T la temperatura media anual en  $^{\circ}\text{C}$ .
- Factor de Velocidad del Viento ( $V_V$ ): Factor indicativo del potencial Erosivo del viento en función de la velocidad media anual del viento en m/s.
- Factor de Desprotección ( $F_{DS}$ ): Factor representativo de la desprotección de los residuos frente a la erosión eólica en función de la existencia de cobertura vegetal, del grado de encostramiento de los residuos y de los tratamientos antierosivos existentes en la instalación.
- Estado Erosivo ( $E_e$ ): Valor indicativo de la probabilidad de emisión de sedimentos en función de las evidencias de erosión perceptibles (cárcavas, regueros, desprendimientos, etc.).
- Factor de Superficie de Taludes ( $F_{ST}$ ): Factor indicativo del potencial de emisión de sedimentos de la instalación en función de la superficie real total de sus taludes.
- Factor VM: Valor indicativo del potencial de erosión del depósito en función de la granulometría de los materiales, de la vegetación y del grado de cobertura de sus taludes.
- Factor de Contaminación ( $F_{CO}$ ): Factor indicativo del potencial contaminante de los sedimentos movilizados por erosión hídrica de la instalación en función del Índice de Contaminación (IC), obtenido mediante el sumatorio de las fracciones formadas por las concentraciones de los contaminantes medidas en los residuos con respecto a sus niveles de fondo en los suelos del entorno.
- Factor de Concentración de Contacto Directo ( $F_{CCD}$ ): Factor indicativo de la toxicidad de los residuos frente al contacto directo en función del



grado de superación que presenten sobre el nivel genérico de referencia (NGR) de ciertos contaminantes (As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb y Sb).

- Factor de Accesibilidad ( $F_{ACC}$ ): Valor indicativo de la facilidad de acceso a la instalación de residuos por parte de las personas.
- Factor de Proximidad a áreas residenciales (PRR): Factor indicativo de la proximidad de la instalación de residuos a áreas residenciales.
- Valor de Peligrosidad ( $Pe_{ESC}$ ): Valor indicativo de la susceptibilidad de Ocurrencia de una posible rotura en la instalación de residuos mineros. Se calcula en función de diversos parámetros según se trate de una escombrera, una pila de lixiviación o una presa de estériles.

Cada Índice de Severidad ( $I_S$ ) es considerada según tres tipos de receptores (personas o población, medio natural y medio socioeconómico), que se dan en los siguientes escenarios:

- ✓ Efectos sobre las personas o la población derivados de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales (C1PO).
- ✓ Efectos sobre el medio natural derivados de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales (C1NA).
- ✓ Efectos sobre las personas o la población derivados de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos (C2PO).
- ✓ Efectos sobre el medio natural derivados de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos (C2NA).
- ✓ Efectos sobre las personas o la población derivados de la movilización de material particulado por acción del viento (C3PO).
- ✓ Efectos sobre el medio natural derivados de la movilización de material particulado por acción del viento (C3NA).
- ✓ Efectos sobre las personas o la población derivados de la emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica (C4PO).



- ✓ Efectos sobre el medio natural derivados de la emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica (C4NA).
- ✓ Efectos sobre las personas o la población derivados del contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades (CD).
- ✓ Efectos sobre las personas o la población derivados del fallo o rotura del talud de una escombrera de desmontes, estériles o minerales de baja ley (FESCPO).
- ✓ Efectos sobre el medio natural derivados del fallo o rotura del talud de una escombrera de desmontes, estériles o minerales de baja ley (FESCNA).
- ✓ Efectos sobre el medio socioeconómico derivados del fallo o rotura del talud de una escombrera de desmontes, estériles o minerales de baja ley (FESCSE).
- ✓ Efectos sobre las personas o la población derivados del fallo o rotura del talud de pilas de residuos de lixiviación (FLIXPO).
- ✓ Efectos sobre el medio natural derivados del fallo o rotura del talud de pilas de residuos de lixiviación (FLIXNA).
- ✓ Efectos sobre el medio socioeconómico derivados del fallo o rotura del talud de pilas de residuos de lixiviación (FLIXSE).
- ✓ Efectos sobre las personas o la población derivados del fallo o rotura del dique de contención o del talud exterior de presas de lodos (FPREPO).
- ✓ Efectos sobre el medio natural derivados del fallo o rotura del dique de contención o del talud exterior de presas de lodos (FPRENA).
- ✓ Efectos sobre el medio socioeconómico derivados del fallo o rotura del dique de contención o del talud exterior de presas de lodos (FPRESE).

Los índices de Severidad también son evaluados a una escala de cero a cinco, como se muestra en la tabla siguiente:



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
“MÁSTER UNIVERSITARIO EN MINERÍA SOSTENIBLE”

CALIFICACIÓN	VALOR DEL ÍNDICE DE SEVERIDAD ( $I_s$ )
MUY ALTO	$\geq 4$
ALTO	$\geq 3$ y $< 4$
MEDIO	$\geq 2$ y $< 3$
BAJO	$\geq 1$ y $< 2$
MUY BAJO	$\geq 0$ y $< 1$

**Tabla 2.2** Escala general de valoración y calificación del Índice de Severidad (Alberruche *et al.*, 2014)

Para el cálculo de cada Índice de Severidad de las consecuencias consideran los siguientes factores:

- Factor de Población Expuesta ( $P_{EX}$ ): Factor indicativo del número de personas expuestas a contaminación por afección a las aguas superficiales o subterráneas. Se obtiene en función de los abastecimientos existentes sobre las aguas con riesgo de afección en los escenarios C1PO, C2PO y C4PO, en función del número de habitantes de las poblaciones existentes en un radio de 1 km del depósito en el escenario C3PO y en función de las poblaciones existentes en un radio igual a la distancia máxima de recorrido del material deslizado en los escenarios FESCPO, FLIXPO y FPREPO. En caso de no existir poblaciones cercanas dicho factor puede obtenerse en función del uso del suelo en los escenarios FESCPO, FLIXPO y FPREPO.
- Factor de Exposición de la Población ( $F_{SUP}$ ): Factor indicativo de la exposición de las personas en función de la distancia entre la instalación de residuos mineros y el valor a proteger. Como valores a proteger se consideran los abastecimientos de aguas superficiales existentes en el caso de los escenarios C1PO y C4PO y los ecosistemas protegidos en el caso de los escenarios C1NA y C4NA.
- Factor de la Vulnerabilidad de la Población ( $V_P$ ): Factor de Vulnerabilidad de la población en función del tipo de abastecimiento existente sobre las aguas superficiales o subterráneas afectadas en los escenarios C1PO, C2PO y C4PO, y en función de los usos del suelo en el caso de los escenario C3PO.



- Factor de Vulnerabilidad de los Ecosistemas ( $V_E$ ): Valor indicativo de la vulnerabilidad de los ecosistemas en función de su tipología (áreas sensibles objeto de protección, humedales, masas de agua, vegetación, etc.) y de su estado ecológico.
- Factor de Exposición de la Población ( $F_{SUB}$ ): Factor de exposición obtenido en función de la distancia entre el depósito de residuos y el valor a proteger. Los valores a proteger considerados son los abastecimientos de aguas subterráneas existentes, en el caso de afección a la población, y los ecosistemas protegidos, en el caso del medio natural.
- Factor de Exposición al Material Particulado ( $F_{PM}$ ): Factor indicativo de la exposición al material particulado en función de la distancia entre el depósito de residuos y las poblaciones próximas o los ecosistemas.
- Factor de Contaminación ( $F_{CO}$ ): Factor indicativo del potencial contaminante de los sedimentos movilizados por erosión hídrica. Se obtiene en función del Índice de Contaminación (IC), calculado mediante el sumatorio de las fracciones formadas por las concentraciones de los contaminantes medidas en los residuos con respecto a sus niveles de fondo en los suelos del entorno.
- Índice de Severidad de los efectos sobre las personas del contacto directo  $I_S$  (CD): Índice indicativo de la Severidad de las consecuencias ocasionadas como consecuencia del contacto directo de las personas con los residuos. Se obtiene en función del tipo de usos permitidos en la instalación de residuos.
- Vulnerabilidad del Medio Socioeconómico ( $V_{SE}$ ): Factor indicativo de la gravedad de las consecuencias sobre el medio socioeconómico del entorno. Se obtiene en función de la existencia de patrimonio cultural, actividades económicas, infraestructuras o servicios.

A modo de síntesis se resumió, a partir del método de valoración de riesgos del IGME y la idea de Vicente (2015), en una tabla cada uno de los ocho escenarios, las probabilidades de Ocurrencia y la Severidad de las consecuencias con efectos sobre la población, el medio natural y el medio socioeconómico. Las tablas se muestran a continuación:



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 “MÁSTER UNIVERSITARIO EN MINERÍA SOSTENIBLE”

Escenario	Factores de Probabilidad		Probabilidad	Factores de Severidad		Severidad	
	Factor	Rango		Factor	Rango		
C1	Factor de Proximidad ( $P_R$ )		$I_p(\mathbf{C1}) = P_R \cdot F_{TOX} \cdot [F_S \cdot (1 - ((M_C + M_V) \cdot S_C / S_{PL}))]$	Factor de Población Expuesta ( $P_{EX}$ )	0-5	$I_s(\mathbf{C1PO}) = 0,5 \cdot P_{EX} + 0,5 \cdot (F_{SUP} \cdot V_P)$	
	Factor de Toxicidad ( $F_{TOX}$ )			0-5	Factor de Exposición de la población ( $F_{SUP}$ )		0-1
	Factor de Superficie Desprotegida ( $F_{SD}$ )	Factor Superficial ( $F_S$ )		0-1	Factor de Vulnerabilidad de la población ( $V_P$ )		1-5
		Relación Superficie Cubierta y Total (SC/SPL)		0-1			
		Material de Cobertura ( $M_C$ )		0,2-0,7	Factor de Exposición de los Ecosistemas ( $F_{SUP}$ )	0-1	$I_s(\mathbf{C1NA}) = F_{SUP} \cdot V_E$
		Valor de Vegetación ( $V_C$ )		0-0,3	Factor de Vulnerabilidad de los Ecosistemas ( $V_E$ )	1-5	
				$I_s(\mathbf{C1SE})$ : El grado de impacto sobre los elementos del medio socioeconómico va a depender de la estructura socioeconómica local y el grado de la Vulnerabilidad de los distintos sectores de actividad, y elementos patrimoniales que pudieran ser afectados.			

**Tabla 2.3** Valoración de los índices de Probabilidad y consecuencias para los escenarios C1PO, C1NA y C1SE.





UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 “MÁSTER UNIVERSITARIO EN MINERÍA SOSTENIBLE”



Escenario	Factores de Probabilidad		Probabilidad	Factores de Severidad		Severidad	
	Factor	Rango		Factor	Rango		
C2	Factor de Vulnerabilidad (F <sub>V</sub> )		$I_p(C2) = F_V \cdot F_{TOX} \cdot [F_S \cdot (1 - ((M_C + M_V) \cdot S_C / S_{PL}))]$	Factor de población expuesta (P <sub>EX</sub> )		$I_s(C2PO) = 0,5 \cdot P_{EX} + 0,5 \cdot (F_{SUB} \cdot V_P)$	
	Factor de Toxicidad (F <sub>TOX</sub> )			Factor de Exposición de la población (F <sub>SUB</sub> )			
	Factor Superficial (F <sub>S</sub> )			Factor de Vulnerabilidad (V <sub>P</sub> )			
	Factor de Superficie Desprotegida (F <sub>SD</sub> )	Relación Superficie Cubierta y Total (SC/SPL)		Factor de Exposición de los Ecosistemas (F <sub>SUB</sub> )		$I_s(C2NA) = F_{SUB} \cdot V_E$	
		Material de Cobertura (M <sub>C</sub> )		Factor de Vulnerabilidad de los Ecosistemas (V <sub>E</sub> )			
		Valor de Vegetación (V <sub>C</sub> )					
			$I_s(C2SE)$ : El grado de impacto sobre los elementos del medio socioeconómico va a depender de la estructura socioeconómica local y el grado de la Vulnerabilidad de los distintos sectores de actividad, y elementos patrimoniales que pudieran ser afectados.				

Tabla 2.4 Valoración de los índices de Probabilidad y consecuencias para los escenarios C2PO, C2NA y C2SE.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 “MÁSTER UNIVERSITARIO EN MINERÍA SOSTENIBLE”



Escenario	Factores de Probabilidad		Probabilidad	Factores de Severidad		Severidad
	Factor	Rango		Factor	Rango	
C3	Factor de Erodibilidad Eólica (Ee)	0-5	$I_p(C3) = E_e \cdot F_{AR} \cdot V_v \cdot F_s \cdot F_{DS}$	Factor de Exposición al material particulado (F <sub>PM</sub> )	0-1	$I_s(C3PO) = [0,5 \cdot P_{EX} + 0,5 \cdot (V_p \cdot F_{MP})] \cdot (1 + F_{CO}/100)$
	Factor de Aridez (F <sub>AR</sub> )	0-1		Factor de población expuesta (P <sub>EX</sub> )	0-5	
	Factor de Velocidad del Viento (V <sub>v</sub> )	0-1		Factor de Vulnerabilidad de la población (V <sub>p</sub> )	1-5	
	Factor Superficial (F <sub>s</sub> )	0-1		Factor de Polución (F <sub>CO</sub> )	0-5	
	Factor de Desprotección (F <sub>DS</sub> )	0-1		Factor de Vulnerabilidad de los Ecosistemas (V <sub>E</sub> )	1-5	$I_s(C3NA) = (V_E \cdot F_{PM}) \cdot (1 + F_{CO}/100)$
				Factor de Exposición (F <sub>PM</sub> )	0-1	
					$I_s(C3SE)$ : El grado de impacto sobre los elementos del medio socioeconómico va a depender de la estructura socioeconómica local y el grado de la Vulnerabilidad de los distintos sectores de actividad, y elementos patrimoniales que pudieran ser afectados.	

Tabla 2.5 Valoración de los índices de Probabilidad y consecuencias para los escenarios C3PO, C3NA y C3SE.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 “MÁSTER UNIVERSITARIO EN MINERÍA SOSTENIBLE”



Escenario	Factores de Probabilidad		Probabilidad	Factores de Severidad		Severidad	
	Factor	Rango		Factor	Rango		
C4	Estado Erosivo (E <sub>E</sub> )	0-1	$I_p(C4) = EE \cdot FER \cdot FST \cdot VM \cdot FCO$	Población expuesta (P <sub>EX</sub> )	0-5	$I_s(C4PO) = 0,5 \cdot P_{EX} + 0,5 \cdot (F_{SUP} \cdot V_P)$	
	Factor de erosividad (F <sub>ER</sub> )	0,8-1		Factor de Exposición para la población (F <sub>SUP</sub> )	0-1		
	Factor de Superficie de taludes (F <sub>ST</sub> )	0-1		Factor de Vulnerabilidad de la población (V <sub>P</sub> )	1-5		
	Factor VM	0,05-1		Factor de Vulnerabilidad de los Ecosistemas (V <sub>E</sub> )	1-5	$I_s(C4NA) = FSUP \cdot VE$	
	Factor de Contaminación (F <sub>CO</sub> )	0-5		Factor de Exposición para los Ecosistemas (F <sub>SUP</sub> )	0-1		
					<p><b>I<sub>s</sub> (C4SE):</b> El grado de impacto sobre los elementos del medio socioeconómico va a depender de la estructura socioeconómica local y el grado de la Vulnerabilidad de los distintos sectores de actividad, y elementos patrimoniales que pudieran ser afectados.</p>		

**Tabla 2.6.** Valoración de los índices de Probabilidad y consecuencias para los escenarios C4PO, C4NA y C4SE.



Escenario	Factores de Probabilidad		Probabilidad	Severidad	
	Factor	Rango		Índice	Rango
CD	Factor de concentración de contacto directo ( $F_{CCD}$ )	0 o 5	$IP(CD) = F_{CCD} \cdot F_{ACC} \cdot P_{RR}$	$I_s(CD)$	1-5
	Factor de accesibilidad ( $F_{ACC}$ )	0-1			
	Factor de proximidad a áreas residenciales ( $P_{RR}$ )	0-1			

**Tabla 2.7** Valoración de los índices de Probabilidad y consecuencias para el escenario CD.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 “MÁSTER UNIVERSITARIO EN MINERÍA SOSTENIBLE”



Escenario	Factores de Probabilidad		Probabilidad	Factores de Severidad		Severidad				
	Factor	Rango		Factor	Rango					
FESC	Valor de Peligrosidad ( $P_{ESC}$ )	Inclinación de talud ( $\theta_t$ )	0-6	$P_{ESC} = \theta_t + H + Ver + Cal + Dr + \theta_c + Sus + Ins + Car + P + P_{24} + Per + Aq + a_b$ $I_p = P_{ESC} / 10 \text{ para } 0 < P_{ESC} < 50 \quad I_p = 5 \text{ para } P_{ESC} > 50$	Población expuesta según número de habitantes ( $P_{EX}$ )	3-5	$I_s (FESCPO) = P_{EX}$			
		Altura de escombrera (H)	0-6		Población expuesta según uso del suelo ( $P_{EX}$ )	1-5				
		Sistema de vertido (Ver)	0-3							
		Calidad del material de la escombrera (Cal)	0-4							
		Sistema de drenaje de la escombrera (Dr)	0-3							
		Pendiente del material de cimentación ( $\theta_c$ )	0-6							
		Material de sustrato o cimentación (Sus)	0-4			Vulnerabilidad ecológica ( $V_E$ )	1-5	$I_s (FESCNA) = V_E$		
		Evidencias de inestabilidad (Ins)	0-4							
		Carcavas de erosión (Car)	0-3							
		Precipitación media anual (P)	0-4							
		Precipitación máxima en 24 h ( $P_{24}$ )	0-4							
		Sistema de desvío perimetral de aguas de lluvia (Per)	0-3		Vulnerabilidad del Medio socioeconómico ( $V_{SE}$ )				1-5	$I_s (FESCSE) = V_{SE}$
		Evidencia de agua dentro de la estructura (Aq)	0-6							
Aceleración sísmica básica ( $a_b$ )	0-5									

**Tabla 2.8** Valoración de los índices de Probabilidad y consecuencias para los escenarios FESCPO, FESCNA y FESCSE.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 “MÁSTER UNIVERSITARIO EN MINERÍA SOSTENIBLE”



Escenario	Factores de Probabilidad		Probabilidad	Factores de Severidad		Severidad	
	Factor	Rango		Factor	Rango		
FLIX	Valor de Peligrosidad (Pe <sub>LIX</sub> )	Inclinación de talud (θ <sub>t</sub> )	0-6	$Pe_{LIX} = \theta_t + H + Gra + \theta_s + Geo + Ins + Car + P + P_{24} + Per + Aq + a_b$ $I_p = Pe_{LIX}/10 \text{ para } 0 < Pe_{LIX} < 50$ $I_p = 5 \text{ para } Pe_{LIX} > 50$	Población expuesta según número de habitantes (P <sub>EX</sub> )	3-5	I <sub>s</sub> (FLIXPO) = P <sub>EX</sub>
		Altura de pila o vertedero (H)	0-6		Población expuesta según uso del suelo (P <sub>EX</sub> )	1-5	
		Tamaño de grano (Gra)	3-6		Vulnerabilidad ecológica (V <sub>E</sub> )	1-5	I <sub>s</sub> (FLIXNA) = V <sub>E</sub>
		Inclinación de la pendiente del sustrato (θ <sub>s</sub> )	0-4		Vulnerabilidad del Medio socioeconómico (V <sub>SE</sub> )	1-5	I <sub>s</sub> (FLIXSE) = V <sub>SE</sub>
		Estado de la geomembrana (Geo)	0-3				
		Evidencias de inestabilidad (Ins)	0-4				
		Carcavas de erosión (Car)	0-2				
		Precipitación media anual (P)	0-4				
		Precipitación máxima en 24 h (P <sub>24</sub> )	0-4				
		Sistema de desvío perimetral de aguas de lluvia (Per)	0-3				
		Evidencia de agua dentro de la estructura (Aq)	0-6				
Aceleración sísmica básica (a <sub>b</sub> )	0-5						

**Tabla 2.9** Valoración de los índices de Probabilidad y consecuencias para los escenarios FLIXPO, FLIXNA y FLIXSE.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
 “MÁSTER UNIVERSITARIO EN MINERÍA SOSTENIBLE”



Escenario	Factores de Probabilidad		Probabilidad	Factores de Severidad		Severidad	
	Factor	Rango		Factor	Rango		
FPRE	Valor de Peligrosidad (PePRE)	Material de construcción del dique (Mat)	0-16	$Pe_{PRE} = Mat + Mc + \theta + H + LD + Vol + Temp + Sus + IF + Ld + Fr + Ia + P_{24} + QE + DE + RV + a_b + Des + Car$ $Ip = Pe_{PRE} / 75 \text{ para } 0 < Pe_{PRE} < 375 \text{ } Ip = 5 \text{ para } Pe_{PRE} > 50$	Población expuesta según número de habitantes (P <sub>Ex</sub> )	3-5	I <sub>s</sub> (FPREPO) = P <sub>Ex</sub>
		Método de recrecimiento del dique (Mc)	0-16		Población expuesta según uso del suelo (P <sub>Ex</sub> )	1-5	
		Angulo del dique principal o del talud general (θ)	0-24				Vulnerabilidad ecológica (V <sub>E</sub> )
		Altura de la presa o de la suma de diques (H)	0-16				
		Longitud del dique de coronación (L <sub>0</sub> )	0-8				
		Volumen de residuos almacenados (Vol)	0-20				
		Tipología de presa según lugar emplazamiento (T <sub>Emp</sub> )	0-80				
		Material de sustrato o cimentación (Sus)	0-20				
		Integridad física de la presa (IF)	0-80				
		Dimensión de la laguna de decantación (Ld)	0-30				
		Posición del nivel freático en el dique (Fr)	0-20				
		Índice de Aridez de Martonne (Ia)	0-10				
		Precipitación máxima en 24 h (P <sub>24</sub> )	0-10				
		Caudal de escorrentía que ingresa en la presa (Q <sub>e</sub> )	0-10				
		Sistema de drenaje interno, aliviaderos y canales perimetrales (D <sub>e</sub> )	0-15				
		Grado de revegetación (R <sub>v</sub> )	0-15				
		Peligrosidad sísmica en función de la aceleración básica (a <sub>b</sub> )	0-20				
Deslizamientos vertientes al vaso (Des)	0-20						
Sobrecargas antrópicas sobre la presa (Car)	0-20						
				Vulnerabilidad del Medio socioeconómico (V <sub>SE</sub> )	1-5	I <sub>s</sub> (FPRESE) = V <sub>SE</sub>	

Tabla 2.10 Valoración de los índices de Probabilidad y consecuencias para los escenarios FPREPO, FPRENA y FPRESE.



Para la evaluación de los escenarios realiza a través de índices. Los índices que se valoran con fórmulas, gráficos y tablas, terminan siendo las “coordenadas” de Probabilidad y Severidad en las matrices de riesgo, donde se localizaran los correspondientes códigos (letreros): C1NA, C1PO...FPRENA, etc. A continuación se muestra la tabla matriz:

	EFFECTOS SOBRE EL MEDIO NATURAL	EFFECTOS SOBRE LAS PERSONAS Y LA POBLACIÓN	EFFECTOS SOBRE EL MEDIO SOCIOECONÓMICO
<b>Escenarios de riesgo por contaminación</b>			
Generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales (C1).	C1NA	C1PO	C1SE
Generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos (C2).	C2NA	C2PO	C2SE
Movilización de material particulado por acción del viento (C3)	C3NA	C3PO	C3SE
Emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica (C4).	C4NA	C4PO	C4SE
Contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades (CD)	---	CD	---
<b>Escenarios de riesgo por fallo en la estructura</b>			
Fallo o rotura del talud de escombreras de desmonte, estériles o minerales de baja ley (FESC)	FESCNA	FESCPO	FESCSE
Fallo o rotura del talud de pilas de residuos de lixiviación (FLIX)	FLIXNA	FLIXPO	FLIXSE
Fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos (FPRE)	FPRENA	FPREPO	FPRESE
PARA CADA UNO DE LOS ESCENARIOS DE RIESGO SE HACE UNA VALORACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA Y DE LA SEVERIDAD DE LAS CONSECUENCIAS			

**Tabla 2.11** Matriz para la valoración de las probabilidades y severidades del riesgo (Alberruche *et al.*, 2014).

La matriz de riesgos propuesta por el IGME, se basa en la valoración conjunta de los dos factores involucrados que son la Probabilidad de Ocurrencia y la Severidad de las consecuencias, cuyos resultados son plasmados en esta matriz según la puntuación alcanzada. A continuación se muestra la matriz:





		SEVERIDAD DE LAS CONSECUENCIAS				
		MUY BAJA	BAJA	MEDIA	ALTA	MUY ALTA
PROBABILIDAD DE OCURENCIA	MUY ALTA	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO
	ALTA	BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO
	MEDIA	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	ALTO
	BAJA	MUY BAJO	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	MODERADO
	MUY BAJA	MUY BAJO	MUY BAJO	MUY BAJO	BAJO	MODERADO

Figura 2.1 Matriz de riesgo propuesta por el IGME para la evaluación del riesgo y la calificación de los accidentes como graves o no graves en el ámbito de la Directiva 2006/21/CE (Alberruche *et al.*, 2014).

## 2.2. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Para este ejemplo se tomaron dos casos de presas de relave españolas ubicados en Murcia y Toledo, los cuales están descritos y valorados en el ANEXO I.



### **3. METODOLOGÍA DEL ÁRBOL DE FALLOS O FAULT TREE ANALYSIS (FTA)**

#### **3.1. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO FTA**

El Árbol de Fallos o Fault Tree Analysis (FTA) en inglés, se desarrolló en 1962 y fue creado para la U.S. Air Force por Bell Telephone Laboratories para ser usado con el sistema Minuteman. Más adelante fue utilizado y adoptado extensivamente por la Boeing Company.

El FTA es una de las muchas técnicas analíticas simbólicas fundada en operaciones de investigación que se ocupa de la identificación y análisis de las condiciones y factores que pueden causar o contribuir a la aparición de un suceso indeseado.

El FTA es un modelo gráfico de "camino" dentro de un sistema que se puede dirigir a un pronosticable evento indeseable. Los caminos se conectan con eventos y condiciones, utilizando símbolos lógicos estandarizados. Las probabilidades de ocurrencia forman parte del sistema y se propagan a través del modelo a fin de evaluar la probabilidad del evento pronosticable y no deseado.

Los árboles de fallos constituyen una técnica ampliamente utilizada en los análisis de riesgos debido a que proporcionan resultados cualitativos y cuantitativos.

Resulta un sistema laborioso y caro cuando el problema es complejo. Por ello se utiliza preferentemente en casos de gran importancia, tales como son:

- ✓ Grandes y notables amenazas de pérdidas , por ejemplo, de alto riesgo
- ✓ Numerosos potenciales contribuidores a percances.
- ✓ Sistemas y procesos complejos o de multielementos.
- ✓ Eventos indeseables ya identificados
- ✓ Causas de contratiempos indiscernibles



El FTA resulta una representación gráfica de cadenas de eventos/condiciones dirigidas al evento de pérdida. La aplicación del método contribuye a:

- Representación gráfica de cadenas de eventos/condiciones dirigidas al evento de pérdida.
- Identificación de aquellos contribuidores potenciales de fallos que son críticos
- Mejora del conocimiento acerca de las características del sistema
- Mirada cualitativa y cuantitativa hacia el interior de que la probabilidad del evento de pérdida seleccionado para el análisis.
- Identificación de los recursos implicados en prevenir el fallo
- Guía para identificar los recursos que optimizan el control del riesgo
- Documentación de los resultados analíticos

### 3.1.1. DEFINICIONES

- ❖ **Falta.** Es un anormal e indeseable estado de un sistema o inducido por: 1) la presencia de comando impropio o por la ausencia de uno apropiado, o 2) por un fallo. Todos los fallos causan faltas pero no todas las faltas son causadas por fallos.
- ❖ **Fallo.** En una pérdida por un sistema o un elemento del sistema, de la integridad funcional para mejorar según una intención. Por ejemplo, los contactos de un relé corroídos que impiden el paso de la corriente: el relé falla, la presión del tanque puede hacer una explosión, o sea el tanque quién falla.
- ❖ **Fallo primario o básico.** El elemento que falla ha sido no expuesto al ambiente o a una carga de servicio que excede su el nivel de su rendimiento. P.e. la fatiga de fallo de un muelle de un relé dentro de su vida normal, el goteo del sello de una válvula.
- ❖ **Fallo secundario.** Es el fallo inducido por la exposición de un elemento que ha fallado en el ambiente o por la carga que excede los límites aconsejados. P.e. el elemento ha sido impropriamente diseñado, o seleccionado, o instalado o calibrado para su aplicación específica.



### 3.1.2. REPRESENTACIÓN DEL ÁRBOL

La representación del árbol es de manera lógica y sistemática de las combinaciones de situaciones o causas del evento a evitar, de forma que se definen sucesos intermedios generados a su vez por sucesos de nivel inferior, hasta alcanzar el último nivel del árbol en el que se encuentran los sucesos básicos o no desarrollados.

A continuación se definen los principales componentes del árbol:

- ✓ **Suceso no deseado o "evento a evitar" (Top Event):** Se coloca en la parte principal del árbol
  
- ✓ **Suceso intermedio:** aquel cuya consecuencia es el suceso indeseado
  
- ✓ **Puertas lógicas (Gates):** relaciones existentes entre los sucesos iniciadores que hay por debajo del evento.  
En el método del árbol de fallos (FTA) se distinguen dos tipos de puertas lógicas:
  - "Y": Los sucesos deben ocurrir conjuntamente para que el evento se desarrolle. La probabilidad del evento viene dada por el producto de probabilidades de los sucesos básicos.
  - "O": El evento ocurrirá si, al menos uno de los sucesos por debajo de éste sucede. En este caso las probabilidades de los sucesos iniciadores se suman.
  
- ✓ **Sucesos básicos:** Sucesos que no precisan de otros para ser explicados  
Sucesos no desarrollados: Son aquellos sucesos cuyas causas son de poco interés o no disponemos suficiente información para determinarlos. Los sucesos "básicos o no desarrollados" se encuentran en la parte inferior de las ramas del árbol y se caracterizan por ser independientes entre ellos y porque las probabilidades de que acontezcan pueden ser calculadas o estimadas. Desde los sucesos básicos a otros sucesos intermedios se generan situaciones concatenadas que conducen al "evento a evitar"

Los niveles se unen entre sí por operadores o puertas lógicas, símbolos lógicos estandarizados:



Figura 3.1. Símbolos lógicos utilizados en el Árbol de Fallos.

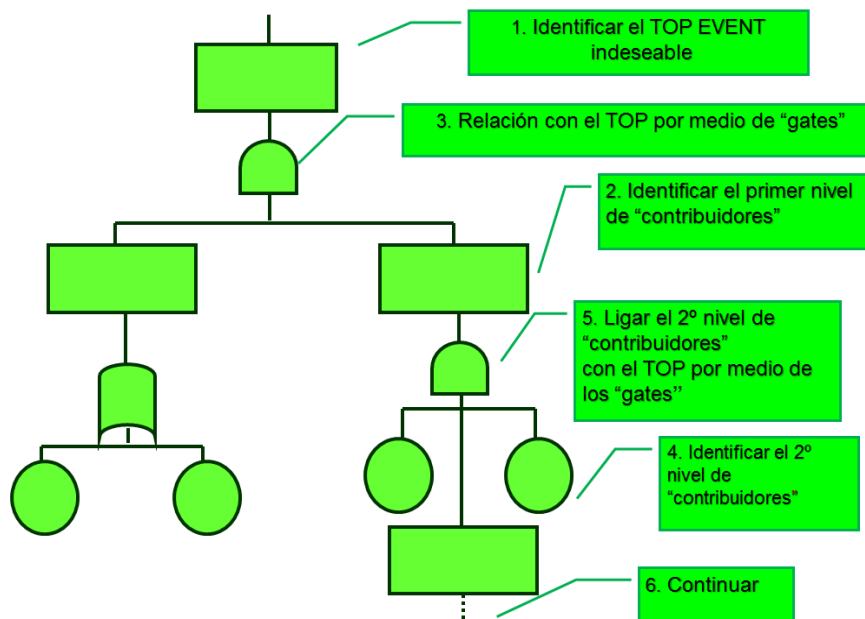


Figura 3.2. Etapas de un Árbol de Fallos.

### 3.1.3. IDENTIFICACIÓN DE LOS “TOP EVENTS”

Los “Top Events” representan unas altas pérdidas potenciales, en general las mayores, deducidas por varios métodos, por ejemplo mediante otra herramienta como el FMA o el Análisis en Modo de Fallos.

Resulta la parte fundamental del proceso y su elección debe ser muy cuidadosa cuando existan varias alternativas, entre otras razones por el elevado coste de cada análisis. Los sistemas más usuales para decidir cual representa las mayores pérdidas pueden ser los siguientes:

- Se explora los registros históricos
- Se buscan las fuentes de energía
- Se identifica la misión potencial de los contribuidores de fallos
- Se desarrollan escenarios “qué-si”
- Se usan “shopping lists.”

### 3.1.4. COLOCACIÓN DE LOS CONTRIBUIDORES AL ÁRBOL DE FALLOS

A fin de homogeneizar el lenguaje que aporta el Árbol de Fallos, se han creado unas normas básicas de construcción, cuyas relaciones fundamentales quedan recogidas en el siguiente esquema:

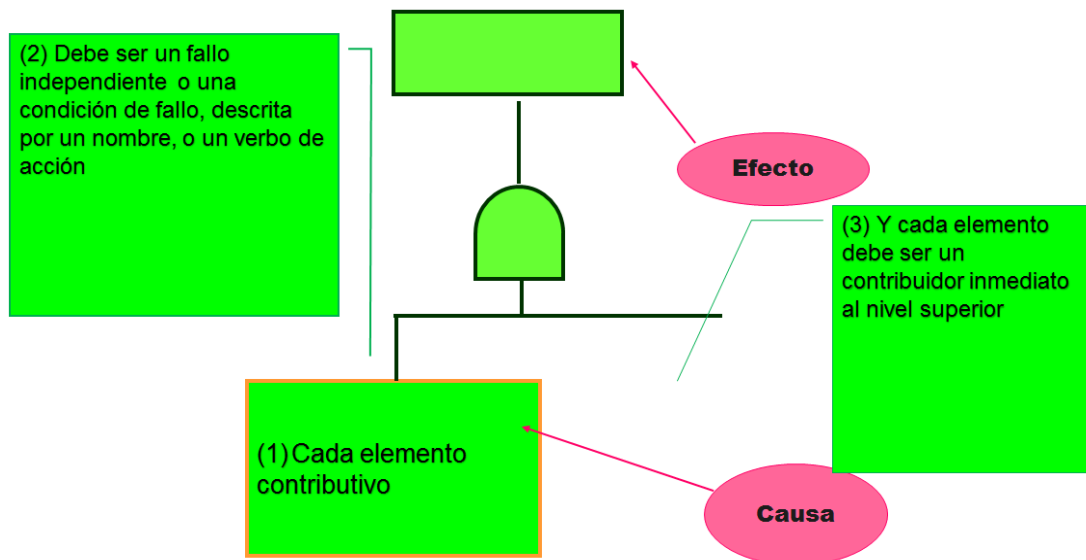


Figura 3.3 Contribuidores de un Árbol de Fallos.

### 3.1.5. ESTIMACIÓN DE LAS PROBABILIDADES

Cada suceso deberá ir caracterizado por su frecuencia o su probabilidad de Ocurrencia, todo ello en cada rama del flujo de acontecimientos. Por lo tanto,



muchas veces surge un gran trabajo para la confección de un árbol complejo, a causa de la increíble cantidad de ramas que genera un proceso a medida que nos alejamos de la concepción más simple.

Para la estimación de las probabilidades se usa los siguientes métodos:

- Usando datos medidos. Analíticamente, se basa en la física del escenario y tratamiento estadístico.
  - Traslación a un escenario similar
  - Tablas de datos publicados (fiabilidad)
  - Consulta a expertos y tratamiento estadístico
  - Registro de Incidentes Históricos.
  - Subjetivamente, basándose en la experiencia o juicio profesional
  - Probabilístico, mediante operaciones de análisis ( FTA)
- 
- **Usando datos actuales.** Se trata de datos empíricos, medidas estimadas en el propio escenario.
  
  - **Traslación a un escenario similar.** Usando datos de escenarios similares (antecedentes en Perú). Por ejemplo, circunstancias en las que se produzca un sismo, máximas avenidas de los ríos, etc.
  
  - **Tablas de datos publicados (Fiabilidad o Probabilidad de Fallo):** La fiabilidad es la capacidad de los productos o servicios de comportarse en la forma requerida bajo unas condiciones y tiempo establecido. También se puede definir como la probabilidad de que un producto se comporte adecuadamente durante un tiempo establecido.
  
  - **Juicio ingenieril. Método Delphi. Comité de evaluación:** Esta estimación recoge la opinión que un individuo tiene respecto de la verosimilitud de un evento.



Otras fuentes de las que se puede obtener probabilidades de fallo son:

- Datos del fabricante
- Estándares de la industria MIL
- Evidencia histórica- Sistemas similares
- Simulación / test
- ERDA Log Average Method

### 3.1.6. RESULTADOS DEL FTA

- Cuantifica la probabilidad del fallo del sistema
- Valora la vulnerabilidad del sistema
- Optimiza el consumo de recursos para el control de la vulnerabilidad.
- Guía la reconfiguración del sistema a fin de reducir la vulnerabilidad
- Identifica los caminos principales hacia el desastre
- Identifica los puntos de fallos potenciales
- FAULT TREE ANALYSIS es un método de valoración del riesgo. Risk Severity se define por el TOP event. Risk Probability es el resultado del Tree Analysis.



### 3.2. APLICACIÓN DEL FTA A LA GENERACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS EN MINERÍA

FTA en la generación de Aguas Ácidas en escombreras de la Faja Pirítica Ibérica) FPI.

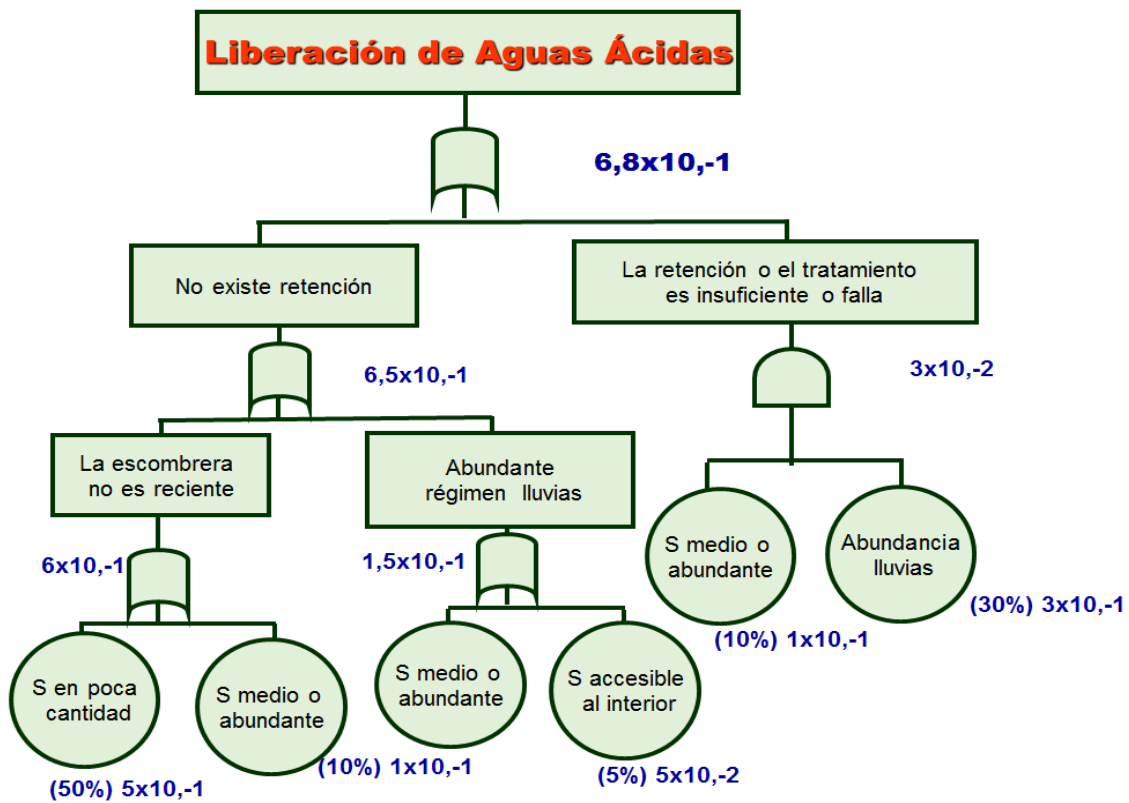


Figura 3.4. Árbol de Fallos en la generación de aguas ácidas de mina de la Faja Pirítica Ibérica (Fuente: J.A. Espí, 2007).

El resultado global según J.A Espí, 2007, la probabilidad de Ocurrencia de generación de aguas ácidas en la Faja Pirítica es de aproximadamente el 68%.



## **4. APLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS A UNA PRESA SELECCIONADA EN PERÚ (TICAPAMPA-ÁNCASH)**

### **4.1. JUSTIFICACIÓN**

En la parte alta del Río Santa (Huaraz, Perú) se ha constatado la existencia de abundantes pasivos ambientales mineros, principalmente consecuencia de la pequeña minería, pero también de algunos depósitos de residuos de mayor importancia. Varios de los depósitos de relaves ubicados entre Cátac y Ticapampa, debido a su ubicación a orillas del Río Santa, son presumiblemente una fuente de contaminación del cuerpo de agua así como el origen de riesgos, derivados de la posible rotura de los diques en momentos de avenidas importantes. Uno de ellos es el depósito de lodos o relaves de Ticapampa, que está situado en las inmediaciones de la población de Ticapampa, la cual fue inundada por una avenida en el año 1998, estando los residuos mineros entre la población y el río. Es por esto que ha sido reconocido en diversos trabajos como un elemento de riesgo para el medio ambiente y la población (Ministerio de Energía y Minas, 1998; Rodríguez et al., 2007; Jara, 2011). Precisamente por existir algunos trabajos dedicados a este depósito de relaves, se ha considerado la posibilidad de aplicar las metodologías de evaluación de riesgo, contando para ello con los datos publicados. Esta información se completará, cuando sea necesario, con otra información disponible sobre la cuenca hidrológica del Río Santa, o sobre el entorno natural.

### **4.2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA A EVALUAR**

#### **4.2.1. UBICACIÓN**

Geográficamente Ticapampa se encuentra ubicada en la margen izquierda del río Santa, a una altura de 3456 msnm en la Sierra Norte del Perú específicamente en la Cordillera Negra, siendo sus coordenadas geográficas, 09°45'21" de latitud sur y 77°27'13" de longitud oeste del Meridiano de

Greenwich. Políticamente pertenece al distrito de Ticapampa, provincia de Recuay, departamento y región Ancash.



**Figura 4.1** Imagen satelital de la presa de relaves Ticapampa

La presa de lodos de flotación o relaves de Ticapampa, es perteneciente a la Compañía Minera Alianza, se ubica en el Distrito de Ticapampa, construida a orillas del río en el km 170, en paralelo a la carretera asfaltada Pativilca-Huaraz.

Según estudios realizados a los elementos encontrados en el análisis geoquímico del relave de Ticapampa, se puede deducir que la mineralogía trabajada en la zona corresponde a yacimientos polimetálicos de Cu-Pb-Zn, asociados con Au-Ag, formado en un entorno volcánico epitermal de baja temperatura (Romero A. *et al.*, 2007).

El depósito de relaves se inicia en el año de 1912, con la compañía francesa The Anglo French Silver Mining Co., pasando posteriormente a diferentes compañías mineras. La planta de tratamiento funcionó con una capacidad de 1000 t/día, hasta que en los años de 1967 a 1985 se paralizan los procesos



metalúrgicos de beneficio de minerales. Actualmente la presa de lodos se encuentra en estado de abandono (Jara, 2011).

#### 4.2.2. ORIGEN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Las dimensiones aproximadas de la presa de relaves son: 750 x 200 metros, con una altura promedio de 15 metros. El depósito presenta varios niveles y sectores que han sido utilizados en forma alternada desde hace más de 50 años y, en los últimos, por la Empresa Minera Alianza. Los residuos almacenados proceden del tratamiento de minerales para la obtención de plata, plomo y zinc. La presa de relaves se encuentra inactiva o abandonada desde el año 1985 (Jara, 2011).



**Figura 4.2** Vista del margen derecho del depósito de relaves en Ticapampa.



#### 4.2.2.1 GEOLOGÍA

##### ➤ **Geología Regional**

El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) de Perú, describe la geología regional del área de Recuay, Ticapampa y Cátac, en la cartografía geológica de los cuadrángulos de Huaraz, Recuay, La Unión, Chiquián y Yanahuanca, publicada en el Boletín N° 76. Menciona que las rocas más antiguas están representadas por sedimentos de edad del Cretácico inferior que conforman el Grupo Goyllarizquizga, hasta llegar a la cobertura de los depósitos no consolidados, de edad holocena.

Las rocas ígneas intrusivas están representadas por el importante emplazamiento del "Batolito de la Cordillera Blanca"; y las rocas ígneas efusivas por un importante emplazamiento de las rocas volcánicas que dominan mayormente la Cordillera Negra.

##### ➤ **Geología estructural**

Según el mapa litológico-estructural del INDECI (2004), en la zona de Ticapampa y Recuay, específicamente en el margen derecho del río Santa, se han identificado dos tipos de fallas activas, que son estructuras geológicas modernas: una conocida como la "Falla activa Cordillera Blanca" y la otra como la "Falla activa de Ancash". Además, frente a Recuay se puede apreciar que existen dos tipos de deslizamientos, uno producto del sismo del 31 de mayo de 1970 y el siguiente es un antiguo deslizamiento.

##### ➤ **Geomorfología y Estratigrafía**

El área a valorar se encuentra en el flanco occidental de la Cordillera Blanca, mostrando una pendiente general de 25°. Está constituida por abundante material morrénico. El flanco de la Cordillera Negra presenta un relieve con pendiente irregular hacia el este de las ciudades de Recuay y Ticapampa y hasta el valle del río Santa, cuyo curso hidrológico principal es río Santa. Este



río se encuentra ente ambas cordilleras, al cual afluyen una serie de quebradas tributarias de naturaleza torrencial. (INGEMMET, 2011).

La mayor parte de la zona estudiada está ocupada por materiales muy recientes (aluviones, coluviones, material morrénico y travertino) y tan solo al oeste aparece un asomo escaso de rocas volcánicas del Grupo Calipuy.

**Q1- Aluviones:** Formadas por materiales sueltos (cantos rodados y arenas finas y gruesas) que se encuentran a ambos márgenes del río Santa, donde conforman un conjunto de terrazas importantes así como, en menor importancia, en los márgenes de las quebradas importantes que bajan de la Cordillera Blanca.

Esta deposición de materiales demarca el proceso evolutivo que tienen los ríos, en este caso particular para el río Santa, que en la profundización de su cauce va dejando lateralmente materiales.

Estos tienen un origen heterogéneo, pero, en conjunto, proceden de los materiales inicialmente fragmentados por la intensa actividad glacial sobre la roca base, que son transportados exclusivamente por importantes corrientes de agua que, luego en el devenir geológico, son depositados lateralmente.

En cuanto a la caracterización litológica de estos productos aluviales, es importante indicar que siendo iguales en su naturaleza, los aluviales transportados y depositados por el río Santa, tienen un menor contenido de elementos finos, tipo arcillas y limos, con mayor contenido de arenas, frente a los materiales depositados por las quebradas afluentes (INDECI, 2004).

**Q2-Travertinos:** Son materiales que constituyen acumulaciones en forma de mantos y costras, constituidos por carbonato de calcio que a manera de exhalaciones y luego de consolidarse, se emplazan siguiendo un alineamiento en la parte inferior de la Cordillera Negra, mayormente sobre la localidad de Ticapampa.



Según el mapa litoestratigráfico de la Zona de Ticapampa y Recuay realizada por INDECI (2004), existe una estrecha franja de travertinos que ocupan la parte superior de la población de Ticapampa.

**Q3-Terrazas Primarias de materiales modernos:** Formadas por la invasión importante del río a partir de materiales anteriormente trabajados. Estas terrazas han permitido el emplazamiento del pueblo de Ticapampa, las mismas que están expuestas a erosiones, en mayor o menor magnitud, por las aguas del río Santa en su actual recorrido.

**Q4-Coluvionales:** Formados por mezcla de material trabajado del río junto con derrubios recientes de la formación morrénica. Constituye una franja muy indeterminada que probablemente señala periodos de gran actividad de flujo en el río Santa.

**Q5-Derrubios de ladera:** Están formados por materiales sueltos de la formación morrénica que, a grandes pasos, se está destruyendo por la erosión reciente. Constituyen el material fundamental de los abanicos o conos de inyección de las partes bajas cercanas al río, cubriendo la última terraza.

**Q6-Material morrénico consolidado:** Representa la superficie cartografiable de las morrenas con gran espesor y probablemente refleja la posición estructural de las capas sedimentarias antiguas no aflorantes. Se encuentran en la margen derecha del río Santa. Se exponen de manera importante en el flanco occidental de la Cordillera Blanca, es decir, entre su base y la margen derecha del río.

Estos materiales son producto de la última glaciación (pleistocénica), habida en el pasado geológico reciente, donde se ha producido una intensa actividad erosiva sobre las rocas de basamento (sedimentos volcánicos e intrusivos, descritos), generando una morfología muy abrupta (para el caso de las rocas intrusivas del batolito de la Cordillera Blanca). Los productos morrénicos forman importantes cañones de erosión, así como una erosión intensa en las rocas sedimentarias poco cohesivas, que por su menor resistencia y la mayor



acción del agua de deshielo, han sido fácilmente desintegradas y luego depositadas con arrastre de flujos de material.

Toda esta acción mecánica compleja ha dado origen a este tipo de material morrénico, de baja plasticidad, constituido por gravas y gravillas y por clastos mayores, cuya litología procede de granitos, rocas volcánicas (en menor proporción), cuarcitas, pizarras y lutitas, cuya fácil desintegración ha permitido constituir la matriz del conjunto, en forma de arcillas y limos (INDECI, 2004).

**Grupo Volcánico Calipuy:** El emplazamiento de estas rocas volcánicas es prominente, particularmente a lo largo de la Cordillera Negra, con prolongaciones importantes hacia la Cordillera Blanca. Están constituidas por una secuencia de piroclastos, derrames, brechas y tufos, de espesor variable. Sobreyacen (secuencialmente) a las rocas sedimentarias cretáceas por una fuerte discordancia angular.

La cartografía geológica del INGEMMET (Wilson y Reyes, 1967), demarca, en el flanco oriental de la Cordillera Negra, afloramientos de intrusiones pequeñas que podrían corresponder a algunas de las chimeneas por las cuales pudieron haberse eyectado los derrames volcánicos Calipuy.

Un cuerpo de esta naturaleza se emplaza al noroeste de la ciudad de Recuay, con otros emplazamientos, siempre en la Cordillera Negra, frente a Ticapampa y Cátac. Su litología corresponde a una roca dacita, de textura porfirítica, de color gris claro en el estado fresco y gris amarillento cuando se meteoriza.

Su resistencia al golpe es dependiente de su estado de conservación. De esta manera, en estado fresco tiene resistencia alta e intemperizada es de resistencia media. Su textura está caracterizada por un conjunto de diaclasas y fracturas, de diferentes direcciones, rellenas con material milonítico y óxidos secundarios (INDECI, 2004).

A continuación se presenta un mapa geomorfológico realizado por la autora partir de un mapa topográfico, donde se identifica las terrazas, los tipos de materiales depositados y otras estructuras sedimentarias y geomorfológicas.



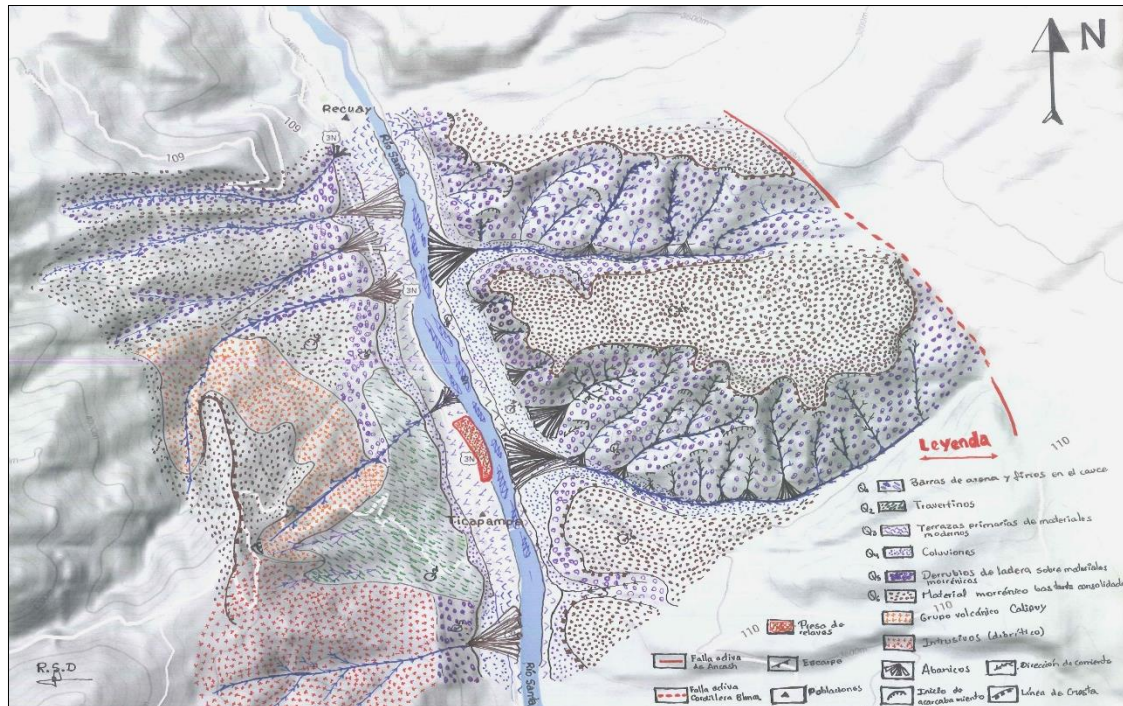


Figura 4.3 Mapa geomorfológico y estructural de Ticapampa (Fuente: Elaboración propia).

Respecto a la situación de la presa en su contexto geomorfológico conviene decir que en relación con los procesos activos, ésta se emplaza en la terraza más reciente del río Santa, en una llanura que rellena un ensanchamiento importante de su cauce a una altura que no rebasa los cinco metros. No obstante el relleno es muy activo ya que procede de los materiales morrénicos poco consolidados. Este ensanchamiento recoge abanicos de los cauces tributarios más próximos, sobre todo de la entrada del río Chaupis. El cauce actual trabaja su propio lecho y forma barras de áreas y gravas en dirección de la corriente. Todo ello señala la vida efímera de cualquier relieve dentro de la llanura de inundación.

#### 4.2.3. EDAFOLOGÍA

De acuerdo al Mapa de Suelos del Perú elaborado por la ex Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN, 1972), en el entorno de la presa de relaves de Ticapampa se reconocen cuatro asociaciones de grandes grupos de suelos, los cuales se resumen a continuación:



- **Litosol Andino Dístrico**

Los litosoles andinos dístricos de baja elevación son similares a los de alta elevación, donde están pobremente desarrollados. Sin embargo, en comparación con los litosoles andinos dístricos de alta elevación que tienen estratos orgánicos bien desarrollados, los litosoles andinos dístricos de baja elevación tienen poco o ningún contenido de materia orgánica. Estos suelos generalmente están asociados a los kastanozems, pero se pueden encontrar de manera individual.

- **Paramosol Dístrico**

Los paramosoles dístricos generalmente están compuestos de suelos coluviales y residuales con turba, que generalmente se derivan y están asociados con litosoles andinos dístricos, debido a las condiciones climáticas.

- **Paramosol Andosol**

Los paramosoles andosoles son tipos de suelos dominantes de los paramosoles altoandinos y generalmente se encuentran en zonas relativamente planas o en mesetas altoandinas. Están desprovistos de capas orgánicas distinguibles y no se pueden clasificar como eútricos o dístricos. Los andosoles generalmente están asociados con litosoles andinos dístricos.

- **Fluvial Eútrico**

Los fluviosoles eútricos generalmente se presentan en valles con un relieve topográfico local que varía de plano a ondulado. Generalmente son suelos aluviales irrigados que se encuentran en climas áridos.



#### 4.2.4. HIDROGRAFÍA E HIDROLOGÍA

El río Santa es el curso principal y más importante de la vertiente del Pacífico y es el más caudaloso de la Costa peruana. Nace en la laguna Aguash, la que vierte sus aguas al río Tuco y éste a la laguna Conococha y discurre en su tramo superior de Sur a Norte entre las cordilleras Blanca y Negra y en su tramo inferior de este a oeste. El río Santa discurre en las inmediaciones de la presa de relaves de Ticapampa.

El área total de drenaje de la cuenca del río Santa es 14.954 km<sup>2</sup>, presentando un caudal medio multianual de 143 m<sup>3</sup>/s en su entrega al Océano Pacífico. Recorre una longitud de 316 km y una pendiente media de 1,4 %.

La mayoría de afluentes del río Santa nacen en los 5.000 msnm, alimentándose de la precipitación estacional y de los nevados que ocupan un área total de 616 km<sup>2</sup> y las descargas de 630 lagunas, estos afluentes están ubicados en su margen izquierda, donde la cadena de montañas recibe el nombre de Cordillera Blanca.

Uno de sus principales afluentes es el río Tablachaca o río Negro que se une al río Santa en la localidad conocida como Condorcerro. Es el afluente más caudaloso y su desarrollo es de Este a Oeste.

El área cultivada y servida por el río Santa es de 47 807 ha, de las cuales 6 516 ha están ubicadas en el valle costero y 41 391 ha, están ubicadas a lo largo del llamado Callejón de Huaylas (CESEL Ingenieros, 2009).



**Figura 4.4** Vista de la presa de relaves de Ticapampa junto al Río Santa.



### 4.3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGOS DEL IGME

#### 4.3.1. Escenario de generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales: C1

##### 4.3.1.1. Índice de Probabilidad de Ocurrencia de generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales $I_P$ (C1)

El Índice de Probabilidad de Ocurrencia del escenario de contaminación de las aguas superficiales por efluentes contaminantes de la presa de relaves Ticapampa ( $I_P$  C1), se ha evaluado en función de: la proximidad a un cauce o masa de agua superficial, mediante el denominado Factor de proximidad ( $P_R$ ); la Peligrosidad de los lixiviados generados por los residuos o Factor de Toxicidad ( $F_{TOX}$ ); y el grado de desprotección de los relaves frente a la escorrentía superficial y/o infiltración del agua o Factor de Superficie Desprotegida ( $F_{SD}$ ). Para su cálculo se ha aplicado la siguiente fórmula:

$$I_P (C1) = P_R \times F_{TOX} \times F_{SD}$$

A continuación se describe la valoración de cada uno de los factores que integran el Índice  $I_P$ C1. Los resultados de la evaluación de todos ellos, a modo de síntesis, se muestran en la Tabla 4.5.

- **Factor de proximidad ( $P_R$ ):**

La presa de relaves Ticapampa se encuentra localizada a menos de 50 m del cauce del río Santa (Figura 4.5), que presenta una corriente permanente de agua incluso durante la estación seca, por lo que el valor del Factor  $P_R$  es en este caso igual a 1 según los criterios establecidos en la metodología del IGME (Alberruche *et al.*, 2014), recogidos en el apartado del capítulo 2 y en el manual del IGME.



Figura 4.5 Ubicación y distancia entre la presa de Relaves de Ticapampa y el río Santa.

- **Factor de Toxicidad o Peligrosidad ( $F_{TOX}$ ):**

Los datos utilizados para el cálculo del índice son los valores medios obtenidos a partir de varias muestras superficiales, publicados por Rodríguez et al. (2007). Estos datos fueron obtenidos utilizando el método de lixiviación de residuos sólidos recogido en la norma DIN 38414-S4. Este método es prácticamente igual al empleado por la metodología del IGME, que es el llamado EN 12457-2 (*European Committee for Standardization, 2002*), el cual evalúa los contenidos en elementos solubles en proporción 1/10 (sólido: agua desionizada).

Para la evaluación del Factor de Toxicidad ( $F_{TOX}$ ) se ha aplicado el cociente promedio de Peligrosidad ( $CPP_{LAB}$ ) de los lixiviados. Este cociente queda expresado del siguiente modo:

$$CPP_{LAB} = \frac{1}{n} \times \sum^n \frac{[X]_{LIX-LAB}}{NCA_X}$$

Dónde:

- $[X]_{LIX-LAB}$  es la concentración medida en el lixiviado resultante de aplicar al residuo el procedimiento de laboratorio EN 12457-2 (u otro equivalente) para el elemento X.



- $NCA_X$  es el contenido máximo admisible en el agua o nivel de calidad de aguas correspondiente al elemento X.

-n es el número de elementos para los que la concentración medida en el extracto es superior al nivel adoptado como estándar.

Con los datos obtenidos para los relaves de Ticapampa y el Estándar adoptado en la metodología del IGME, se calcula el coeficiente de promedio de Peligrosidad ( $CPP_{LAB}$ ), cuyo valor resultó 253,7 (Tabla 4.1). Se tiene en la siguiente tabla:

ELEMENTOS ( $\mu\text{g/l}$ )	Ticapampa (según método DIN 3814-S4)	Estándar adoptado por el IGME
Al	*	50
As	10280	10
Cd	40	0,25
Co	*	20
Cr	50	50
Cu	1670	10
Hg	*	1
Mo	*	70
Ni	30	20
Pb	850	10
Se	*	1
V	*	6
Zn	9700	120
pH	3,40	6,5-8,5
CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	2460	
<b><math>CPP_{LAB}</math></b>	<b>253,7</b>	
<b><math>F_{TOX}</math></b>	<b>3,2</b>	

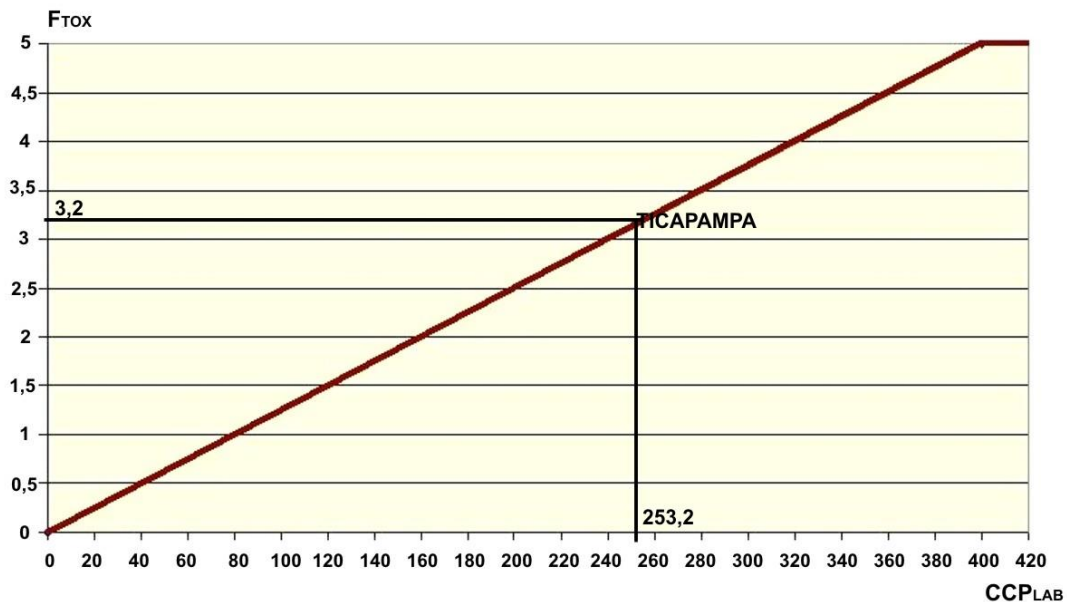
**Tabla 4.1** Datos de ensayos de lixiviación según método DIN 3814-S4 (Rodríguez *et al.*, 2007) de muestra compuesta superficial en la presa de relaves de Ticapampa comparados con los niveles de contenidos en elementos según el estándar adoptado (expresados en  $\mu\text{g/l}$ ) descritos en el apartado 2 según la metodología del IGME.

(\*) No se tienen datos.

$F_{TOX}$ : Se obtiene según la figura para el cálculo del Factor de Toxicidad ( $F_{TOX}$ ), en función del cociente promedio de Peligrosidad ( $CPP_{LAB}$ ) de los lixiviados.



El valor del Factor de Toxicidad o Peligrosidad de los lixiviados ( $F_{TOX}$ ) se obtiene de forma gráfica (Figura 4.6), o bien, aplicando la fórmula:  $F_{TOX} = CPP_{LAB} \times 0,0125$ , para  $CPP_{LAB} < 400$ . El resultado final es un valor de  $F_{TOX}$  igual a 3,2.



**Figura 4.6** Gráfica que permite la asignación del Factor de Toxicidad ( $F_{TOX}$ ) en función del valor obtenido del cociente promedio de Peligrosidad ( $CPP_{LAB}$ ) para la presa de relaves de Ticapampa.

### Factor de Superficie Desprotegida ( $F_{SD}$ )

El Factor de Superficie Desprotegida ( $F_{SD}$ ) se determina en función del Factor Superficial ( $F_S$ ) y la fracción de Cobertura ( $F_C$ ), para hallar este Factor se emplea la fórmula siguiente:

$$F_{SD} = F_S \times (1 - F_C)$$

Para la evaluación del Factor Superficial ( $F_S$ ), se determinó en primer lugar la Superficie expuesta o Superficie en planta del Depósito ( $S_{EX}$ ) sobre una ortofotografía de Google Earth, utilizando la herramienta de medidas espaciales disponible en dicha aplicación. El resultado fue una Superficie Total expuesta de 11,3 ha aproximadamente, por lo que  $F_S$  es igual a 1, ya que supera las 2 ha, de acuerdo con metodología del IGME.

Por otra parte, la Superficie Total de la presa de relaves de Tipacampa se encuentra completamente desprovista de vegetación u otro tipo de cobertura





protectora, por lo que el Factor  $F_C$  o Factor de Cobertura será igual a 0. Por todo ello, el Factor de Superficie Desprotegida será igual a 1 (Tabla 4.2).

Superficie Expuesta ( $S_{EX}$ )	Factor Superficial ( $F_S$ )	Factor de Cobertura ( $F_C$ )	Factor Superficie Desprotegida ( $F_{SD}$ ) $F_{SD} = F_S \times (1 - F_C)$
11,3 ha	1	0	1

**Tabla 4.2** Valoraciones de los factores para determinar el Factor Superficie Desprotegida ( $F_{SD}$ ) para el escenario C1 asociado a la presa de relaves de Ticapampa.

Finalmente para para el cálculo del Índice de Probabilidad de Ocurrencia de generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales  $I_P$  (C1) es igual a 3,4, según se muestra en la Tabla 4.3, a continuación:

Factor de Proximidad $P_R$	Factor de Toxicidad $F_{TOX}$	Factor Superficie Desprotegida $F_{SD}$	Índice de Probabilidad de Ocurrencia de escenario C1 $I_P(C1) = P_R \times F_{TOX} \times F_{DS}$
1	3,4	1	3,4

**Tabla 4.3** Valores de los factores para hallar el Índice de Probabilidad de Ocurrencia de escenario C1 asociado a la presa de relaves de Ticapampa.

#### 4.3.1.2. Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población derivados de la contaminación de las aguas superficiales por efluentes procedentes de los residuos mineros: $I_S$ (C1PO)

La Severidad de los efectos de este índice va a ser función de la población Total ( $P_{EX}$ ) que se abastece de agua para su consumo del curso fluvial afectado, hasta una distancia máxima de 5 km aguas abajo de la presa. También se considera el escenario de exposición definido por el uso del agua considerado más vulnerable hasta dicha distancia ( $V_P$ ), es decir, el que favorezca el ingreso de una mayor dosis de contaminante en las personas expuestas y un mayor tiempo de exposición; y de la carga contaminante presente en el lugar o tramo del río donde éste se localice ( $F_{SUP}$ ).



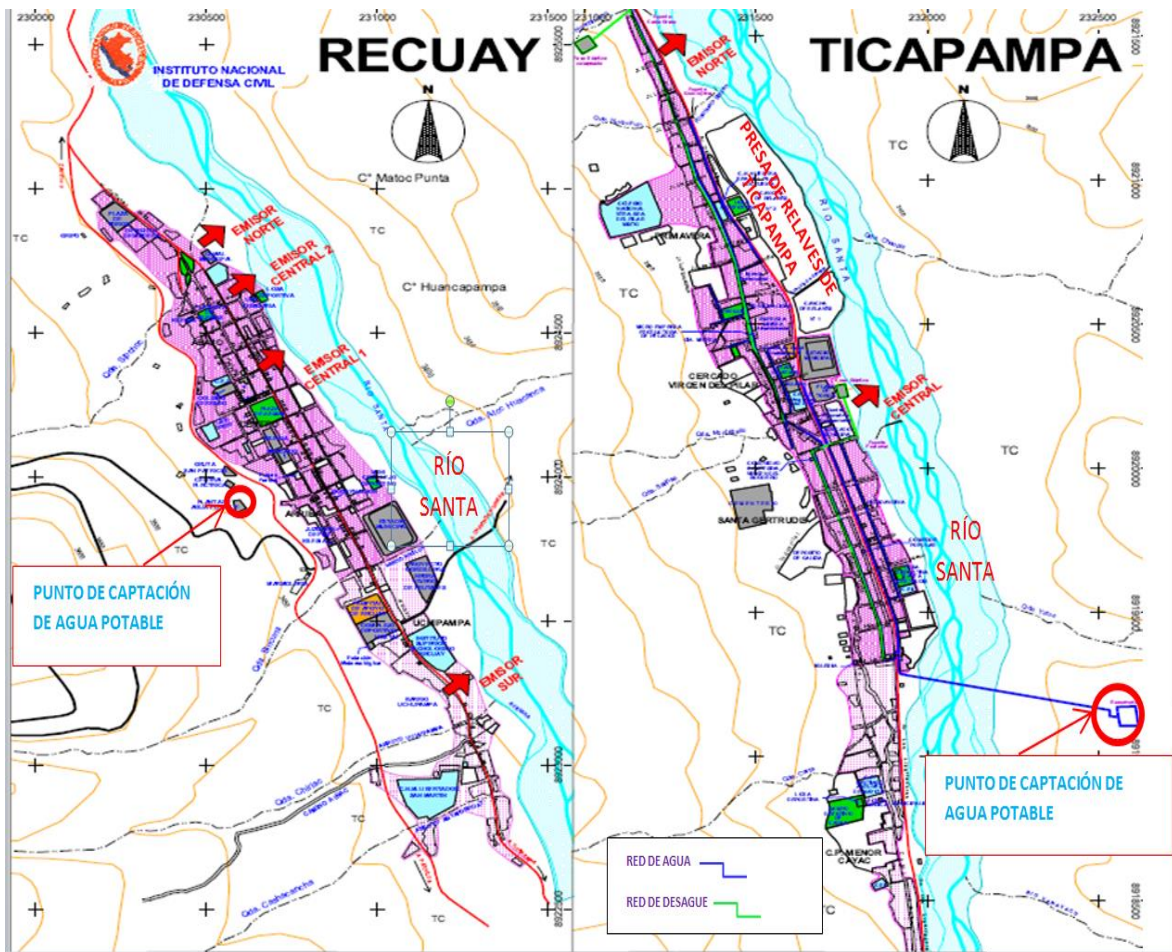
El Índice de Severidad de las consecuencias de la contaminación de las aguas superficiales por efluentes contaminantes o  $I_S$  (C1PO), es evaluado mediante la siguiente fórmula:

$$I_S (\text{C1PO}) = 0,5 P_{EX} + 0,5 (F_{SUP} \times V_P)$$

Respecto al Factor de la población expuesta ( $P_{EX}$ ), se tiene información de que las ciudades de Ticapampa y Recuay, situadas en la zona de afección, no utilizan el agua del río Santa para consumo humano, ni para usos agrarios, tal y como se recoge en el "Plan de prevención ante desastres, usos del suelo y medidas de mitigación" realizado por el Instituto Nacional de Defensa Civil de Perú (INDECI, 2004). Según dicho plan:

- La ciudad de Ticapampa se abastece de las aguas que se infiltran en la Cordillera Negra, y que son canalizadas por las laderas de los cerros, siendo la Municipalidad Provincial la administradora de dichos servicios y que cubren al 80% de la población (Figura 4.7). El abastecimiento se completa con las captaciones de agua: del río Yanayacu que se abastece de la laguna Querococha, y con el aprovechamiento de los manantiales de Carata, encontrándose el reservorio a 500 m de la captación.
- La ciudad de Recuay, situada a 3500 m aguas abajo de la presa, se abastece a través de varias captaciones en los ríos Yanamito y Chiriaco. La alta contaminación minera del río Artuporhuay y el río Colorado imposibilita el uso de sus aguas tanto para abastecimiento como para el uso agrario. Existe en proyecto una futura captación de agua en el río Pocrac, que se alimenta de la laguna Querococha.

Además se tiene un mapa de agua y desagüe de estas zonas como se muestra a continuación (Figura 4.7):



**Figura 4.7** Localización de las captaciones de agua para abastecimiento en Ticapampa y Recuay (fuente: INDECI, 2004)

Por todo ello, es improbable una afección sobre la población derivado de la contaminación de las aguas superficiales por efluentes procedentes de la presa Ticapampa, por lo que el Índice  $I_S$  (C1PO) será igual a 0.

#### 4.3.1.3. Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la contaminación de las aguas superficiales, por efluentes procedentes de los residuos mineros : $I_S$ (C1NA)

La severidad del daño sobre el medio natural por la contaminación de las aguas superficiales por efluentes mineros procedentes de la presa Tipacampa, se evalúa en función del ecosistema acuático y/o ribereño más vulnerable o de más alto valor ecológico que se encuentre más próximo a la presa ( $V_E$ ), en un



tramo de 5 km aguas abajo, y del Factor Exposición o carga contaminante a la que dicho ecosistema se encuentre expuesto, de acuerdo con la siguiente fórmula.

$$I_s (C1NA) = F_{SUP} \times V_E$$

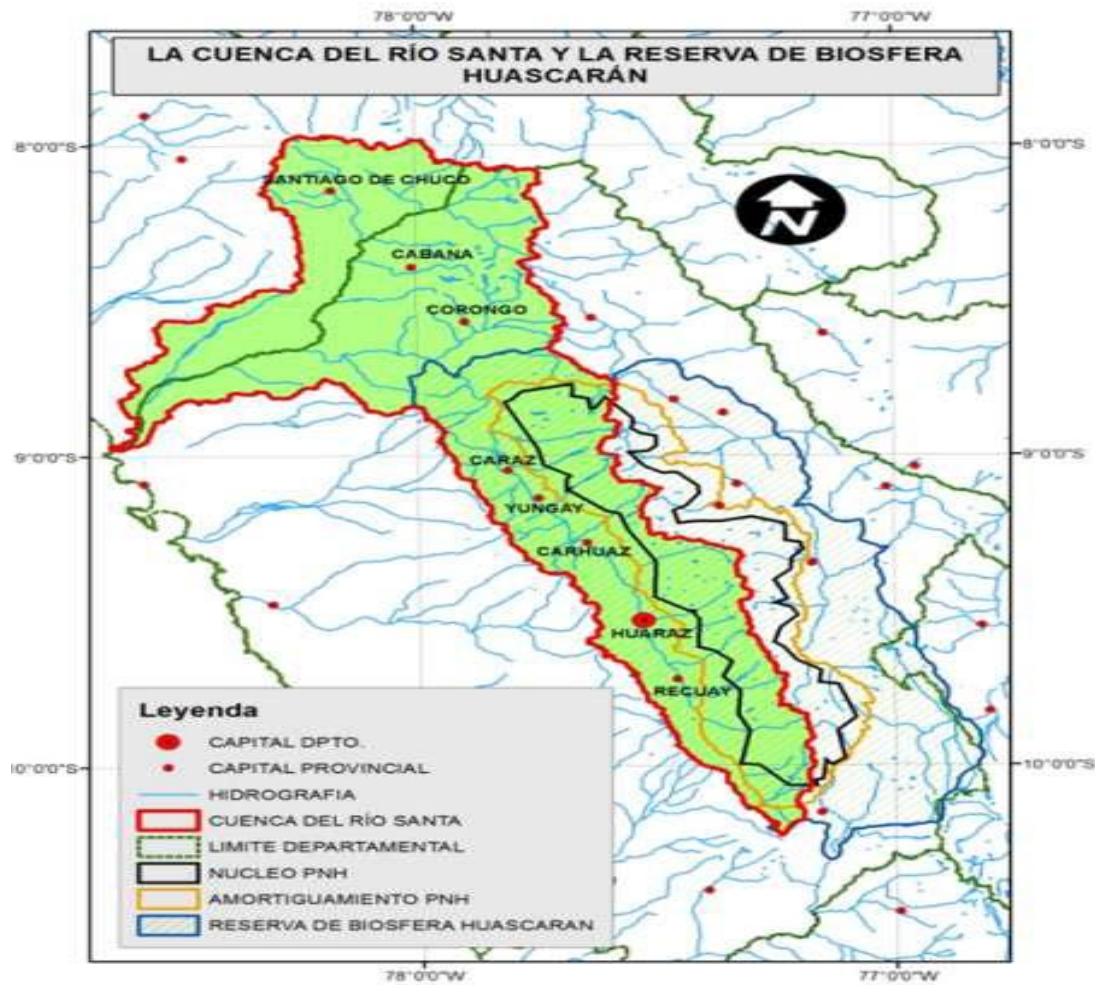
El tramo del río Santa afectado por la presa de relaves Ticapampa, se localiza dentro de la Reserva de la Biósfera Huascarán (Figura 4.8), declarada el 1 de marzo de 1977 por la Unesco. Dicha reserva incluye una Zona Núcleo constituida por el Parque Nacional Huascarán, una Zona de Amortiguamiento y una Zona de Transición (Villanueva, 2011)

Por otra parte, en la zona afectada están presentes algunas especies de flora protegidas por estar en peligro o por considerarse vulnerables, tal y como se recoge en la Tabla 4.4, según el Decreto Supremo N° 043-2006-AG (Peruano) que aprueba la categorización de especies amenazadas de flora silvestre.

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO
<b>EN PELIGRO CRÍTICO</b>	
Palo santo	Bursera graveolens
Quishuar	Buddleia incana, Buddleia coriacea, Buddleia longifolia
<b>EN PELIGRO</b>	
Ratania	Prosopis chilensis, Prosopis juliflora
Cactácea	Haageocereus pacalaensis
Huanarpo hembra	Cnidoscolus basiacanthus
Huanarpo macho	Jatropha macrantha
<b>VULNERABLE</b>	
Tara	Caesalpina spinosa

**Tabla 4.4** Especies de flora ribereñas amenazadas según el Decreto Supremo N° 043-2006-AG (Perú).

Asimismo, se encuentran presentes algunas especies de peces como la trucha arcoíris (*Onkorhynchus mikiss*) y el bagre (*Astroblepus simonsii*), categorizadas como amenazadas, cuyas poblaciones son muy escasas (Asesores Asociados, 2002).



**Figura 4.8** La cuenca del río Santa y la Reserva de Biosfera Huascarán (Fuente: Villanueva, 2011)

Por lo tanto, la Vulnerabilidad Ecológica será la máxima, es decir,  $V_E$  será igual a 5, al constituir un área sensible o espacio protegido. Y el Factor de Exposición será igual a 1, por incluirse la presa dentro de la propia Reserva de la Biosfera (Figura 4.8). El Índice de Severidad de los daños sobre el medio natural derivado de la contaminación de las aguas superficiales por efluentes mineros será muy alto, igual a 5 (Tabla 4.7).

Factor Exposición $F_{SUP}$	Factor Vulnerabilidad Ecológica $V_E$	Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural escenario C1 $I_S(C1NA) = F_{SUP} \times V_E$
1	5	5

**Tabla 4.5** Valores de los factores del Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural escenario C1 asociado a la presa de relaves de Ticapampa.



#### **4.3.1.4. Índice de Severidad de los efectos sobre el medio socioeconómico derivados de la contaminación de los recursos hídricos superficiales debido a efluentes contaminantes: I<sub>S</sub> (C1SE)**

No se tiene en consideración por que no se dispone de suficiente información, y su análisis exige un nivel de conocimiento más profundo que el análisis preliminar de riesgos. No obstante, no parece que existan actividades económicas dependientes del agua del río Santa que pudieran verse afectadas en un recorrido de 5 km de aguas debajo de la presa.

#### **4.3.2. Escenario de generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas subterráneas: C2**

##### **4.3.2.1. Índice de Probabilidad de Ocurrencia de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos: I<sub>P</sub> (C2)**

El Índice de Probabilidad de Ocurrencia de la generación de efluentes contaminantes con efecto sobre las aguas subterráneas o I<sub>P</sub> (C2) se da en función del Factor de Vulnerabilidad (F<sub>V</sub>) dependiente de las características intrínsecas de los acuíferos o masas de agua subterráneas, el Factor de Toxicidad (F<sub>TOX</sub>) de los residuos y el Factor de Superficie Desprotegida (F<sub>SD</sub>), y se halla según la siguiente fórmula:

$$I_P (C2) = F_V \times F_{TOX} \times F_{SD}$$

En este caso no existe acuífero o masa de agua reconocida de aguas subterráneas que pudiese verse afectada. Por lo tanto la Probabilidad de que se produzca este escenario de contaminación es nula, es decir, I<sub>P</sub> (C2) = 0. Obviamente no procede la evaluación de la Severidad de dicho escenario.



### 4.3.3. Escenario de movilización de material particulado por acción del viento: C3

#### 4.3.3.1. Índice de Probabilidad de Ocurrencia de la movilización de material particulado por acción del viento: $I_P$ (C3)

Para el cálculo de este Índice se ha valorado la Erodibilidad Eólica ( $E_e$ ), el Factor de Aridez del Clima ( $F_{AR}$ ), el Factor de Velocidad del Viento  $V_V$ , y el Factor Superficial del Depósito, que depende de la Superficie Total Expuesta del Depósito ( $F_S$ ) y el grado de falta de Cobertura Vegetal ( $F_{DS}$ ). Se calcula con la formula siguiente:

$$I_P (C3) = E_e \times F_{AR} \times V_V \times F_S \times F_{DS}$$

El llamado Factor de Erodibilidad Eólica ( $E_e$ ) que es de carácter cualitativo, se ha determinado según el análisis granulométrico de la muestra compuesta realizado por Jara (2011), lo cual utilizo las mallas Tyler N° 100, 150, 200 y 400, a las que corresponden con aperturas de celda de 150, 106, 74, y 37  $\mu m$  respectivamente, como se muestran en la siguiente tabla:

Malla N°	Abertura Micrones	Peso Retenido (g)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado
100	150	27,15	10,22	10,22	89,78
150	106	37,65	14,17	24,39	75,61
200	74	30,13	11,34	35,73	64,27
400	37	80,11	30,15	65,88	34,12
< 400	< 37	90,66	34,12	100,00	0,00
<b>TOTAL</b>		<b>265,70</b>	<b>100,00</b>		

**Tabla 4.6** Análisis granulométrico de la muestra compuesta de la presa de relaves Ticapampa (Fuente: Jara, 2011).

Partiendo de estos datos, y según la correspondiente tabla y el gráfico de la metodología del IGME, es posible asignar valores del Factor Erodibilidad Eólica ( $E_e$ ) en función del contenido en partículas inferiores a 75  $\mu m$ . En el caso estudiado, dicho contenido es de 64,27% aproximadamente, por lo que



excede el valor de 50% y por lo tanto el Factor de Erodibilidad Eólica ( $E_e$ ) resulta 5.

El Índice de Aridez de Martonne ( $I_a$ ) ha sido aplicado en metodologías de análisis de riesgo en suelos contaminados para evaluar el grado de humedad de los materiales y la Probabilidad de que se movilicen las partículas generadoras de polvo, en función del grado de Aridez del clima, siendo la ecuación para el cálculo de dicho índice:

$$I_a = P / (T+10)$$

Donde:

- $I_a$  = Índice de Aridez de De Martonne
- $P$  = Precipitación media anual en mm
- $T$  = Temperatura media anual en °C

Los datos se obtienen de la página web <http://es.climate-data.org/location/998203/> Donde la precipitación media anual es de 715 mm y la temperatura media anual es 9,3 °C

$$I_a = 715 / (9,3 + 10) = 37$$

El Factor de Aridez se calcula a partir del valor del Índice de De Martonne. En la zona donde se encuentra la presa, este índice resulta ser 37 y la clasificación de zonas climáticas según el Índice de Aridez de De Martonne que le corresponde es zona húmeda, tal como se muestra a continuación (Tabla 4.7):

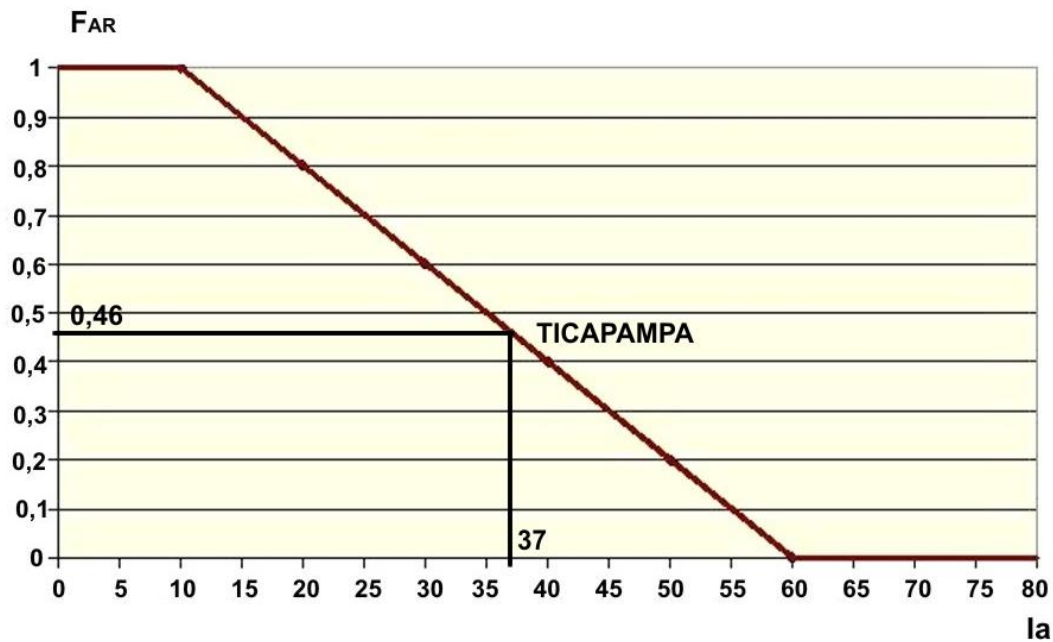
Clasificación de zonas climáticas según el índice de aridez de De Martonne ( $I_a$ )	
Zonas climáticas	Valor de $I_a$
Desierto (Hiperárida o árida extrema)	0 – 5
Semidesierto (Árida o esteparia)	5 – 10
Semiárida de tipo mediterráneo	10 – 20
Sub-húmeda	20 – 30
Húmeda	30 – 60
Hiperhúmeda o per-húmeda	> 60

**Tabla 4.7** Clasificación de zonas climáticas según el Índice de Aridez de De Martonne (Fuente: IGME)



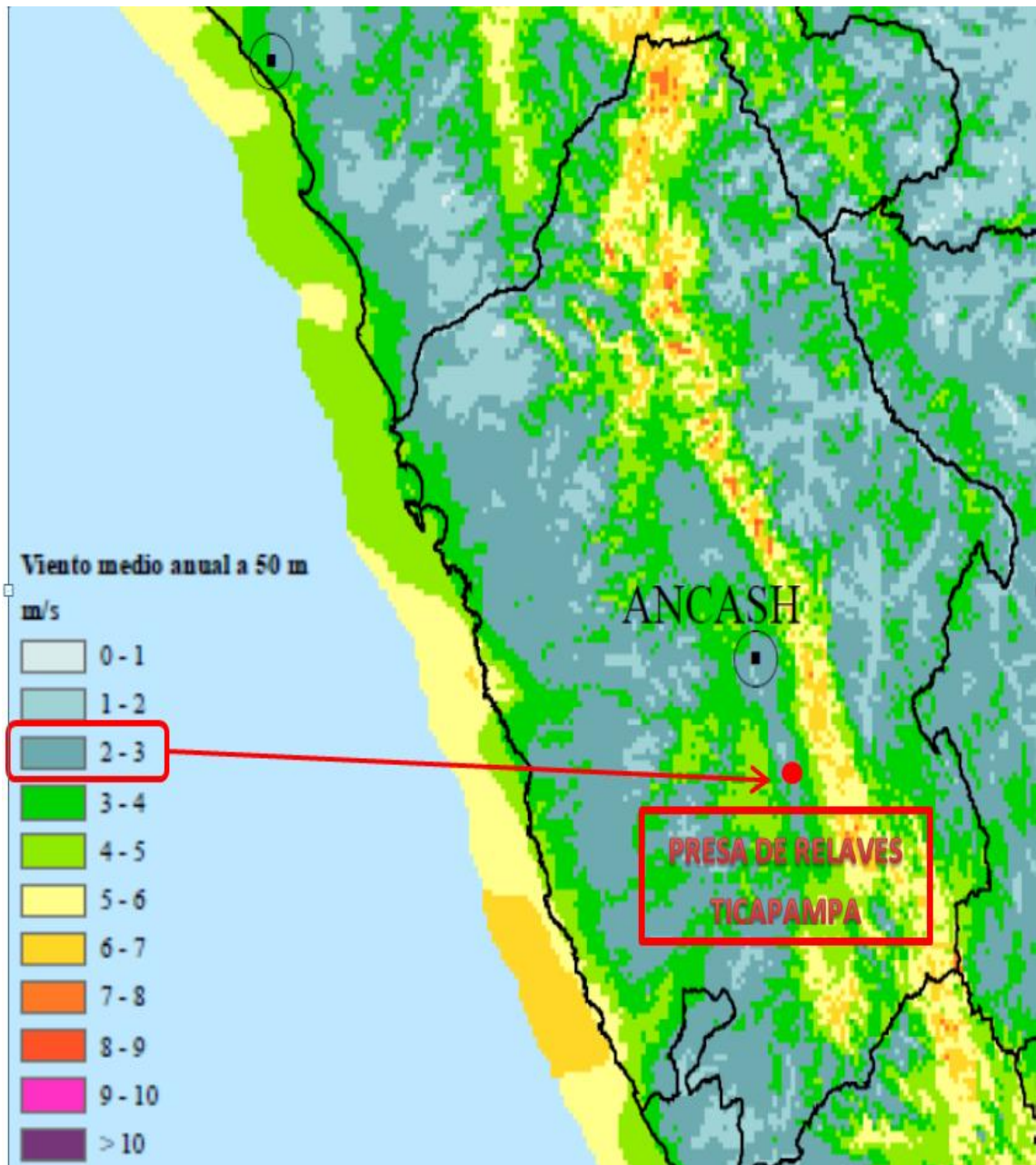


Entonces  $F_{AR}$  resulta 0,46 según la gráfica siguiente:



**Figura 4.9** Gráfica que permite asignar el valor del Factor de Aridez ( $F_{AR}$ ) en función de los datos obtenidos para Índice de Aridez de De Martonne ( $I_a$ ) para la presa de relaves de Ticapampa.

El Factor de Velocidad del Viento ( $V_V$ ) es un parámetro que refleja la velocidad media anual (m/s), por tanto para la valoración de la presa se tiene que, en Perú existe un Atlas Eólico Nacional desarrollado por el Ministerio de Energía y Minas. Lo cual proporciona la velocidad media anual del viento, a una altura de 50 m, en la zona de Ancash. De ahí se deduce que la velocidad media del viento es 2 a 3 m/s en Recuay y Ticapampa, como se puede observar en la siguiente figura:

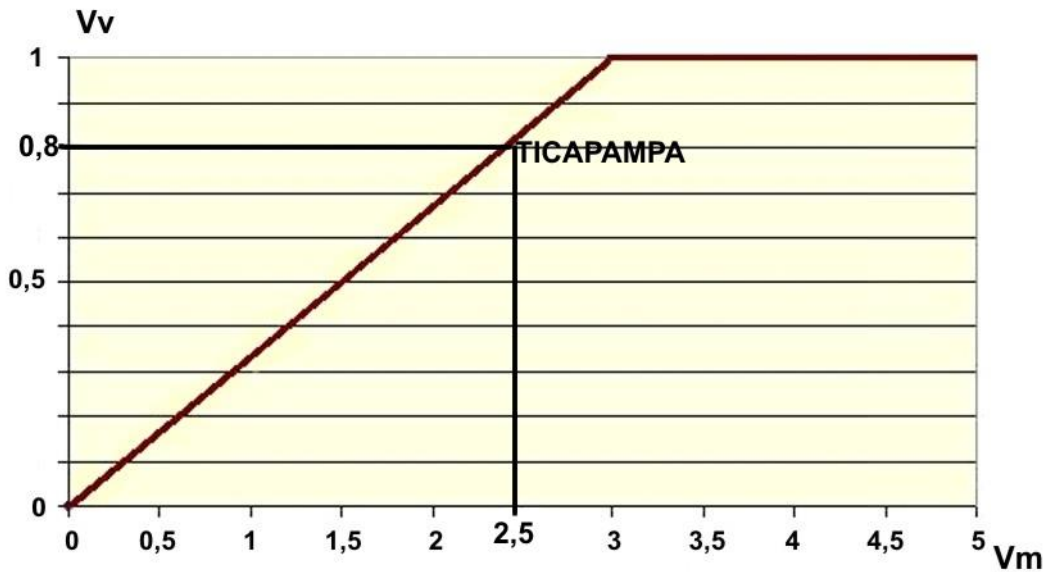


**Figura 4.10** Ubicación aproximada de la presa de relaves Ticapampa según el Atlas Eólico Nacional desarrollado por el Ministerio de Energía y Minas con viento medio anual a 50 m de altura.

En este caso se le asignó un valor medio de 2,5 m/s para el Factor de Velocidad del Viento ( $V_V$ ), según la gráfica de la Figura 4.11, el Factor de



Velocidad del Viento ( $V_V$ ) resulta 0,8.



**Figura 4.11** Gráfica que permite asignar valores del Factor del Viento ( $V_V$ ) en función de la Velocidad media ( $V_m$ ) en una estación cercana de Ticapampa.

Para hallar el Factor Superficial del Depósito ( $F_S$ ), como se mencionó en el apartado anterior se realizó en función de la Superficie expuesta ( $S_{EX}$ ) utilizando la herramienta de medidas espaciales (Google Earth con vista en tierra), obteniendo un valor de 1. También se sabe que esta superficie está completamente desprotegida.

Al final el resultado que se obtiene al emplear los valores citados de los factores que contribuyen al Índice de Probabilidad de Ocurrencia de la movilización de material particulado por acción del viento  $I_P$  (C3) es igual a 1,8 como se resume en la tabla a continuación:

Erodibilidad Eólica ( $E_e$ )	Factor de Aridez del clima ( $F_{AR}$ )	Factor de Velocidad del Viento ( $V_V$ )	Factor Superficial ( $F_S$ )	Índice de Probabilidad de Ocurrencia de escenario (C3) $I_P (C3) = E_e \times F_{AR} \times V_V \times F_S$
5	0,46	0,8	1	1,8

**Tabla 4.8** Valores de los factores para hallar el Índice de Probabilidad de Ocurrencia de escenario C3 asociado a la presa de relaves de Ticapampa.



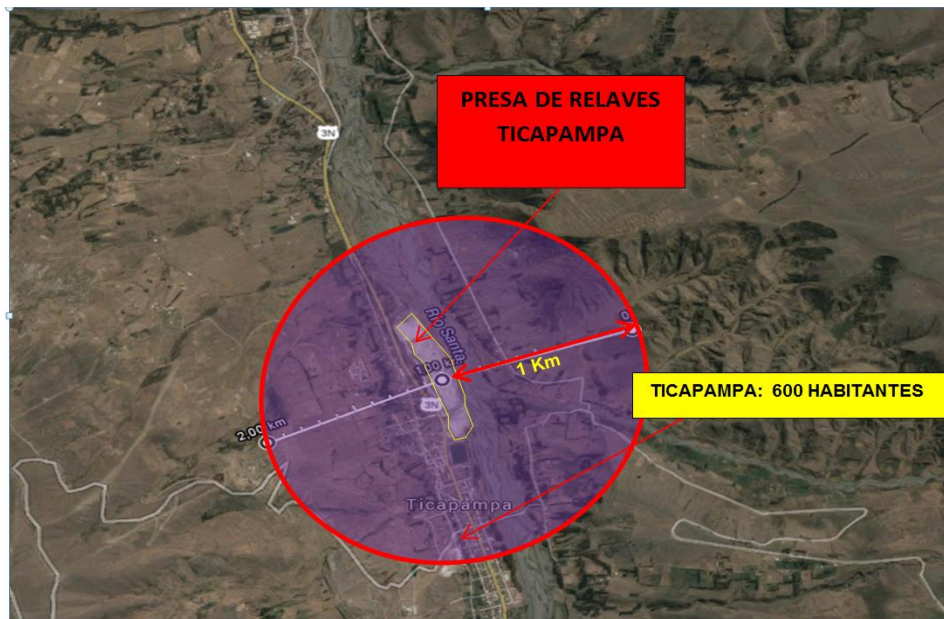
#### 4.3.3.2. Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población derivados de la movilización de material particulado por acción del viento: $I_S$ (C3PO)

La Severidad de los daños derivados de la movilización de material particulado (PM) por acción del viento de la superficie de depósitos de residuos mineros abandonados se evalúa en función población expuesta ( $P_{EX}$ ) hasta un radio de 1 km de distancia al depósito, la Vulnerabilidad de la población ( $V_P$ ) que es en función del tipo de uso más sensible o vulnerable expuesto, o del peor escenario de exposición; y de la exposición a concentraciones de PM de la población ( $F_{PM}$ ) y el Factor de capacidad contaminante del polvo ( $F_{CO}$ ), se emplea la siguiente fórmula:

$$I_S (C3PO) = [0,5 P_{EX} + 0,5 (V_P \times F_{PM})] \times (1 + 5 \times F_{CO}/100)$$

El Factor de la población expuesta ( $P_{EX}$ ) alcanza el valor de 2,5 según la correspondiente tabla de valoración de la exposición de la población al material particulado emitido desde depósitos de residuos, porque Ticapampa es la población más cercana y tiene 600 habitantes (según la Municipalidad Distrital de Ticapampa, 2015).

El Factor de Vulnerabilidad de la población expuesta ( $V_P$ ), viene a ser expresado por el grado de susceptibilidad de los receptores ante la contaminación por material particulado. Se valoró en función de la población localizada en un radio de 1 km en torno a la presa de relaves de Ticapampa y teniendo en cuenta los criterios expuestos relativos al tiempo de exposición y susceptibilidad de la población en exposición, orientados según la metodología del IGME. Éste Factor toma un valor máximo de 5.



**Figura 4.12** Guía para la valoración del Factor población expuesta ( $P_{EX}$ ) en un radio de 1km en torno a la presa de relaves Ticapampa.

El Factor de Exposición ( $F_{PM}$ ) a concentraciones de polvo, se determinó también en función de la distancia de la que se encuentra la población más cercana, que toma el valor de 1 por la distancia entre el foco contaminante (presa de relaves Ticapampa) y el pueblo de Ticapampa que está a menos de 100 m de distancia.

La valoración del Factor de capacidad contaminante del polvo ( $F_{CO}$ ) se realiza en función del grado de toxicidad del material particulado. En este caso se realizó a partir de los valores obtenidos en el cálculo del Índice de Contaminación (IC), observándose que es de toxicidad alta. El  $F_{CO}$  resulta 5.

A continuación se tiene el resumen del cálculo para el Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población derivados de la movilización de material particulado por acción del viento ( $I_S$  (C3PO):

Población Total ( $P_{EX}$ )	Factor de Vulnerabilidad ( $V_P$ )	Factor de Exposición a concentraciones de PM ( $F_{PM}$ )	Factor de capacidad contaminante del polvo ( $F_{CO}$ )	Índice de Severidad sobre las personas o la población del de escenario (C3) $I_S$ (C3PO) = $[0,5 P_{EX} + 0,5 (V_P \times F_{PM})] \times (1 + 5 \times F_{CO}/100)$
2,5	5	1	5	4,7

**Tabla 4.9** Valores de los factores para hallar el Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población del escenario C3 asociado a la presa de relaves de Ticapampa.



#### 4.3.3.3. Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la movilización de material particulado por acción del viento $I_S$ (C3NA)

Este Índice pretende valorar los efectos directos e indirectos sobre los ecosistemas próximos. La Severidad del daño dependerá de las concentraciones de material particulado, tomando en cuenta el Factor de Exposición de los Ecosistemas ( $F_{PM}$ ), el Factor de Vulnerabilidad del medio natural ( $V_E$ ) y el Factor de Capacidad de Contaminación ( $F_{CO}$ ). Para su cálculo se utiliza la formula a continuación:

$$I_S \text{ (C3NA)} = (V_E \times F_{PM}) \times (1 + F_{CO}/100)$$

El cálculo del Factor de Vulnerabilidad del medio natural ( $V_E$ ) fue realizado en función de la distancia en que se encuentra la presa de relaves y el pueblo de Ticapampa. Como se ha explicado anteriormente se sabe que la zona más vulnerable se encuentra dentro de la Biosfera del Huascarán, por lo tanto toma el valor máximo que es 5.

El Factor de Exposición de los Ecosistemas ( $F_{PM}$ ) más sensibles al material particulado emitido desde depósitos de la presa de relaves de Ticapampa, también se determinó en función de la distancia a la que se encuentra el uso más vulnerable, lo cual toma el máximo valor que es igual a 1.

El Factor de capacidad contaminante del polvo ( $F_{CO}$ ), al igual que en la valoración de la Severidad de los efectos sobre la población, se hace a partir de los valores obtenidos del Índice de Contaminación (IC), que resultó ser 5.

Entonces se ha definido los resultados para la valoración del Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la movilización de material particulado por acción del viento  $I_S$  (C3NA), en la tabla siguiente:

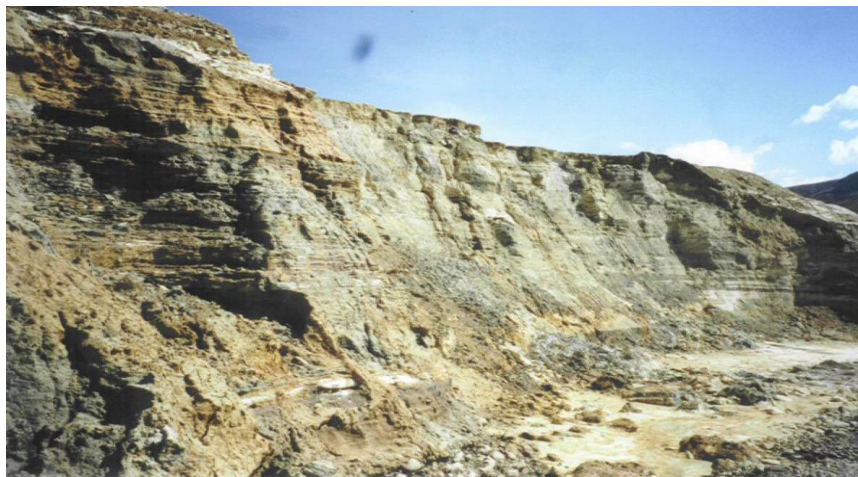
Factor de Vulnerabilidad (V <sub>E</sub> )	Factor de Exposición a concentraciones de PM (F <sub>PM</sub> )	Factor de capacidad contaminante del polvo (F <sub>CO</sub> )	Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural del escenario (C3) I <sub>S</sub> (C3NA) = (V <sub>E</sub> × F <sub>PM</sub> ) × (1 + F <sub>CO</sub> /100)
5	1	5	5

**Tabla 4.10** Valores de los factores para hallar el Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural población del escenario C3 asociado a la presa de relaves de Ticapampa

#### 4.3.3.4. Índice de Severidad de los efectos sobre el medio socioeconómico derivados de la movilización de material particulado por acción del viento I<sub>S</sub> (C3SE)

No procede a ser valorada, puesto que no existe constancia.

#### 4.3.4. Escenario de emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica : C4



**Figura 4.13** Erosión muy notable en el pie del talud del depósito de relaves de Ticapampa junto al río Santa.

#### 4.3.4.1. Índice de Probabilidad de Ocurrencia de emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica I<sub>P</sub> (C4)

Este índice pretende valorar la Probabilidad de que el arrastre de sedimentos procedentes de los depósitos de residuos mineros pueda afectar a poblaciones cercanas, suelos y cauces de agua; una vez desplazados y depositados en ellos. Este índice es valorado en función del Estado Erosivo (E<sub>E</sub>), el Factor de



erosividad ( $F_{ER}$ ), el Factor de control de la erosión ( $VM$ ), Factor Superficie ( $F_{ST}$ ) y el Factor de Contaminación ( $F_{CO}$ ), como se muestra en la siguiente fórmula:

$$I_P (C4) = E_E \times F_{ER} \times F_{ST} \times VM \times F_{CO}$$

A continuación se describirá el cálculo de cada uno de los factores de probabilidad:

El Estado Erosivo ( $E_E$ ), se determina en función del desarrollo de rasgos erosivos que son reconocibles en el talud del depósito de residuos mineros. Según la tabla correspondiente del manual del IGME, y considerando la situación en que se encuentra la presa, se asignó el valor de 1 porque los taludes de la presa presentan deslizamientos someros, y cárcavas muy notorias.

El Factor de erosividad ( $F_{ER}$ ), está asociado a la erosividad climática del lugar donde se asienta la presa de relaves. Para este caso se utilizarán datos de referencia en toda la zona de la Cuenca Media y Alta de del Río Cañete, está situada en el Sur del departamento de Lima y Región central de Perú, los suponen que presentan similitud en cuanto a los gradientes altitudinales para la precipitación hídrica, tipología del terreno, etc., por lo tanto el Factor R de la USLE sale en un rango aproximado entre 258 a 308 (Ramos, 2011), y utilizando la tabla se obtiene 0,9.

El Factor de control de la erosión ( $VM$ ), Se valoró en función de la tabla de valores realizada por el IGME. Cuando no hay nada que proteja las superficies de la erosión, se considera  $VM = 1$ .

Para el llamado Factor Superficie ( $F_{ST}$ ), dependiente de la Superficie Total de los taludes del depósito de residuos, como ya se explicado se tiene que la Superficie Total expuesta de la presa de relaves Ticapampa es de 11, 38 ha. La Superficie Total expuesta en taludes y/o diques es aproximadamente de 5, 02 ha, por lo tanto el Factor Superficie ( $F_{ST}$ ) resulta 1.





El Factor de Contaminación ( $F_{CO}$ ), es asociado a los sedimentos generados en la estructura a partir del conocimiento de contenidos totales en elementos del residuo. El IGME evalúa estos contenidos analizando muestras compuestas de 30 submuestras superficiales.

Las medidas obtenidas se comparan con el fondo geoquímico, usando una fórmula para obtener el que se ha denominado Índice de Contaminación (IC).

$$IC = 1/n \times \sum^n \frac{[X]}{NF_x}$$

Dónde:

-[X] es la concentración medida en el residuo del elemento X

- $NF_x$  es el nivel de fondo de suelos correspondiente al elemento X en la zona donde se sitúa el depósito que se esté evaluando.

Para el nivel de fondos de los suelos se utilizó como referencia un estudio geoquímico-estadístico de metales pesados en sedimentos de quebradas de un sector de Río Santa, cuyos datos pueden representar la media regional de los metales pesados en suelos para la cuenca superior del Río Santa, considerando en bajo nivel de diferenciación edáfica de los suelos (Rivera H. et al., 2007).

Para la obtención de los datos de Concentración de metales pesados en los sedimentos de la presa de relaves Ticapampa se utilizó información de los contenidos totales obtenidos por digestión con ácidos fuertes para metales pesados de una muestra compuesta de relaves (Jara, 2011), como se muestra a continuación:



ELEMENTOS ( $\mu\text{g/g}$ )	Concentración de metales pesados en residuos de la presa Ticapampa (Jara, 2011)	Media Regional de los metales pesados en sedimentos de la cuenca alta del Río santa (Rivera H. et al., 2007)
As	20200	47,55
Cd	41	1,23
Co	32	-
Cr	16	18,35
Cu	404	30,34
Hg	-	0,05
Mo	-	2,14
Ni	-	18,74
Pb	3439	38,39
V	-	40,60
Zn	3676	169,86
<b>IC</b>	<b>116,53</b>	

**Tabla 4.11** Comparación de datos obtenidos por digestión con ácidos fuertes para metales pesados de una muestra compuesta en los sedimentos de la presa de relaves de Ticapampa (Jara, 2011) y la media de los metales pesados en Ancash (Rivera H. et al., 2007), utilizado como Nivel de Fondo de los suelos.

**IC:** Medida del Índice de Contaminación.

-: Datos no obtenidos

Con el valor de IC obtenido se puede asignar el correspondiente valor del Factor de Contaminación ( $F_{CO}$ ). Cuando IC supera el valor de 20 se asigna el máximo valor de  $F_{CO}$  que es 5. Este es el caso de los residuos de Ticapampa, cuyo IC es 116,53, muy alto, por lo que el Factor de Contaminación ( $F_{CO}$ ) obtiene un valor de 5.

Con todos los datos obtenidos para el cálculo de los factores, el Índice de Probabilidad de Ocurrencia de emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica  $I_P$  (C4) resulta 4,5. El procedimiento se resume en la Tabla 4.12, a continuación:



Estado Erosivo ( $E_E$ )	Factor de erosividad ( $F_{ER}$ )	Factor Superficie ( $F_{ST}$ )	Factor de control de la erosión (VM)	Factor de capacidad contaminante del polvo ( $F_{CO}$ )	Índice de Probabilidad de Ocurrencia del escenario (C4) $I_P(C4)=E_E \times F_{ER} \times F_{ST} \times VM \times F_{CO}$
1	0,9	1	1	5	4,5

**Tabla 4.12** Valores de los factores para hallar el Índice de Ocurrencia del escenario C4 asociado a la presa de relaves de Ticapampa.

#### 4.3.4.2. Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población derivados de la afección a suelos por emisión de sedimentos contaminantes procedentes de los residuos mineros: $I_S(C4PO)$

En cuanto a la severidad de este índice, se valora de forma semejante a la forma de valorar contaminación por elementos disueltos. Para la población depende de dos elementos que se suman: el posible aprovechamiento directo para consumo humano ( $P_{EX}$ ) de las masas de agua que pudieran verse afectadas hasta una distancia de 5000 m, y el posible uso del agua (también hasta 5000 m) para usos que indirectamente afecten a personas  $F_{SUP} \times V_P$  (como por ejemplo el riego de productos agrícolas). Es calculado con siguiente fórmula:

$$I_S(C4PO) = 0,5 P_{EX} + 0,5 (F_{SUP} \times V_P)$$

Como se ha determinado anteriormente, los pueblos de Ticapampa que está a menos de 100 m y Recuay a 3,5 km aproximadamente aguas abajo de la presa de relaves, no se abastecen del agua del río Santa para consumo humano, ni la emplean para para usos agrarios. Por todo esto, el Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población derivados de la afección a suelos por emisión de sedimentos contaminantes procedentes de los residuos mineros ( $I_S(C4PO)$ ) será igual a 0.



#### **4.3.4.3. Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la afección a suelos y aguas por emisión de sedimentos contaminantes procedentes de los residuos mineros: $I_S$ (C4NA)**

Este índice pretende valorar la gravedad de los posibles efectos sobre los seres vivos. Por la proximidad al río y la situación de la presa de relaves la incorporación de partículas en suspensión a la corriente del río Santa puede producir el incremento de la turbidez del medio y la disminución de la entrada de la luz solar, provocando una disminución de la actividad biológica de las plantas, animales y microorganismos acuáticos, así como la afectación sobre la fotosíntesis de la flora acuática. Este índice es calculado en función de la Vulnerabilidad de los Ecosistemas ( $V_E$ ) y de la Exposición al contaminante ( $F_{SUP}$ ) y resuelto con siguiente ecuación:

$$I_S (C4NA) = F_{SUP} \times V_E$$

Por la naturaleza del río Santa en la zona, se considera que su vulnerabilidad es máxima. El Índice  $I_S$  (C4NA) resulta 5, al igual que se describió en el apartado 4.3.1.3.

#### **4.3.5. Escenario de contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades: CD**

##### **4.3.5.1. Índice de Probabilidad de Ocurrencia del contacto directo con efectos sobre las personas y la población de los residuos mineros: $I_P$ (CD)**

Este índice depende de la concentración de elementos tóxicos en los residuos ( $F_{CCD}$ ), el grado de accesibilidad ( $F_{ACC}$ ), y la distancia a las zonas afectadas más cercanas o Factor de proximidad ( $P_{RR}$ ) del depósito de relaves. Este escenario sólo afecta a personas o población. Se resuelve con la siguiente ecuación:



$$I_P (CD) = F_{CCD} \times F_{ACC} \times P_{RR}$$

El Factor de concentración de contacto directo ( $F_{CCD}$ ), se mide sobre la base de los contenidos totales de elementos más tóxicos para personas (As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb) medidos en los residuos. En la metodología del IGME, la concentración total de estos elementos traza se compara con los Niveles Genéricos de Referencia para uso urbano.

Como se aprecia en la Tabla 4.13, los niveles elevados de concentración de metales de As, Cd y Pb superan el Estándar de Calidad Ambiental para usos del suelo Residencial / parque según la normativa peruana D.S. N° 002-2013-MINAM, que para este caso se considera equivalente a los Niveles Genéricos de Referencia (NGR) para uso urbano, por lo tanto el Factor  $F_{CCD}$  asume el máximo valor, igual a 5. Destaca muy especialmente el altísimo contenido de en As total y los niveles elevados de Pb y Zn.

ELEMENTOS ( $\mu\text{g/g}$ )	PRESA DE RELAVES TICAPAMPA	Estándar de Calidad Ambiental para usos del suelo Residencial/ parque D.S. N° 002-2013-MINAM (NGR)
As	20200	50
Cd	41	10
Cu	404	
Pb	3439	140
Zn	3676	

**Tabla 4.13** Valores de los contenidos en metales pesados de la presa de relaves Ticapampa tomados de Jara (2011) en comparación con el Estándar de Calidad Ambiental para usos del suelo Residencial/ parque D.S. N° 002-2013-MINAM (Peruana) que sirvió como los Niveles Genéricos de Referencia (NGR).

Para el Factor de accesibilidad ( $F_{ACC}$ ) correspondiente a la presa de relaves de Ticapampa,  $F_{ACC}$  es igual a 0,75 según la tabla del manual del IGME, ya que la presa no tiene restricciones, letreros o controles de acceso.

Para el Factor de proximidad ( $P_{RR}$ ), la zona habitada más cercana, como ya se sabe es la población de Ticapampa. Según las tablas para la valoración de este punto recogidas en el manual del IGME, la presa está a menos de 250 m de la población, por lo tanto  $P_{RR}$  resulta 1.



Teniendo todos los factores para el Índice de Probabilidad de Ocurrencia del contacto directo con efectos sobre las personas y la población de los residuos mineros  $I_P$  (CD), resulta 5 como se resume en la Tabla 4.14, que se muestra a continuación:

Factor de concentración de contacto directo ( $F_{CCD}$ )	Factor de accesibilidad ( $F_{ACC}$ )	Factor de proximidad ( $P_{RR}$ )	Índice de Probabilidad de Ocurrencia del escenario (CD) $I_P$ (CD) = $F_{CCD} \times F_{ACC} \times P_{RR}$
5	0,75	1	3,75

**Tabla 4.14** Valores de los factores para hallar el Índice de Probabilidad del escenario de contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades ( $I_P$  (CD)) asociado a la presa de relaves de Ticapampa.

#### 4.3.5.2. Índice de Severidad del contacto directo con efectos sobre las personas y la población de los residuos mineros: $I_S$ (CD)

La Severidad de los daños derivados del contacto directo con los depósitos de residuos mineros, es en función del tiempo de exposición y de la vulnerabilidad de los receptores. Para ello se valora el tipo de uso del terreno que se esté dando sobre la presa. Como se sabe la población más cercana es Ticapampa, para cuyos habitantes resulta fácilmente accesible. Sin embargo, no se ha reconocido que existe ningún uso concreto salvo el posible uso ocasional, que se debe considerar de muy baja exposición. Por ello el  $I_S$  (CD) asignado es 1, según la tabla del método del IGME.

#### 4.3.6. Escenario de fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros: FPRE

##### 4.3.6.1. Índice de Probabilidad del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros: $I_P$ (FPRE)

Para el cálculo de la probabilidad de rotura de una presa de relaves (lodos) se considera una serie de factores o parámetros. Todos los factores descritos y



calculados a continuación se valorarán según las tablas correspondientes del manual de riesgos realizado por el IGME.

Los factores considerados son:

- **Diseño y Características Constructivas del Dique (DC):** Para valorar este Factor se considera un conjunto de subfactores los cuales se valoran en la Tabla 4.15, a continuación:

Valoración del Factor diseño y características constructivas del dique (DC)	
Criterio de valoración	Valoración del Factor
<b>Material de construcción del dique (Mat)</b>	
Lodos de flotación	16
<b>Método de recrecimiento del dique (Mc)</b>	
Aguas arriba	16
<b>Ángulo en grados del dique principal o talud general si existen bermas (<math>\theta</math>)</b>	
Entre 20 y menos de 30°: La presa tiene 25°	12
<b>Altura de la presa o de la suma de los diques (H)</b>	
Entre 15 y menos de 20 m : La presa presenta una altura promedio de 15 m	8
<b>Longitud del dique de coronación <math>L_D</math></b>	
Mayor de 500 m : El dique de coronación mide más de 500 m	8
<b>DC = Mat+Mc+<math>\theta</math>+H+<math>L_D</math></b>	<b>60</b>

**Tabla 4.15** Criterios de valoración del Factor de diseño y características constructivas del dique (DC) para la presa de relaves Ticapampa.

Para valorar la longitud del dique de coronación ( $L_D$ ), se ha considerado que este corresponde con el flanco este, el más cercano al río. La longitud del borde superior del talud a lo largo de este flanco supera los 500 m.

- **Volumen de residuos almacenados (VOL):** De acuerdo a la información obtenida del "Plan de prevención ante desastres, usos del suelo y medidas de mitigación" realizado por el Instituto Nacional de Defensa Civil de Perú (INDECI, 2004) la presa de relaves de Ticapampa presenta un total



aproximado de 2 250 000 m<sup>3</sup> de material, por lo que este Factor asume el máximo valor que es de 20.

- **Emplazamiento (EMP):** En función del emplazamiento, se ha observado que el ancho del cauce del río Santa es variable, es ancho en el sector de Ticapampa-Recuay debido a que presenta una fuerte erosión lateral del río Santa sobre sus márgenes. El cambio de gradiente del cauce indica que el río Santa, de un régimen erosivo de fondo, hoy se ha transformado en un río sedimentador, colmatándose en algunos sectores centrales e incrementando su erosión lateral, significándose un peligro para las poblaciones de Ticapampa y Recuay. A continuación (Tabla 4.16) se valora el Factor de emplazamiento en función de los criterios de valoración.

Valoración del Factor emplazamiento (EMP)	
Criterio de valoración	Valoración del Factor
<b>Tipología de presa según lugar del emplazamiento (T<sub>EMP</sub>)</b>	
Junto a cursos de agua ( <i>valley-bottom</i> ) en resto de tipologías de valle	64
<b>Material del sustrato o cimentación (Sus)</b>	
Suelo poco o nada consolidado	20
<b>EMP = T<sub>EMP</sub> + Sus</b>	<b>84</b>

**Tabla 4.16** Criterios de valoración del Factor emplazamiento (EMP) para la presa de relaves Ticapampa

- **Integridad Física de la presa (IF),** se obtiene directamente mediante una tabla de doble entrada en la que se relacionan, por un lado, las inestabilidades observadas en la presa y, por otro, el grado de erosión o estado erosivo del dique. En este caso se ha considerado que el valor del factor IF puede valer 80 (el máximo), dado que los diques muestran un grado elevado de erosión, con presencia de cárcavas, deslizamientos locales pequeños, grietas, etc.





- **Balance de Humedad de los residuos mineros y de los materiales que conforman el dique (BH):** El nivel de presión hidrostática o presión de poros del material que conforma y los residuos almacenados, es decir la posición del nivel freático, determina la estabilidad del dique, por lo tanto para hallar este factor se toma en cuenta una serie de subfactores.

La presa de relaves de Ticapampa no cuenta con laguna de decantación, no se cuenta con registros piezómetros realizados.

El Índice de Aridez de Martonne fue determinado anteriormente resultando 37, siendo un lugar húmedo.

Para la precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 100 años, se buscaron datos de una estación cercana, tal como Huaraz. Con los valores registrados en dicha estación y aplicando el método de distribución de Gumbel Tipo 1 (Apacla, 2010), se obtiene un valor de 73,71 mm en 24 h para dicho periodo de retorno.

En cuanto al caudal que ingresa a la presa, se encuentra que el río Santa pasa al lado, más no ingresa a dicha presa, pero esta es erosionada por la continua trayectoria del río, con aumento de caudales muy variantes de bajos a altos, estando situada en una zona fácilmente inundable en situaciones de crecida del río. En este caso se ha considerado el máximo valor para este factor.

Se presentan los factores valorados según los datos obtenidos, que se resume en la Tabla 4.17.



Valoración del Factor balance de humedad de los residuos que conforman la presa (agua freática)		Valoración del Factor
<b>Laguna de decantación (<math>L_d</math>)</b>		
Ausencia de laguna de decantación o completamente drenada		0
<b>Posición del nivel freático en el dique (<math>Fr</math>)</b>		
Sin evidencias o registros piezométricos		10
<b>Índice de Aridez de Martonne (<math>Ia</math>)</b>		
<b>Zonas climáticas</b>	$Ia = P/(T+10)$	
Húmeda	30-60	8
<b>Precipitación en 24 horas para un período de retorno de 100 años (<math>P_{24}</math>)</b>		
50 a menos de 75 mm		2
<b>Caudal de escorrentía que ingresa a la presa (<math>Q_E</math>)</b>		
Caudal de escorrentía muy alto		10
<b>Sistemas de drenaje interno y otras infraestructuras de evacuación, retención y desvío de las aguas de escorrentía (<math>D_E</math>)</b>		
Ausencia o sistemas de drenaje interno no operativos //Presencia de aliviaderos y/o canales perimetrales operativos		15
<b>Grado de revegetación (<math>R_v</math>)</b>		
Sin revegetación o con superficie o vegetación de bajo porte con cobertura inferior a 25%		5
<b><math>BH = L_d + Fr + Ia + P_{24} + Q_E + D_E + R_v</math></b>		<b>50</b>

**Tabla 4.17** Asignación de valores a los subfactores del balance hídrico (BH) relativos a la posición de la laguna de decantación, la posición del nivel freático en presas de residuos, entradas y salidas de agua sobre los residuos mineros para la presa de relaves Ticapampa

➤ **Peligrosidad asociada al Emplazamiento (PEM)**

Perú es considerado como una de las regiones de más alta actividad sísmica, ya que está en una parte del Cinturón Circumpacífico. La presa de relaves se encuentra en la región de Ancash, la cual cuenta con antecedentes muy catastróficos en su historial sísmico.

La Mayor Aceleración para Sismo Extremo es de 0,536 g según el análisis determinístico del peligro Sísmico realizada para la presa de relaves



Ticapampa (Milla, 2011), con esto la valoración resulta máxima con una puntuación de 20.

Sumando todos los factores que se han ido describiendo en los anteriores apartados, se obtiene el valor de la Peligrosidad ( $P_{ePRE}$ ), entendida como susceptibilidad ante la posible rotura del talud y/o dique. La suma máxima teórica puede alcanzar el valor de 400 puntos. En este caso la suma total puntúa 314, lo cual se considera de muy alta Peligrosidad porque se encuentra en el rango entre  $>300$  según la tabla de puntuación de este Factor.

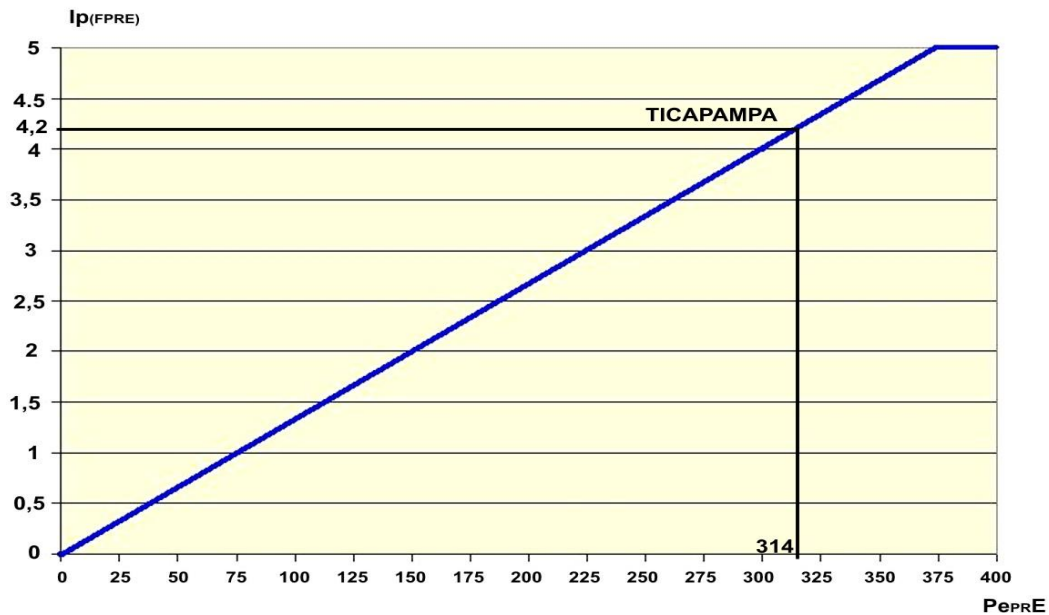
Puntuación $P_{ePRE}$	
<b>&gt;300</b>	<b>Muy Alta</b>
<b>225-300</b>	<b>Alta</b>
<b>150-225</b>	<b>Media</b>
<b>75-150</b>	<b>Baja</b>
<b>&lt;75</b>	<b>Muy baja</b>

**Tabla 4.18** Valores del Factor de Peligrosidad ante la rotura de  $P_{ePRE}$  para la presa de relaves Ticapampa

El valor del Índice de Probabilidad del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros  $I_P$  (FPRE), se obtiene del gráfico siguiente, resultando un valor de 4,2.



$I_S$  (CD) asignado es 1



**Figura 4.14** Valoración del Índice de Probabilidad de Ocurrencia ( $I_P$  (FPRE)) en función de la Peligrosidad ( $P_{PRE}$ ) para la presa de relaves Ticapampa.

#### 4.3.6.2. Índice de Severidad de los efectos sobre las personas y la población derivado del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros $I_S$ (FPREPO).

En cuanto a la Severidad del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros, dependerá en primer lugar del posible recorrido de los relaves en situación de rotura. Para su determinación se usa la siguiente fórmula empírica:

$$D_{max} = 1,61 \times (H \times V_F)^{0,66}$$

Dónde:

- ✓  $D_{max}$  es la distancia máxima recorrida por el flujo de lodos
- ✓  $H$  es la altura de la presa, la presa presenta una altura de 15 m
- ✓  $V_F$  es el volumen vertido que a su vez puede ser estimado por la expresión:

$V_F = 0,354 \times (V_T^{1,01})$  la cantidad en millones de metros cúbicos de material vertido.



Aplicando la fórmula y con los datos resulta:

$$D_{\max} = 1,61 \times \{15 \times (0,354 \times (2,25^{1,01}))\}^{0,66}$$

$$D_{\max} = 8,32 \text{ km}$$

Con los datos de las características de la presa, resulta una distancia de unos 8,32 km de recorrido.

Para la evaluación de la severidad de los posibles efectos sobre personas y el medio habrá que analizar la posible presencia de elementos expuestos a la hipotética riada de lodo hasta el alcance considerado de 8,32 km. En este sentido puede ser útil analizar el recorrido y el área que intuitivamente es más probable que pueda verse afectada sobre mapas de suficiente detalle.

Para el caso de la Severidad sobre la población, el Índice  $I_S$  (FPREPO) se asignará en función: del valor del Factor población expuesta ( $P_{EX}$ ) en el peor de los escenarios, la ecuación para su cálculo es la siguiente:

$$I_S (\text{FPREPO}) = P_{EX}$$

Utilizando la tabla de valoración del manual de riesgo del IGME resulta 4,75, pues si ocurriera un evento de tal magnitud afectaría directamente a la población de Recuay, la cual se encuentra a 3,5 km aguas abajo de la presa de relaves de Ticapampa. Dicho poblado cuenta con más 2000 habitantes.

#### **4.3.6.3. Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural derivado del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros $I_S$ (FPRENA).**

En el caso de elementos del medio natural, la Severidad de los daños será función de los valores de conservación de los ecosistemas afectados y de su vulnerabilidad ( $V_E$ ), su fórmula es la siguiente:



$$I_s (\text{FPRENA}) = V_E$$

También se ha descrito en los anteriores apartados, que la zona expuesta se encuentra dentro de la Reserva de la Biosfera del Huascarán, por tanto el área asume el máximo valor que es 5.

#### 4.3.6.4. Índice de Severidad de los efectos sobre el medio socioeconómico derivado del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros $I_s$ (FPRESE).

Este índice se valora según el servicio esencial más vulnerable expuesto ( $V_{SE}$ ), que viene a ser una “medida del valor” de los elementos expuestos, en función de su valor patrimonial y carácter prioritario desde el punto de vista social y económico, la fórmula para determinar este índice es la siguiente:

$$I_s (\text{FPRESE}) = V_{SE}$$

Este índice se valora con la Tabla 4.19, que se expone a continuación:

Valoración de la Vulnerabilidad económica del medio socioeconómico expuesto en zona de riesgo derivado del fallo del dique de contención o rotura del talud exterior de una presa de lodos	
Criterio de valoración	$V_{SE}$
Patrimonio cultural protegido (BIC, etc.)	5
Actividad económica prioritaria en la zona de estudio. Servicios esenciales (hospitales, etc.) Infraestructuras vitales (abastecimiento agua y energía). Vías de comunicación (carretera o ferrocarril de interconexión externa (vías de alta capacidad, RIGE, AVE, etc.)	4
Otras actividades económicas secundarias. Vías de comunicación red secundaria e infraestructuras no vitales y servicios no esenciales.	3
Afección a servicios, infraestructuras y actividades económicas de escasa importancia	2
Afección a elementos sin ningún valor cultural, productivo o de escaso aprovechamiento	1

**Tabla 4.19** Criterios de valoración de la Vulnerabilidad del patrimonio cultural, sistema productivo, infraestructuras y servicios esenciales en la zona de riesgo por fallo de dique de contención o rotura del talud exterior de una presa de lodos.



El resultado que se obtiene de la valoración es 4, porque existe una carretera principal de importancia para las conexiones de las poblaciones del Callejón de Huaylas, siendo la única vía asfaltada que comunica los distintos pueblos de ese valle, pudiendo verse afectadas diversas actividades económicas, como el turismo, transporte de personas, asistencia a la población comercio, etc. En Ticapampa existe una losa deportiva que se encuentra en un sector colindante a la presa de relaves y que también pudiera verse afectada. Por último, a 3,5 km aguas abajo se encuentra Recuay, donde se ubican diversas infraestructuras vulnerables como son un Instituto Superior Tecnológico, un colegio, un estadio y un mini complejo deportivo. (INDECI, 2004). Se ha consultado documentación del INGEMMET (1982), donde se constata una rotura de la presa de relaves de Ticapampa, a causa de un sismo en el año 1971, la cual dejó como saldo tres muertos, la destrucción de viviendas, y la interrupción de la carretera Huaraz–Lima.

Para finalizar toda la evaluación de riesgos realizadas se resume según el formato del IGME, mediante la correspondiente matriz de evaluación de riesgos, como se muestra en la ficha resumen de evaluación de riesgos del ANEXO II.



#### 4.4. VALORACIÓN DEL RIESGO CON EL MÉTODO DEL ÁRBOL DE FALLOS (FTA):

Para la aplicación del FTA se usó información según el método desarrollado por el IGME, a partir de ello, se pudo deducir según la matriz de valoración de riesgos que, los peores escenarios son la posible rotura por falla de la presa de relaves a partir de inundaciones graves que afectan al pie del dique y la generación de aguas ácidas provenientes de la presa de relave de Ticapampa, en la tabla siguiente se muestra la valoración en la matriz, desarrollada según el método IGME.

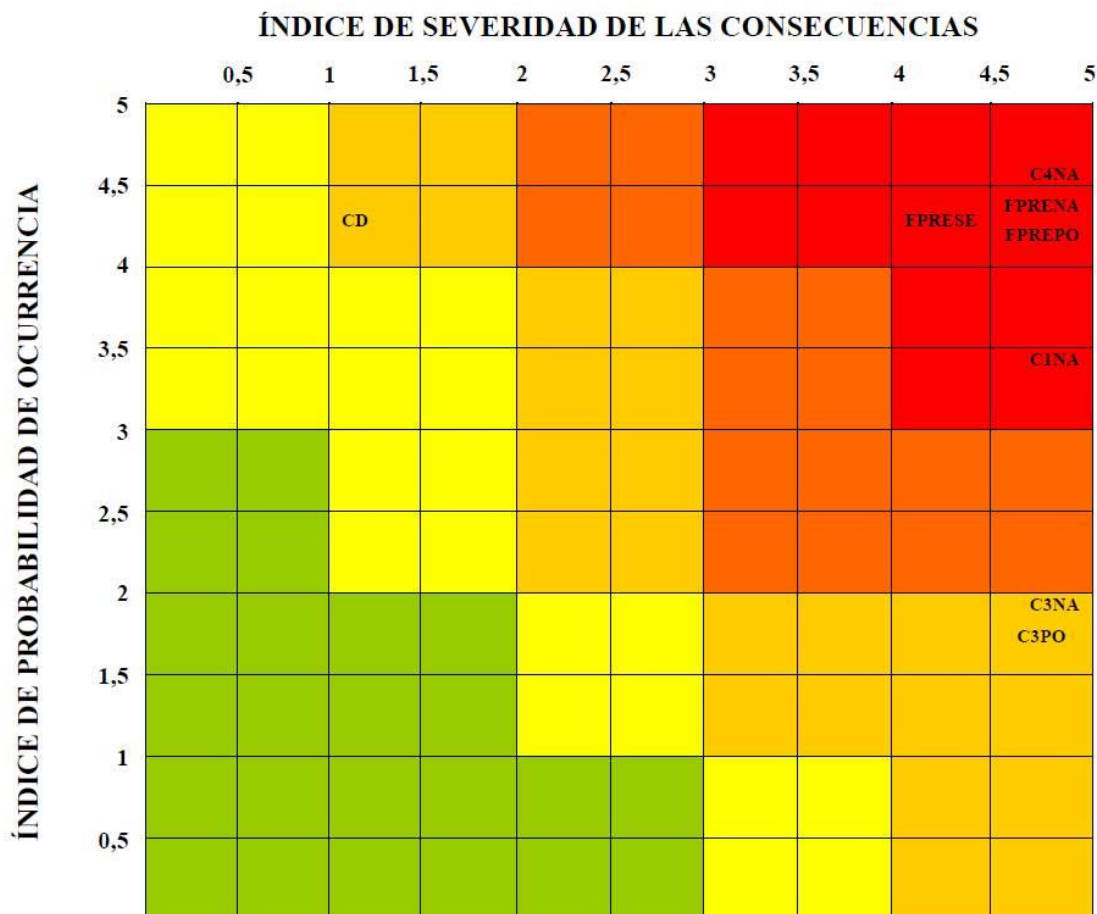


Figura 4.15 Matriz de riesgos de valoración de la presa de relaves de Ticapampa.

Para el desarrollo del método se aplicaron los siguientes pasos:





#### 4.4.1. ANTECEDENTES DE ROTURAS DE PRESAS DE RELAVES OCURRIDOS EN PERÚ

En Perú según diversos estudios realizados señalan, que resulta probable que muchos diques de estériles o acumulaciones de residuos finos de explotaciones mineras presenten la posibilidad de fallar ante la Ocurrencia de sismos, inundaciones, en otros casos debido a su construcción empírica, o que en el cálculo de diseño no se ha considerado el Factor de sismicidad. Se muestra a continuación algunos de causas posibles de rotura de presas de relaves ocurridos en Perú:

DEPÓSITO EMPRESA	ALTURA DEPÓSITO	AÑO	CAUSA	CONSECUENCIAS	ESTADO DEL DEPÓSITO
Casapalca CENTROMIN	60 m.	1952	Sismo	Numerosos muertos y contaminación del Río Rímac	Abandonada
Milpo	60 m.	1956	Sismo	Muchos muertos, interrupción de la carretera Cerro de Pasco-Huánuco	Abandonada
Almivirca QUIRUVILCA	40 m.	1962	Sismo de magnitud 6.7	Daño en la agricultura y obras de infraestructura.	Abandonada
Yauli-Yacu CENTROMIN	80 m.	1968	Sismo	Interrupción de la carretera central y contaminación del Río Rímac	Abandonada
Recuperada BUENAVENTURA	---	1969	Se desconoce	Daños en la agricultura de Huachocolpa	Se desconoce Abandonada
Almivirca QUIRUVILCA	40 m.	1970	Sismo de 1970	Contaminación del río San Felipe	Abandonada
Atacocha	---	1971	Falla en drenaje	Contaminación del Río Huallaga y daños a infraestructura vial	Abandonada
Ticapampa ALIANZA	20 m.	1971	Sismo	Tres muertos, destrucción de viviendas e interrupción de la carretera Huaraz - Lima	Abandonada
San Nicolás	---	1980	Se desconoce	Contaminación del río Tingo y daños en la agricultura	Abandonada

**Tabla 4.20** Casos de rotura de presas de relaves ocurrida en Perú (Fuente: INGEMMET, 1986)

Y el más reciente ocurrido en Caudalosa Grande (Huancavelica) en el 2010, fallado debido a la mala operación del depósito de relaves, que contaminó el río Alpamayo en dicha zona.



#### 4.4.2. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo del Análisis de Riesgos por el Árbol de Fallos es la detección y valoración de posibles riesgos en una instalación minera abandonada, centrándose en aquellos (o aquel) que se estime en una visión preliminar como el menos deseado.

En el caso que se analiza y valora se refiere como se verá a continuación a aquel que pueda producir efectos fatales en la población. Éste se centrará al análisis del riesgo de que se produzca una rotura de presa de relave en estado de abandono y se requiere dar a conocer las posibles causas para este fallo, valorando al final la probabilidad de que ocurra ese suceso. El nivel de detalle del análisis será tal que llegue hasta los componentes identificados en la descripción de la instalación abandonada de residuo minero.

#### 4.4.3. SELECCIÓN DEL SUCESO NO DESEADO O “SUCESO TOP”

La presa de relaves Ticapampa, como se ha visto anteriormente con el método de análisis para la valoración según el IGME, desarrollándose y valorándose los escenarios de Probabilidad y Severidad, lo más crítico que se pudo observar es la posible rotura de la presa con causas devastadoras como daños a la población adyacente, contaminación de suelos ríos, etc.

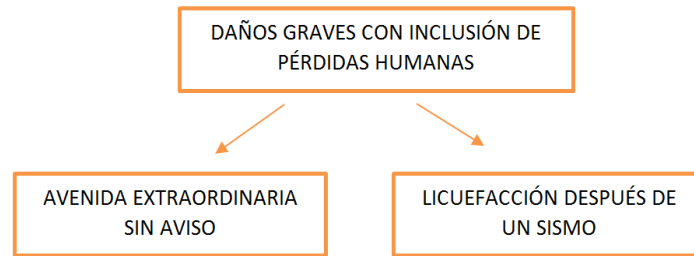
Se desarrollará el árbol de fallos para el suceso “top” como: **“Daños muy graves (pérdidas humanas) por inestabilidad del dique en la población cercana”** a causa de la rotura de la presa de relaves de Ticapampa:

- Las máximas avenidas del río Santa juntamente el río Chaupis, ya que independiente cada una ellas no serían suficientemente potenciales como para ocasionar un desastre debido a que presentan 8mas adelante calculado), una altura no superior al inundable. Por ello se ha considerado para cada una de ellas un periodo de retorno de 500 años, el máximo posible para que este evento ocurra.



- Un derrumbe por licuefacción ocurrida después de un sismo una vez preparada la presa en estado de saturación por lluvias permanentes.

Para mejor comprensión se adjunta el siguiente esquema y a continuación se pasará a describir cada escenario:



**Figura 4.16** Esquema general del caso Ticapampa para la construcción del Árbol de Fallos.

#### 4.4.4. CONTRIBUIDORES PRIMARIOS AL "TOP EVENT"

##### 4.4.4.1. Avenidas extraordinaria sin aviso de peligro y con amplificación:

Se debe tener en cuenta que, las avenidas son fenómenos originados por el carácter aleatorio de las descargas de los ríos. La ocurrencia de crecidas de los ríos se describe en términos probabilísticas. Es decir, que cada avenida va asociada una Probabilidad de Ocurrencia.

En el tramo Cátac, Ticapampa y Recuay, el río Santa recibe tributarios menores, particularmente de la Cordillera Blanca, que son pequeños ríos y quebradas con discurrimento de agua permanente proveniente de los deshielos superiores; siendo importantes las quebradas Atoc-huacanca, Yanascancha, Chaupis, Yanayacu, Río Seco, Yacsha Huanca (o Llacshahuanca), que incrementan sus caudales en forma importante durante las estaciones de lluvias (enero a marzo) y que, inclusive, tienen incidencia en la calificación de los peligros naturales de origen geológico / climático (INDECI, 2004).



Este río tiene antecedentes de que las inundaciones catastróficas fueron ocasionadas por el desbordamiento de una avenida ordinaria o extraordinaria con gran capacidad para erosionar o sedimentar. En este proceso de inundación ocurrieron pérdidas de cultivos, deterioro de infraestructura vial, hidráulica y centros poblados, amenazando la vida de los pobladores. Por lo tanto, el valle es considerado muy vulnerable ante la presencia de estos eventos de crecida.

El escenario elegido como el máximo no deseado se refiere a que ocurriese una inesperada avenida extraordinaria del río Santa y los que aportan a ésta misma, afectando a las poblaciones de Ticapampa y Recuay (población aguas debajo de la presa de relaves).

Se sabe que el principal curso de agua cerca de la presa de relaves de Ticapampa es el río Santa y sus contribuyentes. En este análisis se ha considerado la aportación que hace el río Chaupis en la construcción del Árbol de Fallos ya que no es suficiente considerar únicamente al Río Santa. A continuación se muestran los cálculos referidos a las características las secciones, caudales, etc.,

#### ➤ **Máxima avenida del río Santa**

Un Factor que puede causar máximas avenidas es el desbordamiento de volúmenes de agua acumulada en las partes altas de la cuenca como en las lagunas. También puede producirse inundaciones por embalse de las aguas, producido por deslizamiento de tierras, avenidas de lodos, colmataciones y otros.

La probabilidad de inundación en el tramo Ticapampa-Recuay, se ha incrementado como consecuencia del sismo del 70, pues antes de este evento también se producía este fenómeno. También puede producirse debido a las condiciones morfodinámicas del río, cuyo cauce es variado, dado que en esta parte del tramo, el río presenta una mayor anchura de 150-200 m



aproximadamente. Este problema puede traer como consecuencia la rotura de la presa de relaves y la destrucción de estos poblados.

### Características físicas del río Santa:

Área de la cuenca: 1102,72 km<sup>2</sup>

Longitud del curso principal (L): 50 km

Pendiente del curso principal (J): 8,6%

### Cálculo del tiempo de concentración

Es el tiempo transcurrido desde el final de la lluvia neta hasta el final de la escorrentía superficial provocada en la cuenca. La expresión utilizada para la determinación de este tiempo es la siguiente:

$$T_c = 0,3 \left( \frac{L}{J^{0,25}} \right)^{0,76}$$
$$T_c = 0,3 \left( \frac{50}{0,086^{0,25}} \right)^{0,76}$$

$$T_c = 9,3 \text{ h}$$

### Coeficiente de uniformidad

La hipótesis de lluvia neta constante se va alejando de la realidad e infravalorando caudales al incrementarse el  $T_c$ . Por ello se aplica el Coeficiente de Uniformidad, que refleja la variación de la lluvia neta durante la duración del aguacero.

$$K = 1 + \frac{T_c^{1,25}}{T_c^{1,25} + 14}$$
$$K = 1 + \frac{8,2^{1,25}}{8,2^{1,25} + 14}$$
$$K = 1,5$$



### Régimen de precipitaciones extremas:

La ley de precipitaciones máximas diarias areales sobre la cuenca, deducida de los planos de isomáximas, o por otros métodos hidrometeorológicos, viene modificada por el Coeficiente de simultaneidad de la lluvia, Factor aplicado para corregir la no simultaneidad de la lluvia en cuenca en cuencas mayores de 1 Km<sup>2</sup>. Su expresión es la siguiente:

$$K_A = 1 - \frac{\log_{10} A}{15}$$

$$K_A = 0,8$$

### Cálculo según la sección del canal del cauce

Las medidas tomadas para este río también han sido tomadas mediante un perfil topográfico en Google Earth. Para calcular las secciones se usó una forma geométrica trapezoidal como se muestra a continuación:

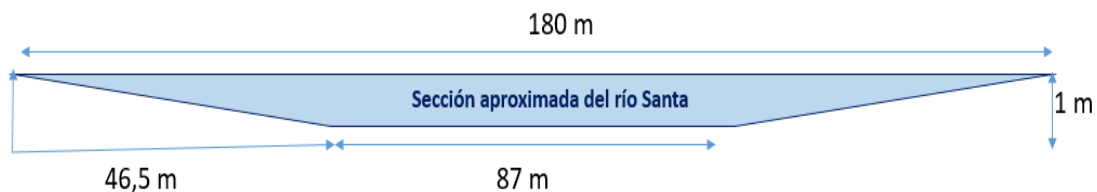


Figura 4.17 Sección aproximada del río Santa en un punto cercano a Ticapampa.

**Área:** 133,50 m<sup>2</sup>

**Perímetro mojado:** 180,02 m

**Radio Hidráulico:** 0,74 m

### Cálculo de la velocidad del caudal

$$V = \frac{3,17 R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{n}$$



Dónde:

V: Velocidad media del flujo (m/s)

R: radio hidráulico (m)

Q: Caudal punta (m<sup>3</sup>/s)

A: área de la sección mojada (m<sup>2</sup>)

S: gradiente de energía que puede ser sustituido por la pendiente de la superficie del agua o la pendiente del lecho.

n: Coeficiente de Manning

Con los datos obtenidos la velocidad del caudal resulta igual a:

$$V = 10,86 \text{ m/s}$$

**Cálculo del caudal:**

$$Q = 3,17 AR^{0,83}S^{0,12}$$

$$Q = 245,55 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### ➤ **Máxima avenida del río Chaupis**

El río Chaupis es una de las vertientes del río Santa por su margen derecha, se ubica frente a la población de Ticapampa. Junto a ello también se presentan dos quebradas (ríos de poco cauce frente a Ticapampa.) llamados Yarus y Yanayacu.

Por tanto se ha considerado que es muy importante, la aportación que hace el río hacia el río Santa. Éste río nace de las filtraciones superficiales de la Cordillera Blanca.

Este río probablemente pueda generar gran amenaza si ocurriera una gran avenida hacia el poblado de Ticapampa.

#### **Características físicas de la quebrada Chaupis:**

Área de la cuenca: 24 km<sup>2</sup>

Longitud del curso principal (L): 12,5 km



Pendiente del curso principal (J): 9 %

### Cálculos de la sección del canal del cauce

Las medidas tomadas para este río también han sido tomadas mediante un perfil topográfico en Google Earth.

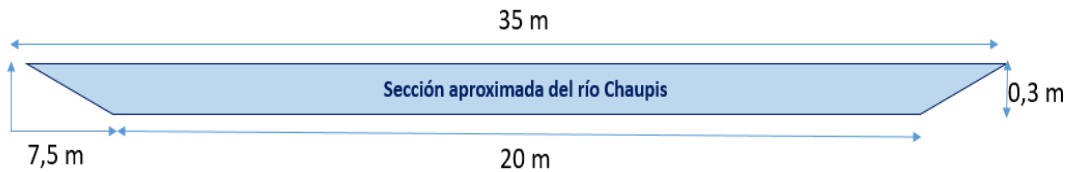


Figura 4.18 Sección aproximada del río Chaupis en un punto cercano a Ticapampa

Área: 8,25 m<sup>2</sup>

Perímetro mojado: 35,01 m

Radio Hidráulico: 0,23 m

### Cálculo del tiempo de concentración

$$T_C = 0,3 \left( \frac{L}{J^{0,25}} \right)^{0,76}$$

$$T_C = 0,3 \left( \frac{12,5}{0,09^{0,25}} \right)^{0,76}$$

$$T_C = 3,23 \text{ h}$$

### Coefficiente de uniformidad

$$K = 1 + \frac{T_C^{1,25}}{T_C^{1,25} + 14}$$

$$K = 1 + \frac{3,23^{1,25}}{3,23^{1,25} + 14}$$

$$K = 1,2$$

### Régimen de precipitaciones extremas:

$$K_A = 0,9$$





#### 4.4.4.2. Licuefacción y derrumbe después de un sismo

Una de las principales causas de la rotura de una presa de relaves es el deslizamiento por licuefacción de los materiales que conforman la presa, ocurridas después de un terremoto.

El aumento de la presión de poros anula la resistencia a esfuerzos cortantes y la reducción de la tensión efectiva; como consecuencia del aumento de presión intersticial a causa de las ondas y vibraciones que generan un sismo.

La licuefacción será causada por una serie de factores, entre ellas tenemos:

- Material saturado
- Que la tensión de corte supere la resistencia del material
- El Factor de amplificación sísmica de los materiales, debido a los bajos valores de velocidad de las ondas de corte o cizalla de los terremotos
- La magnitud de movimiento sísmico en Ticapampa, que dependerá de la energía que afecta al emplazamiento de la presa.
- La duración del movimiento sísmico

El coeficiente de rozamiento de la lámina de impermeabilización con el suelo y la masa de residuos, favorecido por la existencia de unas pendiente inadecuadas, o bien, una sobrecarga en la superficie del vertido o un exceso de lluvia puede dar generar el deslizamiento de la masa de residuos que puede dañar los diques y producir su rotura generando una fuga de lixiviados y residuos con graves consecuencias para el entorno.

#### 4.4.5. CONTRIBUIDORES SECUNDARIOS AL “TOP EVENT”

##### ➤ **Máxima avenida del río Santa en un periodo de retorno de 500 años**

La máxima avenida que pudiera darse dentro de un periodo de retorno de 500 años en el río Santa en Ticapampa es de 274,78 m<sup>3</sup>/s y a la altura de Recuay es 297,67 m<sup>3</sup>/s (INDECI, 2004).



### **Cálculo de la velocidad del cauce en un periodo de retorno de 500 años**

Para el cálculo de la velocidad se ha considerado la máxima avenida en 500 años con 274,78 m<sup>3</sup>/s y el área de la sección del cauce ubicada aguas arriba a unos 50 m aproximadamente donde se ubica la presa de relaves de Ticapampa es de 133,50 m<sup>2</sup>. La fórmula para calcular la velocidad es:

$$Q = V \times A$$
$$V = 2,06 \text{ m/s}$$

### **Evaluación de la altura en un periodo de retorno de 500 años**

Conociendo la sección se puede evaluar la altura de agua que es lo mismo que la profundidad, que depende de la forma del cauce. Para evaluar la altura que alcanzará el agua se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Sección} = \frac{Q}{\frac{1}{n} \sqrt{R^3 \times J}}$$

$$\text{Sección} = 45,41 \text{ m}$$

Teniendo la sección, y para este caso se tiene una anchura aproximada de 180 m entre Ticapampa y Recuay, la altura que alcanzara el agua será aproximadamente de 0,25 m.

#### **4.4.6. SUCESOS BÁSICOS**

##### **➤ Fallo por Movimientos Sísmicos.**

Para este motivo el riesgo es muy alto ya que nos encontramos en una zona muy sísmica en la que es estadísticamente probable que suceda en un periodo no muy largo.



El Perú es considerado como una de las regiones de más alta actividad sísmicas. Forma parte del Cinturón Circumpacífico. De esta forma es necesario considerar la influencia de los sismos sobre la estabilidad del talud de la presa de relaves de Ticapampa.

Según la teoría de placas el Perú está ubicado cerca de la zona de convergencia de las placas litosféricas denominadas “Continental Sudamericana” y “Oceánica de Nazca”. Los esfuerzos que se generan entre las dos placas en la zona de subducción originan una intensa actividad sísmica. La referida convergencia determinan la colisión de ambas placas y consecuentemente la inflexión del borde oriental de la placa de Nazca bajo la placa Continental según la dirección ENE; asimismo la placa Continental resulta en un cabalgamiento sobre la capa de Nazca.

A la referida zona de “inflexión” y “cabalgamiento” se denomina “Zona de subducción”. De otro lado esta zona morfológica configura un relieve submarino que por su posición y alineamiento se le denominan “Fosa de Milne-Edwards” o “Fosa de Lima”. Dicha fosa supera profundidades de 5000 metros.

El sector que se extiende entre la fosa de Lima y la costa, es una zona de sismicidad superficial pero intensa y asociada con el sistema de subducción. Esta área es uno de los lugares donde se generan los sismos de gran magnitud en el mundo. En el continente la profundidad focal de los sismos va creciendo de oeste a este.

La sismicidad superficial en la placa Continental está limitada a la zona que abarca la costa, la Cordillera Occidental y parte de las altiplanicies; luego aumenta nuevamente en la zona de la Cordillera Oriental con focos muy superficiales y mecanismos que demuestran la existencia de un régimen de comprensión.



El sismo del 31 de mayo de 1970 fue uno de los más catastróficos ocurridos en el Perú. Su epicentro se halló frente a las costas de las ciudades de Casma y Chimbote, en el océano Pacífico. Su magnitud fue de 7,5 grados en la escala de Richter y alcanzó una intensidad de VIII en la escala de Mercalli. Produjo además un violento aluvión en las ciudades de Yungay y Ranrahirca.

Las muertes se calcularon en 47 194 personas y hubo cerca de 19 600 desaparecidos. Los heridos se contabilizaron en 143 331, si bien en lugares como Recuay, Carhuaz y Chimbote la destrucción de edificios osciló entre 80% y 90%. La carretera Panamericana sufrió graves grietas entre Trujillo y Huarmey, lo que dificultó aún más la entrega de ayuda. La central hidroeléctrica del Cañón del Pato quedó también afectada por el embate del río Santa y la línea férrea que comunicaba Chimbote con el valle del Santa quedó inutilizable en un 60% de su recorrido.

### **Estudio del peligro sísmico para la presa de lodos de Ticapampa**

Se recopiló datos de un estudio de Peligro Sísmico, lo cual tiene por finalidad determinar la distribución de la actividad sísmica, efectuar los análisis sismo tectónicos (determinísticos) y en base a la tectónica superficial, lo cual establece la Probabilidad de Ocurrencia, la magnitud esperada y la aceleración probable que alcanza un sismo en diferentes períodos de retorno, además de determinar las áreas sismológicas que tienen influencia en el área de Ticapampa.

La evaluación del peligro sísmico se efectuó por medio de dos métodos: El método determinístico que establece un sismo externo y un sismo de diseño; en tanto el método probabilístico establece la posibilidad de Ocurrencia de las magnitudes y las aceleraciones en diferentes periodos de retorno, para finalmente propone niveles sísmicos del movimiento máximo del suelo en el área de estudio.



La mayor actividad sísmica en el área de influencia se presenta en el mar paralelo a la costa, donde existe una gran concentración de sismos. Se aprecia la subducción de la placa de Nazca, ya que hacia el continente la profundidad focal de los sismos aumenta. También se producen sismos en el continente que son superficiales e intermedios, y que estarían relacionados a fallas existentes.

Para una mayor confiabilidad de los resultados se utilizaron el Programa de Cómputo Risk que fue desarrollado por Robin Mc Guire (1976) en el U.S. Geological Survey. Esta evaluación se realizó para cada fuente y, se usaron los parámetros de cada fuente los cuales están actualizados de acuerdo a la recurrencia de la actividad sísmica ocurrida en Perú en el periodo comprendido entre los años 1963 y 2003 elaborado por el Dr. Jorge Alva Hurtado (2005).

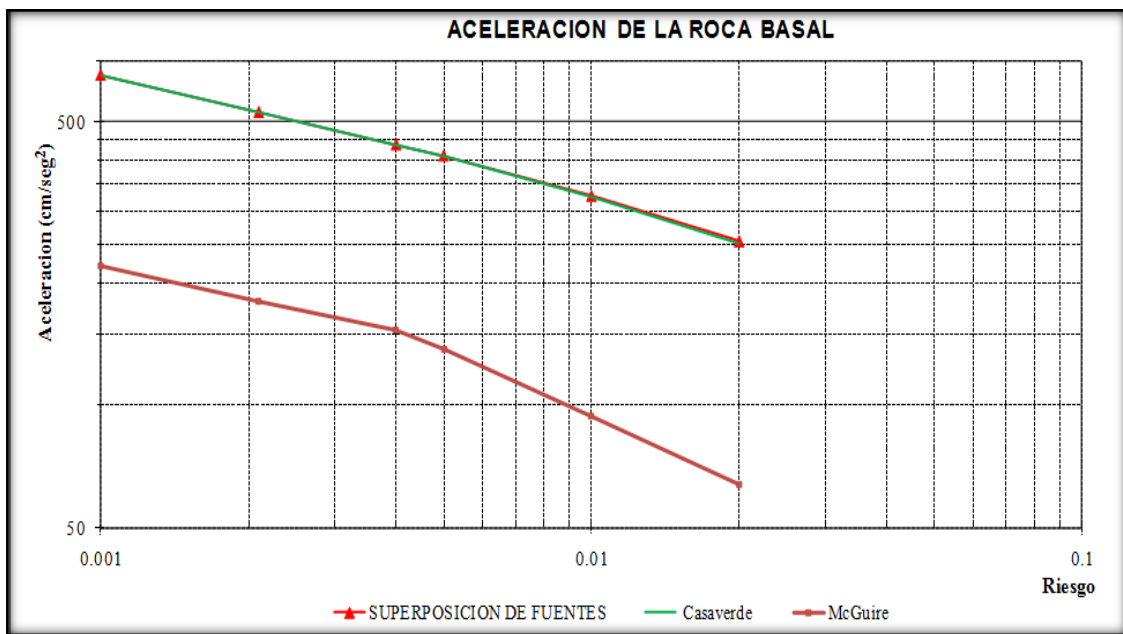


Figura 4.19 Estudio sísmico elaborado por Milla Vergara, Elio (2011)

#### ➤ Lluvias permanentes por varios días

Este apartado se refiere a la condición más desfavorable de lluvia que se conoce como la precipitación máxima probable, lo cual se define como la máxima cantidad de lluvia, durante cualquier época del año.



En las cuencas o quebradas que aportan al río Santa, las crecientes son causadas principalmente por el exceso de lluvia y la infiltración a la cuenca.

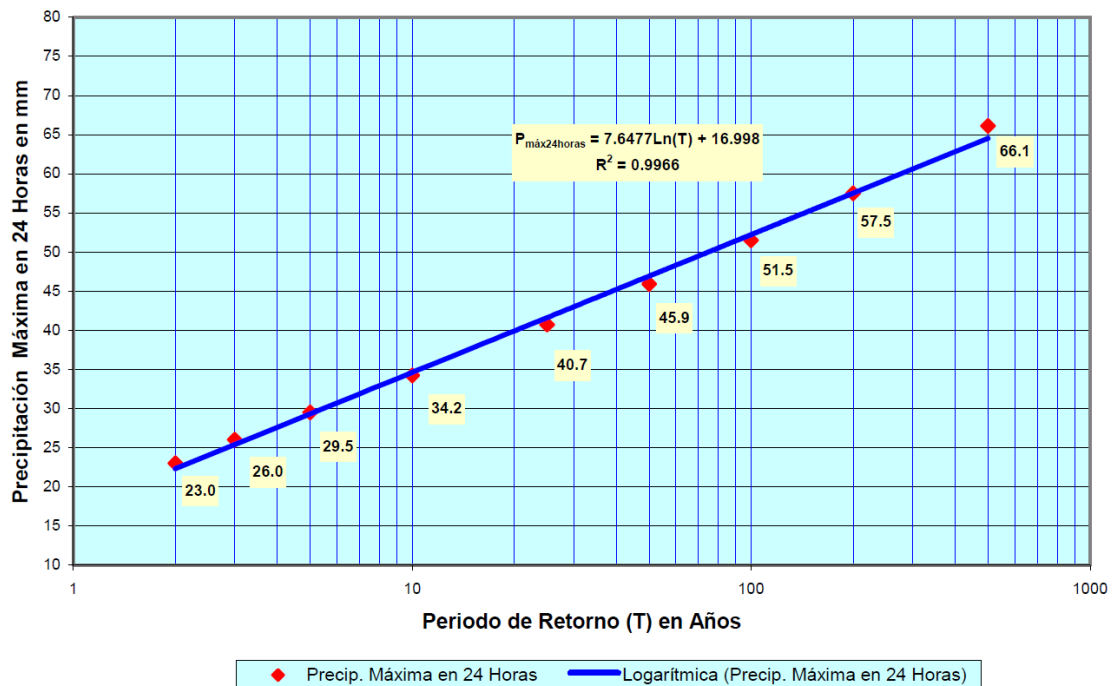
La inestabilidad de taludes de la presa de relaves de Ticapampa debido a las lluvias persistentes, puede generar procesos de erosión y saturación en los diques que produzca su rotura.

En este caso se analizará una Precipitación Máxima en 24 Horas en una estación cercana llamada Chiquián, debido a que presenta similitudes hidrológicas y sobre todo por la cercanía a la zona en estudio, de acuerdo a la información del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrológica (SENAMHI).

Los datos de la precipitación máxima que se encontró en esta estación da un valor de la precipitación máxima probable en 24 h, la más alta registrada durante 33 años es de 50,1 mm. La precipitación máxima en 24 horas en la estación Chiquián, correspondiente a diferentes periodos se muestra en la tabla a continuación:

Periodo de Retorno en años	Probabilidad de No Excedencia (%)	Probabilidad de Excedencia (%)	Estación Chiquián
			Precipitación Máxima en 24 Horas (mm)
2	50,0	50,0	23,0
3	66,7	33,3	26,0
5	80,0	20,0	29,5
10	90,0	10,0	34,2
25	96,0	4,0	40,7
50	98,0	2,0	45,9
100	99,0	1,0	51,5
200	99,5	0,5	57,5
500	99,8	0,2	66,1

**Tabla 4.21** Precipitación Máxima en 24 Horas para Diferentes Periodos de Retorno (Fuente: Estación Chiquián)



**Figura 4.20** Precipitación Máxima en 24 Horas en mm, para diferentes Periodos de Retorno: Estación Chiquián

➤ **Máximas avenidas del río Chaupis en un periodo de retorno de 500 años**

Como se tiene datos de caudales de con periodo de 500 y 200 años de retorno, se procedió a calcular usando datos de las máximas precipitaciones en 24 horas de la Estación Chiquián para diferentes periodos de retorno. De lo cual se obtendrá datos para los cálculos siguientes:

**Intensidad de Precipitación (I):**

Para este cálculo se utilizó datos y fórmulas del Manual de Hidrología de Perú Para periodo de 500 años de retorno, la máxima precipitación en 24 horas es 66,1 mm.

$$I = \frac{P}{24} \times 11 \frac{28^{0,1} - T_C^{0,1}}{28^{0,1} - 1}$$

Dónde:

**P:** Precipitación máxima corregida (mm)

**T<sub>C</sub>:** Tiempo de concentración (horas)



$$I = \frac{66,1}{24} \times 11 \frac{28^{0,1} - 3,23^{0,1}}{28^{0,1} - 1}$$

$$I = 14,23$$

### **Cálculo de la máxima avenida para periodo de 500 años de retorno**

Para la estimación de la descarga máxima de diseño según el método racional y propuesto por el manual de Hidrología de Perú se tiene:

$$Q = 0,278 CIA$$

Dónde:

Q: Descarga máxima de diseño (m<sup>3</sup>/s)

C: Coeficiente de escorrentía (según las características del río se ha considerado un valor de 0,6 por presentar poca vegetación y pendiente media)

I: Intensidad de precipitación máxima horaria (mm/h)

A: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

Aplicando los datos en la fórmula se obtiene el siguiente resultado para un periodo de retorno de 500 años.

$$Q = 56,96 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Cálculo de la velocidad del caudal:** Para el cálculo de la velocidad se utilizó la siguiente fórmula:

$$Q = V \times A$$

$$V = 6,90 \text{ m/s}$$

### **Evaluación de la altura en un periodo de retorno de 500 años**





$$\text{Sección} = \frac{Q}{\frac{1}{n} \sqrt{R^3 \times J}}$$

$$\text{Sección} = 20,23 \text{ m}$$

Teniendo la sección, y para este caso se tiene una anchura aproximada de 40 m antes de llegar al río Santa, la altura que alcanzará la lámina de agua será aproximadamente de 0,50 m.

➤ **Máximas avenidas del río Chaupis en un periodo de retorno de 200 años**

Para este cálculo se utilizaron datos y fórmulas del Manual de Hidrología de Perú, para periodo de 200 años de retorno, la máxima precipitación en 24 horas es 57,5 mm según los datos de Estación Chiquián.

**Intensidad de Precipitación (I):**

$$I = \frac{57,5}{24} \times 11 \frac{28^{0,1} - 3,23^{0,1}}{28^{0,1} - 1}$$

$$I = 12,3$$

**Cálculo de la máxima avenida para periodo de 200 años de retorno:**

$$Q = 0,278 \text{ CIA}$$

$$Q = 49,48 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Evaluación de la altura:**



$$\text{Sección} = \frac{Q}{\frac{1}{n} \sqrt{R^3 \times J}}$$
$$\text{Sección} = 17,57 \text{ m}$$

Teniendo la sección, y para este caso se tiene una anchura aproximada de 40 m antes de llegar al río Santa, la altura que alcanzara el agua será aproximadamente de 0,44 m.

**Cálculo de la velocidad del caudal:** Para el cálculo de la velocidad se utilizaron la siguiente fórmula:

$$Q = V \times A$$
$$V = 5,99 \text{ m/s}$$

➤ **Máximas avenidas del río Santa con un periodo de retorno de 500 años**

Anteriormente ya se ha calculado la máxima avenida para un periodo de 500 años en el Rio Santa, lo cual es 297,67 m<sup>3</sup>/s, en la entrada de Recuay a la altura de Ticapampa es 274,78 m<sup>3</sup>/s. Por lo que se tratará de estimar que pasaría si este evento ocurriera.

➤ **Máximas avenidas del río Santa con un periodo de retorno de 500 años sin aviso**

Anteriormente ya se ha calculado la máxima avenida para un periodo de retorno de 500 años en el Rio Santa, lo cual significan 297,67 m<sup>3</sup>/s y en la entrada de Recuay a la altura de Ticapampa es 274,78 m<sup>3</sup>/s. Ahora se tratará de estimar que pasaría si este evento ocurriera sin aviso. En este caso cuando no hay aviso a la población, no da tiempo a alertar a la población por cualquier medio de comunicación antes de la llegada de la inundación.



Es importante definir el tiempo de aviso, en este caso corresponde al tiempo entre que se realiza la alerta a la población y la llegada del caudal de inundación del río Santa hacia las poblaciones de Ticapampa y Recuay. Por lo tanto, se tiene en cuenta al tiempo en que los pobladores tendrán tiempo a refugiarse o a ser evacuados y también cabe mencionar otros factores que pueden influir en el aviso, tales como la nocturnidad, ya que durante el día generalmente las personas están más atentas y en general la propagación de los avisos funcionan notablemente mejor.

También deberían tenerse en cuenta si las poblaciones cuentan con sistemas de emergencia, si está capacitada, etc.

#### **4.4.7. ESTIMACIÓN DE LAS PROBABILIDADES**

##### **➤ Fallo por movimiento sísmico**

Según un análisis sismo tectónico en la placa donde se encuentra Perú han ocurrido el 80% de los eventos sísmicos en el mundo. La fuente de datos básica de intensidades sísmicas que describe los principales eventos sísmicos ocurridos en el Perú, ha sido presentada por Silgado (1978).

Según el análisis probabilístico del peligro Sísmico para un proyecto de restauración de la presa de relaves de Ticapampa se tienen los siguientes valores para el Sismo Extremo de 0,536 g y el Sismo de Operación de 0,456 g el cual es para un tiempo de retorno de 475 años. Estos periodos de retorno son utilizados en Perú.

Según la situación anterior, la probabilidad de suceso es de  $2,1 \times 10^{-3}$ .

##### **➤ Lluvias permanentes por varios días**



Se tiene en cuenta este factor ya que el comportamiento de licuefacción se produce siempre en un medio saturado y en la temporada seca difícilmente ocurrirá.

Para la estimación de lluvias en régimen permanente se ha utilizado los datos de los periodos húmedos y secos durante el año. En Perú los meses más lluviosos ocurren en Diciembre, Enero, Febrero y Marzo, mientras que en el resto de los meses la pluviometría es muy baja. Por lo tanto en esta zona la probabilidad estimada de ocurrencia es de  $250 \times 10^{-3}$  en función de la duración de la época lluviosa.

➤ **Máximas avenidas del río Chaupis en un periodo de retorno de 500 años**

Recordando, la cuenca del río Chaupis desemboca enfrente de la población de Ticapampa, contribuyendo de manera directa a la escorrentía del río Santa en la zona que se va a analizar.

Tal como ocurría en la cuenca del río Santa, se dispone de estudios hidrológicos detallados que facilitan el análisis. Así, se obtiene que la probabilidad en un periodo de retorno de 500 años para el río Chaupis es de  $2 \times 10^{-3}$ .

➤ **Máximas avenidas del río Santa con un periodo de retorno de 500 años sin aviso.**

Se ha estimado la probabilidad de ocurrencia para este suceso según la tabla de la Metodología de Graham (1999), donde se puede encontrar una base de datos de inundaciones por máximas avenidas pasadas.



Severidad de la inundación	Tiempo de aviso (minutos)	Entendimiento de la severidad	Tasa para estimar víctimas (fracción de las personas expuestas)	
			Valor sugerido	Rango sugerido
Alta	Sin aviso	No aplica	0.75	0.3-1.00
	15 a 60	Vago Preciso	* Utilizar los valores de arriba aplicados al número de personas que permanecen en la zona de inundación luego de ser avisadas. No se proporciona una guía para la estimación de ese grupo de personas.	
	Más de 60	Vago Preciso		
Media	Sin aviso	No aplica	0.15	0.03-0.35
	15 a 60	Vago Preciso	0.04 0.02	0.01-0.08 0.005-0.04
	Más de 60	Vago Preciso	0.03 0.01	0.005-0.06 0.002-0.02
Baja	Sin aviso	No aplica	0.01	0-0.02
	15 a 60	Vago Preciso	0.007 0.002	0-0.015 0-0.004
	Más de 60	Vago Preciso	0.0003 0.0002	0-0.0006 0-0.0004

**Tabla 4.22** Tabla para estimación de severidades de inundación según el metodología de Graham.

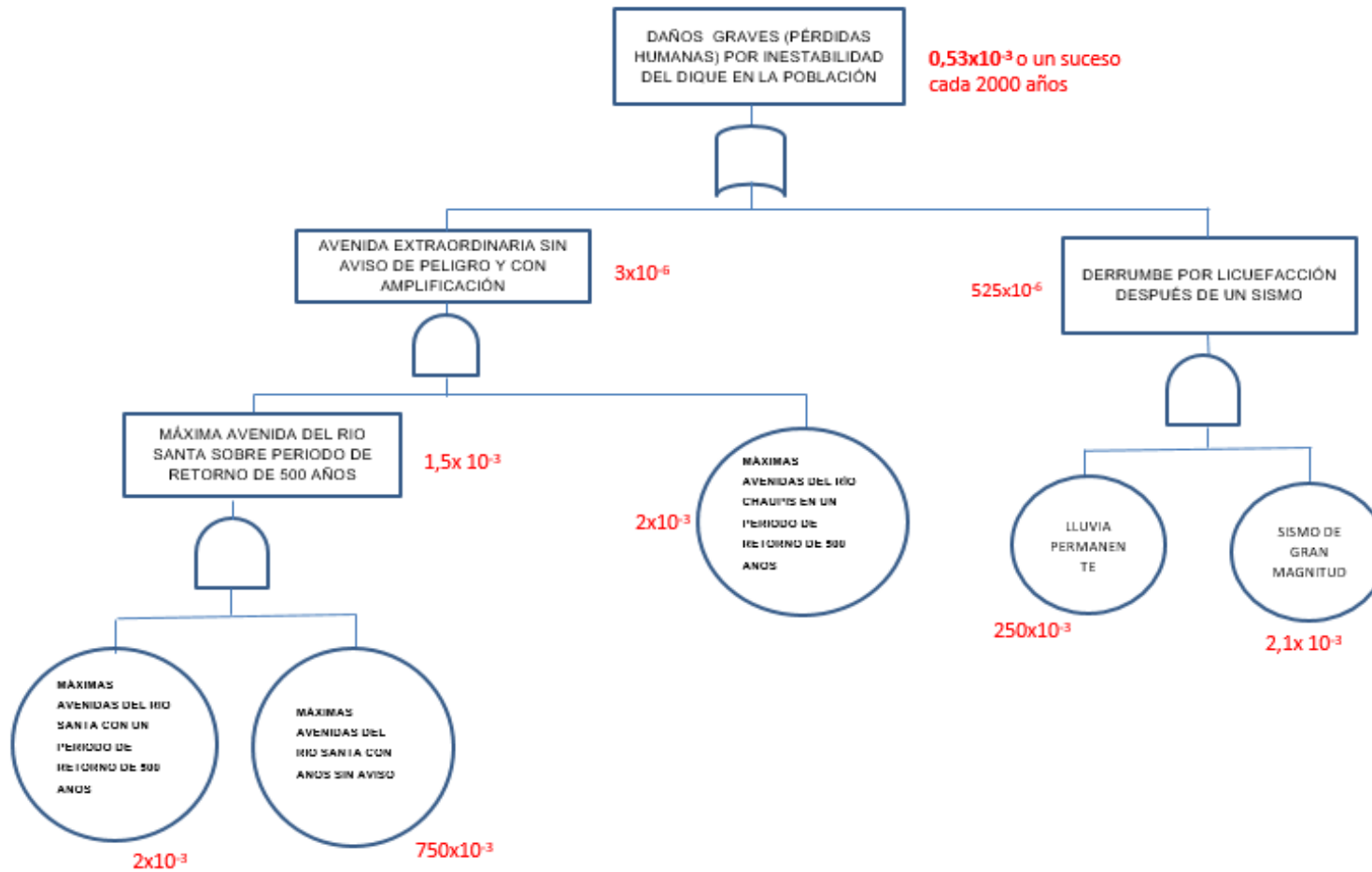
La probabilidad según esta información y mediante los datos de un experto, tal como Graham, es de  $750 \times 10^{-3}$ . Este valor coincide con la apreciación propia que es la siguiente: “sin aviso” corresponde al periodo de noche y a la mitad del día con visibilidad dificultosa, o bien distracción o desapercibimiento.

➤ **Máximas avenidas del río Santa con un periodo de retorno de 500 años sin aviso**

La probabilidad estimada es de  $2 \times 10^{-3}$  que corresponde al periodo de retorno de 500 años considerado.



#### 4.4.8. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ÁRBOL DE FALLOS PARA EL CASO APLICADO





#### 4.4.9. DISCUSIÓN

La aplicación del árbol de fallos a la presa de relaves de Ticapampa produce la estimación de la probabilidad de suceso del evento muy grave como es la destrucción de la presa de manera súbita de  $0,53 \times 10^{-3}$ , o en otras unidades, el suceso de la destrucción de la estructura de residuos y la invasión de la población causando daños graves, en una proporción de un suceso cada 2000 años. Ello en el escenario del "top event" supone un riesgo apreciable si tenemos en cuenta que la gravedad abarca a víctimas humanas y un muy importante daño ecológico difícil de reparar.

Por ello conviene considerar los sistemas de aceptación que la sociedad, generalmente dentro de las actividades de ingeniería está acostumbrada a enfrentarse, consciente o inconscientemente.

Un nivel de riesgo que es aceptable para una actividad puede parecer enormemente alto o maravillosamente bajo para otras" (Fischhoff, 1994). Más allá de los riesgos individuales, la dimensión social del riesgo se asocia, a menudo, con los peligros que pueden provocar una respuesta socio-política; por ejemplo, los riesgos de sucesos que causan un daño generalizado o a gran escala, o la aparición de múltiples desgracias en un único acontecimiento.

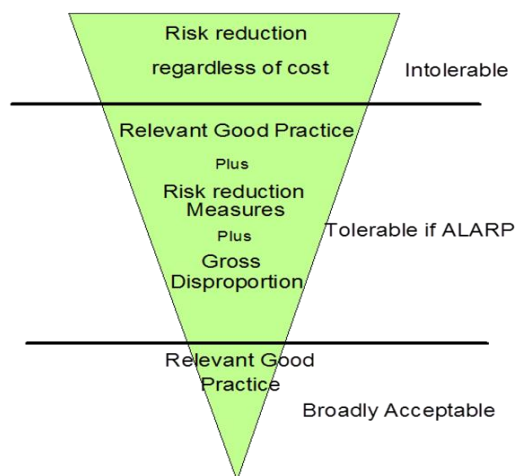


Figura 4.21 Representación del sistema ALARP sobre la aceptación de sucesos no deseados.



Una representación del TOR "grado de tolerancia del riesgo" ("tolerability of risk, TOR) de una forma asequible para el público en general es el siguiente triángulo que representa niveles crecientes de "riesgo" para una actividad peligrosa determinada, a medida que nos movemos desde la parte inferior hacia la parte superior". El triángulo se puede dividir en tres zonas:

Se propone como ejemplo las líneas de conducta del HSE (UK Health and Safety Executive) que, para los límites de riesgo individuales, son los siguientes:

- Si un individuo hace frente a una probabilidad de la pérdida de la vida mayor que 1 en 10.000 casos por año, y no tiene ningún control sobre la fuente de peligro y no le supone una ventaja apreciable, entonces, este nivel del riesgo se debe considerar como inaceptable.
- Si un individuo hace frente a una probabilidad de la pérdida de la vida menos de 1 en 1.000.000 por año, entonces, este nivel del riesgo se puede mirar como ampliamente aceptable.
- Si este individuo hace frente a una probabilidad de la pérdida de la vida mayor que 1 en 1.000.000 por año y menos que 1 en 10.000, entonces, el riesgo debe ser reducido y al precepto se le denomina ALARP o "tan bajo como razonablemente sea posible".

Para los riesgos en la región de ALARP, las decisiones se pueden tomar en función de un análisis del coste-beneficio, pero deben también considerar las valoraciones de riesgo ético y social.

- ✓ La zona superior es la de nivel de riesgo inaceptable. En la práctica, un riesgo que cae en esta zona se considera inaceptable, cualesquiera que sean los beneficios que lleve aparejada la actividad. Toda actividad o práctica que contenga riesgos que se incluyen en esta zona superior debe prohibirse por principio, a menos que se pueda modificar para reducir el





riesgo, de modo que caiga en una de las zonas inferiores, o que haya razones excepcionales para mantenerla.

- ✓ La zona inferior es la de nivel de riesgo ampliamente aceptable. Los riesgos que pertenecen a esta zona se consideran, en general, insignificantes y adecuadamente controlados. Los organismos reguladores no exigirán otras medidas para reducir el riesgo, a no ser que haya medidas razonablemente practicables. Los niveles de riesgo que caracterizan esta zona son comparables a los que la gente considera insignificantes o triviales en su vida diaria. Son típicos de las actividades que no son, de por sí, muy peligrosas, o de actividades peligrosas que están controladas o se pueden controlar para reducir el riesgo hasta niveles muy bajos.
- ✓ La zona intermedia es la de nivel de riesgo tolerable. Los riesgos de esta zona son típicos de las actividades que la gente está dispuesta a tolerar, a fin de asegurar sus beneficios, confiando en que:
  - la naturaleza y el nivel del riesgo se evalúen convenientemente y los resultados se utilicen para dictar medidas de control;
  - los riesgos residuales no sean excesivamente altos y se mantengan tan bajos como sea razonablemente posible;
  - los riesgos se revisen periódicamente para garantizar que siguen cumpliendo los criterios ALARP.

En la actualidad, un principio dominante es trabajar en condiciones de riesgo tolerable según el principio de ALARP: reducir los riesgos a niveles tan bajos como razonablemente sean practicables.

Resulta muy difícil desarrollar criterios en la tolerabilidad de los riesgos para los peligros que dan lugar a preocupaciones de sociedad. El fallecimiento de diez personas en un incidente, generalmente, (en términos de reacción psicológica humana) da lugar a más preocupación que la muerte de una persona en diez incidentes separados. Pero, en los términos de tratar el riesgo (más bien que la



respuesta psicológica al riesgo), no existe un acuerdo general de cómo tratar de la mejor forma el riesgo social.

## **LAS PERCEPCIONES SOCIALES DEL RIESGO**

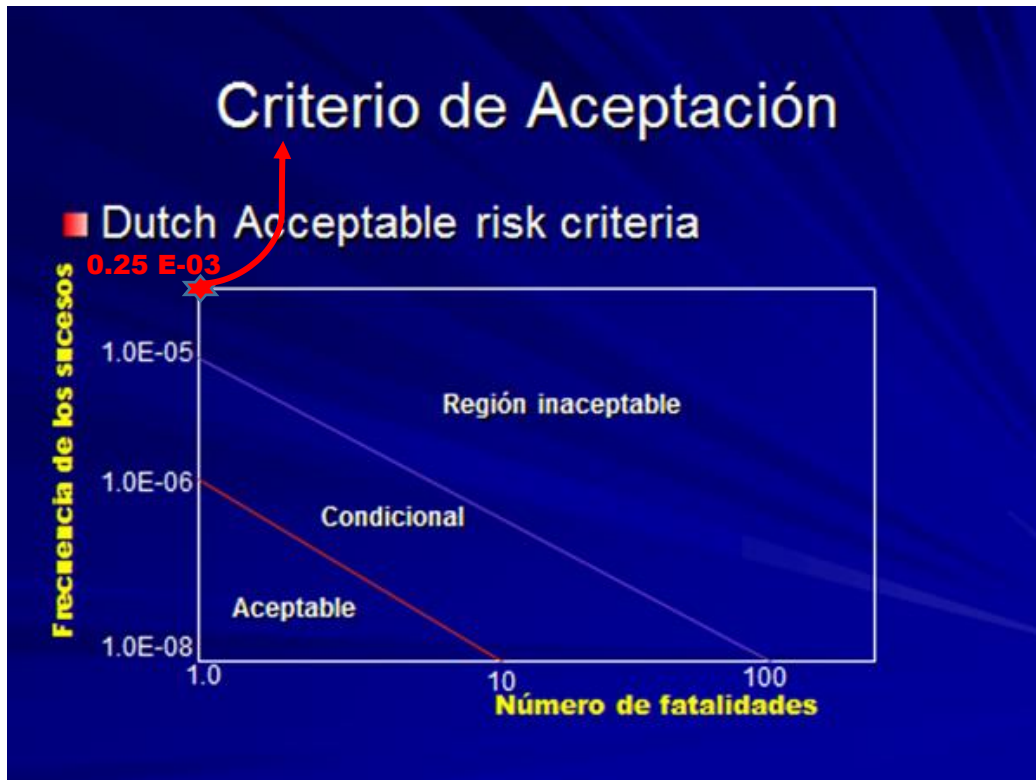
Puesto que grandes preocupaciones sociales pueden presentarse cuando son las fatalidades son múltiples y ocurren en un acontecimiento, el HSE propone que el límite de la tolerabilidad de un accidente que causa la muerte de cincuenta personas o más en un solo acontecimiento debe ser menos que uno en quinientos mil, por año.

La Autoridad de Salud y Seguridad del Reino Unido (HSE) define: “Riesgo Aceptable es aquel que toda persona se encuentra preparada para aceptar bajo unas condiciones normales de vida o de trabajo” y, “Riesgo Tolerable es aquel riesgo asumido por una sociedad en función de unos beneficios efectivos y siempre que no sea posible reducirlo, o bien, que su coste sea abultadamente desproporcionado” (ALARP – “As low as reasonable posible”).

Se han propuesto gráficos F-N (Frecuencia acumulada de fallos – Número de víctimas) como referencia para la toma de decisiones en lo referente a la disminución del riesgo. Estas curvas se comparan con los riesgos derivados de otras industrias y actividades. Así se visualizan conceptos sobre niveles de seguridad o áreas de distinto riesgo: aceptable, tolerable e inaceptable.

Volviendo al análisis de los resultados obtenidos en la aplicación del FTA al dique de residuos mineros de Ticapampa, la probabilidad del top event inicialmente elegido que supone un escenario con víctimas y daños muy severos al medio ambiente, no sería tolerable en una probabilidad inferior a 1/10 000, con lo cual esta calificación arrastra la decisión de eliminar el peligro de manera inmediata o, al menos, reducirlo a 1/100 000. En el caso de una situación cercana a este último valor, se debería aplicar el criterio ALARP reduciendo en condiciones de viabilidad económica el mayor riesgo detectado y hasta donde razonablemente fuese posible. Un análisis coste / beneficio ayudaría a esta labor.

En el caso tratado la probabilidad estimada es de 1/2000 que supone quedar incluido dentro del área de los valores de probabilidad inaceptable. Como objetivo se debe programar acciones inmediatas para reducir la probabilidad hasta la situación ALARP.



**Figura 4.22** Representación de la aceptación de un suceso no deseado para el caso analizado en la presa de relaves de Ticampampa.



## 5. CONCLUSIONES

Antes de proceder a enumerar las conclusiones más importantes del trabajo, conviene no olvidar el carácter demostrativo del análisis y valoración efectuado y que, por lo tanto, debe ser tenido en cuenta como objetivo de esta aplicación. De esta manera se destacan los siguientes logros o conclusiones:

- Ha quedado suficientemente demostrada la eficacia de la valoración efectuada con el procedimiento último de la Metodología de Valoración de Riesgos del IGME, sobre un dique de residuos mineros tan vulnerable como el de Ticapampa. La bondad del procedimiento alcanza a la versatilidad, robustez, facilidad de elaboración y, también, la transmisión de la sensación de fiabilidad en dominios alejados o poco conocidos.
- Como no podía ser de otra manera, la calidad del conocimiento geológico (sobre todo geomorfológico), de la climatología y de los procesos activos serán un factor decisivo en conseguir una buena calidad de los resultados utilizando el procedimiento de valoración diseñado por el IGME.
- También destaca la necesidad de la adquisición de datos de tipo estructural y de composición del acopio de residuos, a veces difícil de conseguir, tal como es el caso analizado.
- La metodología del árbol de fallos se beneficia del análisis anterior y presenta de manera cuantitativa el valor de probabilidad de ocurrencia del efecto no deseado que debe ser evitado. Su aplicación a Ticapampa ha ayudado a comprender el fenómeno y de las limitaciones de información en que se ha movido.



- En el análisis realizado por FTA destaca la contundencia de la responsabilidad de la rama dedicada al riesgo sísmico en comparación con la referida al riesgo de aguaceros extraordinarios. Eso quizás es la causa de la supervivencia de este acopio de residuos en una situación tan precaria.
- No obstante, resulta una herramienta muy eficaz para descubrir y afirmar los caminos de acción que deben seguirse para definir los planes de corrección. La disposición de experiencia y, sobre todo, del equipo multidisciplinar que se precisa en casos delicados se demuestra como una garantía de la calidad final de la valoración.
- La complementariedad de ambos sistemas puede deslumbrarse a pesar de las diferencias de concepto que hay entre ellos. Es posible la inserción de los dos sistemas en un solo modelo amplio que podría estudiarse. También quedan abiertos nuevos caminos para la investigación, incluyendo las respuestas geotécnicas y geoquímicas (grado de liberación de sulfatos y el aumento de las fracciones más móviles) que pueden ser valoradas en términos de probabilidad. La introducción del modelo IGME en el análisis ALARP y sus conceptos de valoración técnica y económica sería otra línea a estudiar.



## 6. BIBLIOGRAFIA

- Acosta, J. A., Martínez-Martínez, S., Martínez-Pagan, P. Zornoza, R. Carmona, D. M. y Faz, A. (2011). Estudio de estabilidad en depósitos de lodos del Distrito Minero de Mazarrón (SE España): Riesgos potenciales sobre la Rambla de Las Moreras. *Boletín Geológico y Minero*, 122, 3-16.
- Alberruche del Campo, M. E., Arranz-González, J. C., Rodríguez-Pacheco, R., Vadillo-Fernández, L., Rodríguez-Gómez, V. y Fernández-Naranjo, F. J. (2014). Manual para la evaluación de riesgos de instalaciones de residuos de industrias extractivas cerradas o abandonadas. Madrid: MAGRAMA-IGME. [http://libros.igme.es/product\\_info.php?products\\_id=129](http://libros.igme.es/product_info.php?products_id=129)
- Alva Hurtado, Jorge (2005) Actualización de los Parámetros Sismológicos en la Evaluación del Peligro Sísmico en el Perú, *Ingeniería Civil*, N° 03. nov. 2005.
- Autoridad Nacional del Agua, 2011. Tratamiento de cauce del río para el control de inundaciones en la cuenca santa. Dirección de estudios de proyectos hidráulicos multisectoriales (Perú)
- Bustillo, M. A., Aparicio, A. & García, R. 2010. Surface saline deposits and their substrates in a polluted arid valley (Murcia, Spain). *Environmental Earth Sciences*, 60, 1215-1225.
- Calzado P. Luis (1997). Caracterización y categorización de los problemas ambientales de la minería en el Perú. Primer Simposio Nacional de Medio Ambiente y Seguridad Minera – Colegio de Ingenieros del Perú.



- Carmona, D. M., Faz-Cano, A. & Arocena, J. M. 2009. Cadmium, copper, lead, and zinc in secondary sulphate minerals in soils of mined areas in Southeast Spain. *Geoderma*, 150, 150-157.
- Callaba de Roa, A. y Vadillo Fernández, L. 1989. Contaminación por metales pesados asociados a una mina de Pb-Zn de la provincia de Toledo. III Congreso de Geoquímica de España, Soria, II, IX, 21-28.
- CESEL S.A. (2009) “Elaboración del Plan de Cierre de Pasivos del Depósito de Relaves de Ticapampa” Compañía Minera YAHUARCOCHA S.A.
- Espí J.A. 2007. “Metodologías del Análisis de Riesgo en su aplicación a los problemas ambientales y de seguridad en la Industria Minera”
- Fischhoff, B., Acceptable risk: A conceptual proposal. *Risk: Health, Safety & Environment*, 1, 1994, pp. 1-28.
- Graham, Wayne J. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure. U.S. Department of Interior. Bureau of Reclamation, DSO-99-06, 1999.
- HSE (Health and Safety Executive). Reducing risks, protecting people - HSE's decision-making process, Health and Safety Executive, Gran Bretaña. Jonkman. 2001.
- IGME. 1974. Investigación de minerales en el área de Mazarambroz (Toledo). Fase previa. Colección Informes. Informe Inédito.
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2004) - Mapa de peligro, plan de usos de suelo y medidas de mitigación ante desastres, ciudades de Recuay, Ticapampa y Catac. Proyecto INDECI-PNUD PER/02/51 Ciudades Sostenibles. Lima: INDECI.



- Jara Facundo, M. A. 2011. Extracción química secuencial de metales pesados en el estudio de alteración química de relaves de mina en Ticapampa (Huaraz, Perú)
- Jara Facundo, M. 2003. “Distribución de Metales Pesados en Agua y Sedimento y sus Efectos sobre la Vida Acuática en la Cuenca Superior del río Santa”, Tesis para optar el Grado de Magíster en Medio Ambiente, UNI.
- Jiménez Ballesta, R., Conde Bueno, P., Martín Rubí, J.A. y García Giménez, R. 2010. Niveles de fondo geoquímico e influencia del marco geológico en las concentraciones edafogeoquímicas de base de suelos seleccionados de Castilla-La Mancha. *Estudios Geológicos*, 66(1): 123-130.
- Junta de Andalucía. 2004. *Estudio de Elementos Traza en Suelos de Andalucía*. Serie Informes, Estudios, Trabajos y Dictámenes. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. 165 p.
- Martínez-Sánchez, M. J. & Pérez-Sirvent, C. 2007. *Niveles de fondo y niveles genéricos de referencia de metales pesados en suelos de la Región de Murcia*. Consejería de Desarrollo Sostenible y Ordenación del Territorio de la Región de Murcia. Murcia.
- Macho Jiménez, A., Vadillo Fernández, L., Rodríguez Pacheco, R. Fernández Naranjo, F. J., Arranz González, J. C., Alberruche del Campo, E., Rodríguez Gómez, V. 2014. “Metodología para la realización de un inventario de instalaciones de residuos mineros cerradas o abandonadas”. Instituto Geológico y Minero de España-Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Milla Vergara, Elio (2011), Estudio de Peligro Sísmico Depósito de Residuos Inertes – Ticapampa - Recuay – Ancash





- Nelson, J.D., Volpe, R.L., Wardwell, R.E., Schumm, S.A., & Staub, W.P. (1983). *Design considerations for long-term stabilization of uranium mill tailings impoundments*. United States
- Oyarzun, R., Lillo, J., López-García, J. A., Esbrí, J. M., Cubas, P., Llanos, W. & Higuera, P. 2011. The Mazarrón Pb-(Ag)-Zn mining district (SE Spain) as a source of heavy metal contamination in a semiarid realm: Geochemical data from mine wastes, soils, and stream sediments. *Journal of Geochemical Exploration*, 109, 113-124.
- Pastor, J., Gutiérrez-Ginés, M.J. y Hernández, A.J. 2010. Contenidos de metales en plantas y estudio de la generación de lixiviados en una antigua mina de plata con contenidos elevados de Zn y Pb. In: Estavillo Aurre, J.M., *Aspectos fisiológicos, agronómicos y ambientales en la nutrición mineral de las plantas*. pp. 217-223.
- Rodríguez R., Estupiñán M., Iglesias M. y Castillo E. 2007. Evaluación del riesgo ambiental de los pasivos ambientales de la cuenca alta del río santa en el departamento de Ancash, Perú
- Servicio Nacional de Geología y Minería. SERNAGEOMIN Chile 2014. Guía metodológica de evaluación de riesgos para el cierre de faenas mineras.
- Vicente Fernández, A. 2015. Metodología para la remediación de instalaciones de residuos mineros procedentes de la minería metálica orientada a la reducción del riesgo y al aprovechamiento de sus residuos. Tesis Doctoral
- Villanueva Ramírez, Ricardo 2011. Características de la cuenca del río Santa



## **7. ANEXOS**

### **ANEXO I. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGOS IGME A DOS PRESAS SELECCIONADAS EN ESPAÑA**



### **A.I.1. SELECCIÓN DE LAS PRESAS**

Se han seleccionado dos presas de residuos mineros de flotación (lodos o relaves) para mostrar la aplicación del método desarrollado por el IGME. Las presas seleccionadas se han denominado:

- ✓ La Económica, situada en las inmediaciones de las Minas de Guajaraz (municipio: Mazarambroz; provincia: Toledo; comunidad autónoma: Castilla la Mancha.
- ✓ San Cristóbal Oeste, situada en el Cerro de San Cristóbal (municipio: Mazarrón; provincia: Murcia; comunidad autónoma: Región de Murcia)

La selección de las presas se ha realizado para mostrar dos ejemplos de evaluación de riesgos empleando la metodología IGME, para lo que ha sido necesario el empleo de la publicación de Alberruche et al. (2014) a la que se hará referencia en adelante como manual del IGME. Los datos y algunas imágenes proceden de los inventarios desarrollados por el personal del IGME. Ambas presas son merecedoras de estar en el inventario recientemente realizado por el IGME, si bien, debido a las diferentes características de las mismas y del entorno en el que se ubican, arrojan resultados distintos como se mostrará a lo largo de las páginas de este ANEXO.

### **A.I.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PRESAS Y DE SU ENTORNO**

La presa denominada La Económica está asociada a la mina del mismo nombre. En esta mina fue explotada desde finales del siglo XIX hasta la década de 1970. Entre sus ruinas es posible apreciar el lavadero, un cuarto de máquinas, el castillete de hierro del pozo principal (unos 230 m. de profundidad), talleres, etc. La explotación minera se centró en una mineralización de origen hidrotermal, formada preferentemente por una asociación de blenda y galena de morfología filoniana encajada en gneises

(IGME, 1974; Callaba y Vadillo, 1989). Las Figuras A1 y A2 muestran la situación y el aspecto que presenta la presa.

Es una presa que está ubicada prácticamente sobre el valle de un arroyo intermitente. El entorno se compone fundamentalmente de terrenos cultivados de secano extensivo y matorrales degradados.

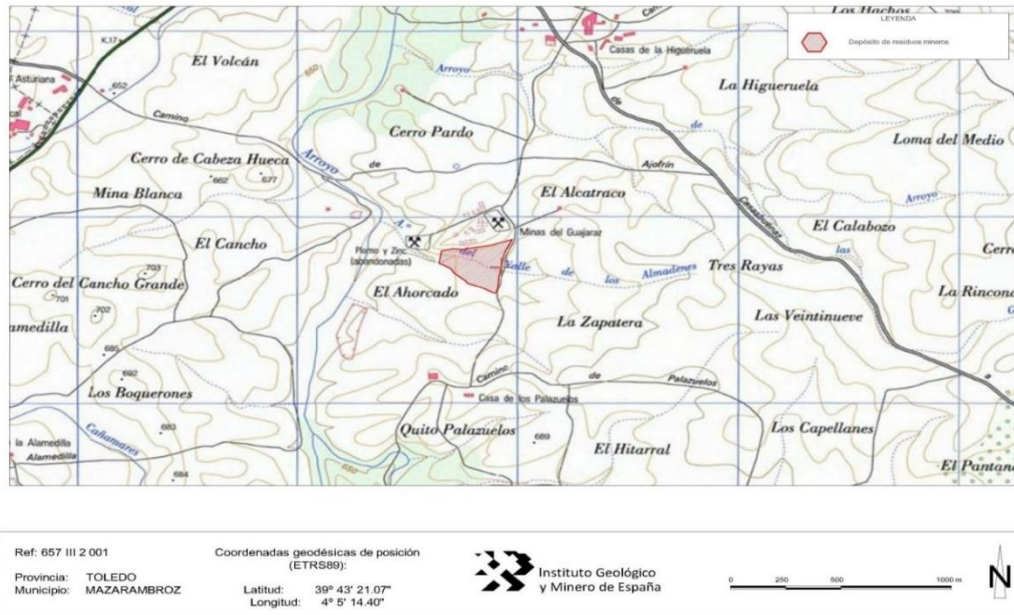
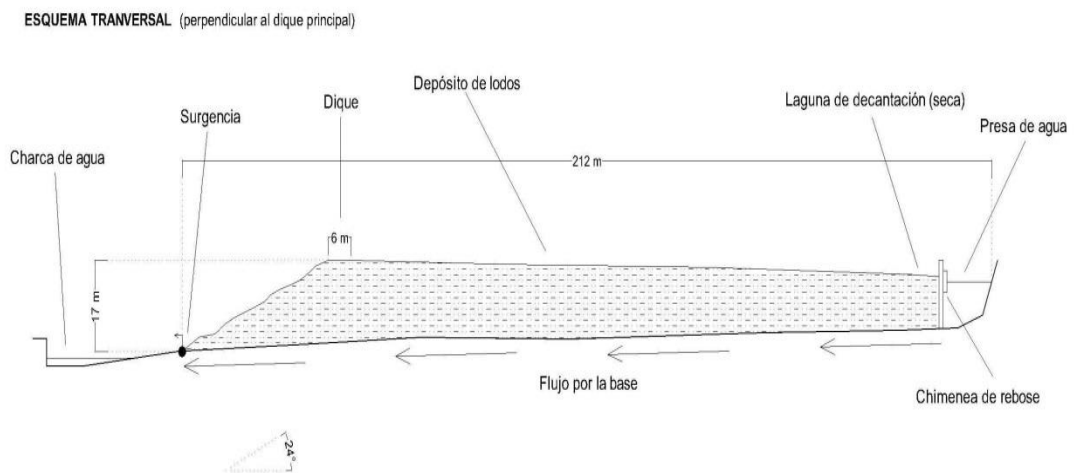


Figura A1. Situación geográfica de la presa La Económica.



Figura A2. Vista satelital de la presa La Económica.

Esta presa de lodos de flotación se construyó por el método de recrecimiento del dique aguas arriba. El dique se compone de arenas de ciclonado y tiene unos 17 metros de altura. La laguna de decantación se encuentra a unos 170 metros del dique. En la cola de la presa minera existe un muro de mampostería que retiene el agua sobrenadante de la presa junto a escorrentía superficial y la canaliza por un sistema de drenaje profundo hasta su salida por el pie del dique minero (Figura A3). El drenaje profundo es un colector de 600 mm de diámetro.



**Figura A3.** Vista en perfil de la presa La Económica.

La presa presenta una baja cobertura por parte de la vegetación. Presenta en un lateral, formaciones eólicas que se apoyan en la ladera colindante. Se encuentra en un alto grado de abandono (Figura A4). Presenta un deslizamiento pequeño debido a sobrepaso) y presenta regueros de erosión y socavación mecánica (Figura A5).



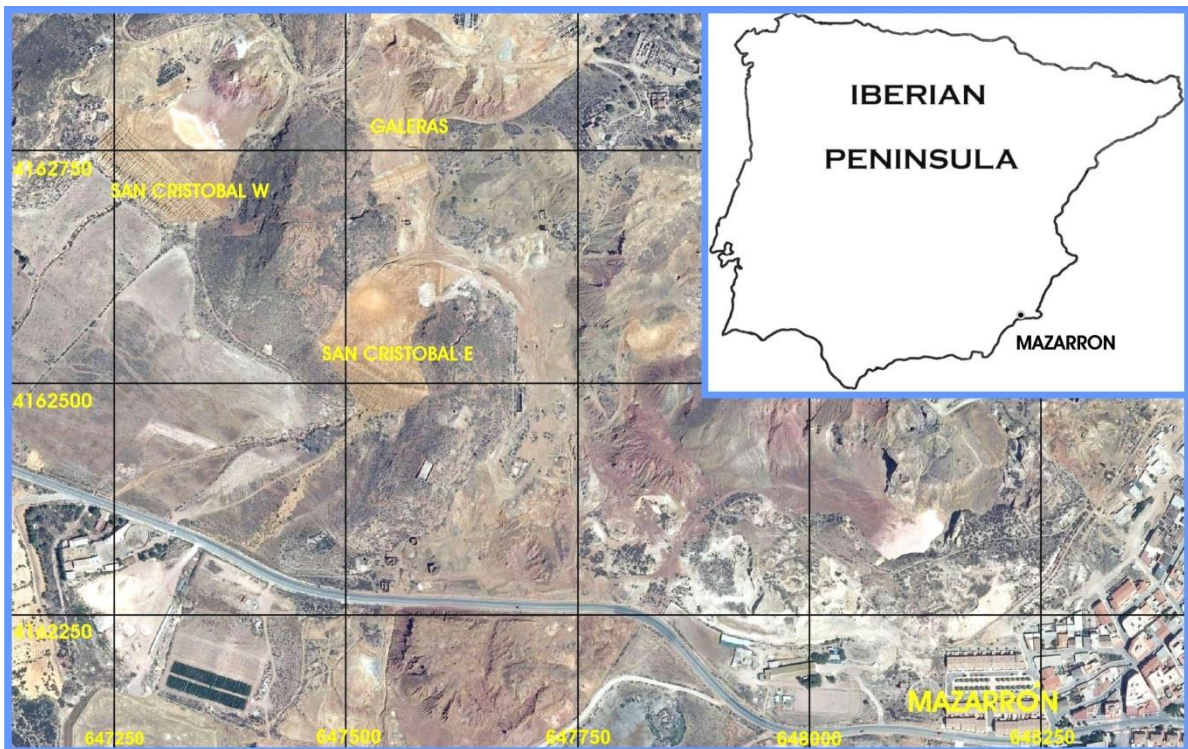
**Figura A4.** Panorámica general de la presa La Económica.



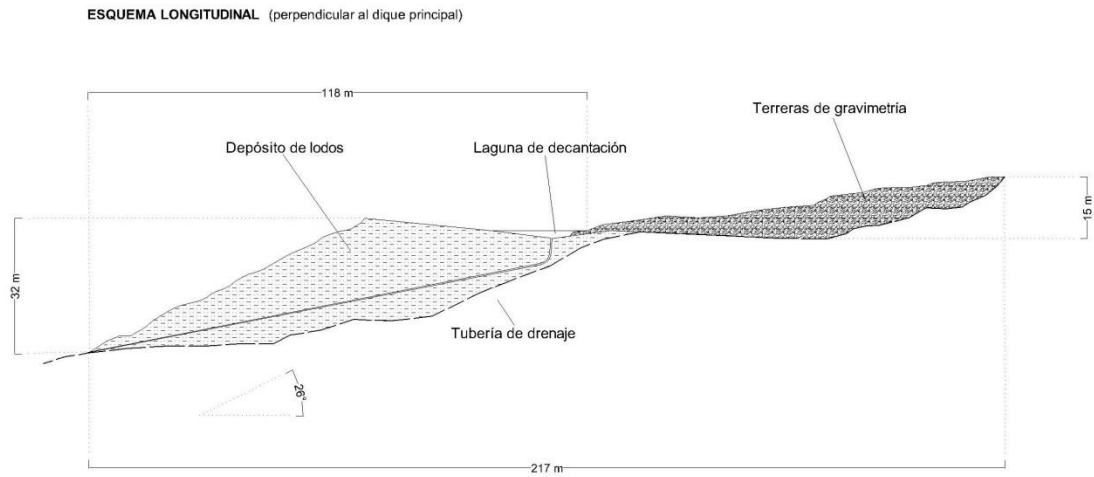
**Figura A5.** Deslizamiento del dique de la presa La Económica.



La presa minera denominada San Cristóbal Oeste se encuentra localizada en el Distrito Minero de Mazarrón. Mazarrón fue uno de los distritos mineros más importantes ubicados en el sudeste de España. Los yacimientos mineros de este distrito se caracterizan por la presencia de domos volcánicos y tobas (andesitas, dacítas y riódacitas) que se sometieron a una fuerte alteración hidrotermal. El yacimiento de San Cristóbal se explotaba ya en la época romana para la extracción de Pb, y para el beneficio de Pb, Ag y Zn durante los siglos 19 y 20 (hasta 1966). Los principales minerales eran sulfuros como la galena, pirita y blenda. Otros sulfuros minerales presentes eran estibina, calcopirita y arsenopirita. Debido a las actividades mineras, esta zona presenta un gran legado de residuos mineros abandonados de varios tipos (Oyarzun et al., 2011), entre los que destacan diversas presas de flotación muy próximas a la población de Mazarrón (Figura A6).



**Figura A6.** Vista satelital de la zona Mazarrón.



**Figura A7.** Vista de perfil de la presa de San Cristóbal Oeste

La Figura A7 muestra una imagen del perfil de la presa. Puede verse que en la zona de cola de la misma existe una ligera sobrecarga debida a otra acumulación de residuos mineros

Las presa minera San Cristóbal Oeste ha sido sometida a la meteorización y la erosión por un período de más de 40 años, que ha conducido a la oxidación de la superficie de los residuos con generación de drenajes ácidos (enriquecidos en sulfato y otros elementos), así como a la emisión de material particulado y a intensos procesos de erosión hídrica (Figura A8) (Carmona et al., 2009; Oyarzun et al., 2011; Acosta et al., 2011)





**Figura A8.** Vista del dique de la presa de Relaves San Cristóbal Oeste.

## **A.I.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGOS DEL IGME A LAS PRESAS SELECCIONADAS**

La aplicación de la metodología del IGME a las presas seleccionadas que se desarrolla a continuación parte de la información recogida en los trabajos de inventario desarrollados por el personal del propio instituto y de los resultados obtenidos sus laboratorios. La descripción del método se resume en el CAPÍTULO 2.

### **A.I.2.1. Escenario de generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales: $I_P$ (C1)**

El cálculo del Índice de Probabilidad de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales  $I_P$  (C1) se basa en la siguiente fórmula:



$$I_p (C1) = P_R \times F_{TOX} \times F_{SD}$$

El Factor de Toxicidad o Peligrosidad de los residuos ( $F_{TOX}$ ), se calcula con los resultados de a partir de una fórmula de cálculo para el denominado cociente promedio de Peligrosidad ( $CPP_{LAB}$ ), empleando los datos de contenidos en elementos traza obtenidos en laboratorio mediante el ensayo de lixiviación EN 12457-4, y relacionándolos con un estándar de calidad de aguas. En la Tabla A1 se muestran los datos de las dos presas seleccionadas. Como se observa, los datos de elementos solubles de la presa de San Cristóbal Oeste son muy superiores en general a los de la presa La Económica, por lo que el valor obtenido para el parámetro  $CPP_{LAB}$  es también muy superior.

ELEMENTOS ( $\mu\text{g/l}$ )	Estándar adoptado ( $\mu\text{g/L}$ )	La Económica (Toledo)	San Cristóbal W (Mazarrón)
Al	50	104,0	153000,0
As	10	59,6	18,4
Cd	0,25	1,1	346,0
Co	20	2,4	144,0
Cr	50	0,4	148,0
Cu	10	53,4	1128,0
Hg	1	<0,5	<2
Mo	70	3,5	0,1
Ni	20	24,2	317,0
Pb	10	59,2	<0,8
Se	1	<0,5	13,1
V	6	0,8	0,5
Zn	120	330,0	136000,0
pH	6,5-8,5	5,8	2,5
CE ( $\mu\text{S/cm}$ )		138	3160
<b>CPP<sub>LAB</sub></b>		<b>3,9</b>	<b>637</b>

**Tabla A1.** Valores del estándar adoptado en la metodología de evaluación de riesgos del IGME y datos de análisis de laboratorio con el ensayo EN 12457-4 (obtenidos en los laboratorios del IGME).



El llamado Factor de Toxicidad o Peligrosidad  $F_{TOX}$  se obtiene aplicando una fórmula o entrando en la correspondiente gráfica. El resultado obtenido para La Económica es 0,049, que puede considerarse despreciable, por lo que el  $I_P$  (C1) será nulo. Este resultado está de acuerdo con lo observado por Pastor et al. (2010), los cuales aprecian contenidos muy bajos en lixiviados obtenidos después de 120 días de bioensayos con materiales de La económica.

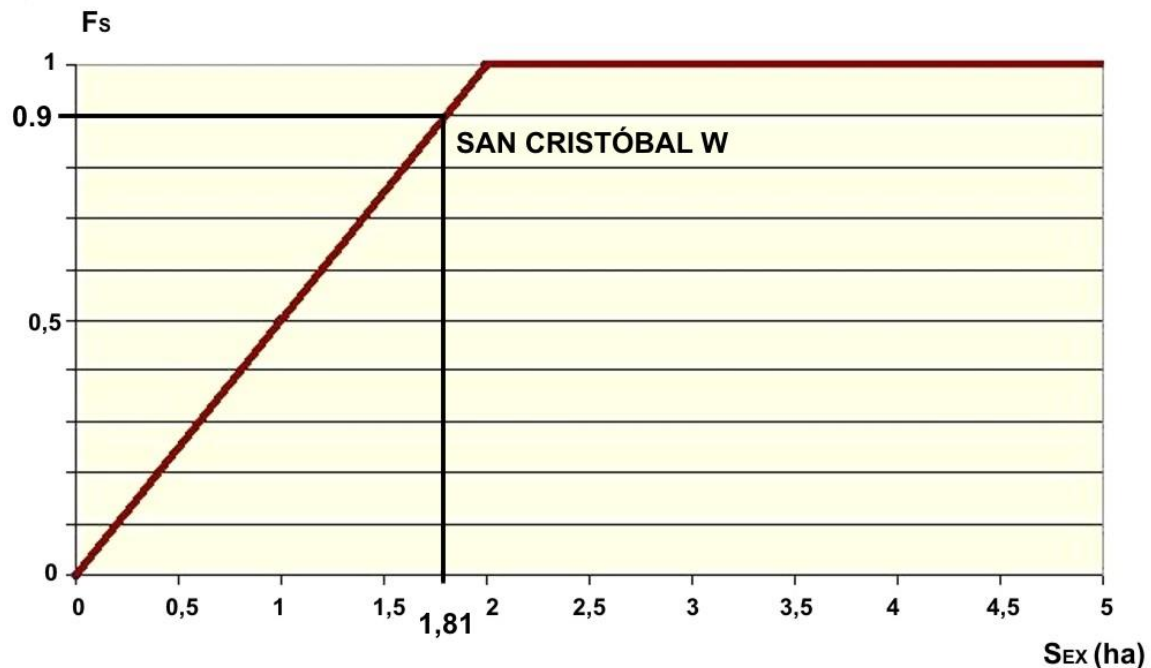
El valor de  $I_P$  (C1) para el caso de San Cristóbal Oeste es el máximo (5). Ésta calificación también es coherente con las conclusiones expresadas en varios trabajos llevados a cabo en el área de San Cristóbal (Carmona et al 2009; Bustillo et al 2010). Los principales elementos que influyen en la obtención de un valor tan alto de  $CPP_{LAB}$  son Zn, Al, Cu, Cd y, en menor medida: Ni, As, Co, y Se.

El Factor de proximidad ( $P_R$ ) en el caso de San Cristóbal es 1, por considerarse que la presa está en contacto con un cauce aunque sea de poca entidad (de hecho está encima, como puede verse en la Figura A9, que muestra una



fotografía tomada desde el borde del dique de la presa).

**Figura A9.** Presa de San Cristóbal Oeste situada sobre un cauce intermitente de poca entidad.



**Figura A10.** Gráfica que muestra el Factor Superficial ( $F_S$ ) en función del valor obtenido de la Superficie Total expuesta del depósito minero ( $S_{EX}$ ) para San Cristóbal Oeste.

La presa de San Cristóbal ofrece una Superficie expuesta ( $S_{EX}$ ) de 1,81 ha. Por medio de la gráfica siguiente (Figura A10) se calcula el Factor Superficial ( $F_S$ ) que resulta 0,9. Como la fracción de Cobertura ( $F_C$ ) es cero. El Factor de Superficie Desprotegida ( $F_{SD}$ ) resulta ser de 0,9. Por tanto,  $I_P(C1) = 1 \times 5 \times 0,9 = 4,5$

Conocidos los valores del Índice de Probabilidad relativo a la posibilidad de contaminar aguas superficiales, se procede a calcular el Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población, el medio natural y el medio socioeconómico:  $I_S(C1PO)$ ,  $I_S(C1NA)$  y  $I_S(C1SE)$ . En el caso de la presa La Económica no se calcula al haber resultado nulo el Índice de Probabilidad, es decir, no procede calcular dichos índices.

Para la población  $I_S(C1PO)$ , como no existe ningún aprovechamiento de aguas afectadas directamente por los efluentes de la presa:  $P_{EX}$  y  $F_{SUP}$  son cero. La fórmula para su cálculo es:

$$I_S(C1PO) = 0,5 P_{EX} + 0,5 (F_{SUP} \times V_P) = 0$$



En cuanto al medio natural  $I_S$  (C1NA), se calcula con la fórmula siguiente:

$$I_S (C1NA) = F_{SUP} \times V_E$$

Para el Factor de Exposición ( $F_{SUP}$ ), se da la circunstancia de que hay un Humedal RAMSAR aguas abajo a menos de 5000 m de distancia (concretamente a 1500 m). Con ello el Factor  $F_{SUP}$  resulta ser 0,7, El Factor de Vulnerabilidad ecológica ( $V_E$ ) es valorado como 5, según se deduce de las tablas elaboradas por el IGME. Por tanto,  $I_S(C1NA)$  es igual a 3,5.

Para el medio socioeconómico  $I_S$  (C1SE), como ocurre en la generalidad de los casos, se considerará que la valoración de la Severidad asociada a este escenario no procede ser valorada, o lo que es lo mismo, que sea nula.

#### **A.I.2.2. Escenario de generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas subterráneas: C2**

La Probabilidad de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos  $I_P$  (C2), depende en primer lugar de la existencia de masas de agua subterráneas reconocidas. En ambos casos, no existe acuífero o masa de agua reconocida de aguas subterráneas, por lo que el Índice de Probabilidad de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos  $I_P$  (C2) es 0, tanto para La Económica como para San Cristóbal Oeste.

#### **A.I.2.3. Escenario de movilización de material particulado por acción del viento: C3**

El cálculo del Índice de Probabilidad de la movilización de material particulado por acción del viento  $I_P$  (C3) se realiza mediante la aplicación de la siguiente ecuación:



$$I_p (C3) = E_e \times F_{AR} \times V_V \times F_S \times F_{DS}$$

El llamado Factor de Erodibilidad Eólica ( $E_e$ ), de carácter cualitativo, toma el valor 5 cuando se alcanza o supera un 50 % de contenido en partículas de tamaño inferior a 75  $\mu\text{m}$ .

Para la presa La Económica, según las muestras analizadas en los laboratorios del IGME, el material es todo de un tamaño tal que un 85% del material es inferior a 0,075 mm. Por tanto  $E_e$  será igual 5. Para la presa San Cristóbal Oeste, el material es tal que un 55% es inferior a 0,075 mm. Por ello  $E_e$  será, como en el caso anterior, igual a 5.

El Factor de Aridez del clima ( $F_{AR}$ ), se calcula a partir del valor del Índice de Martonne. El Índice de Aridez de De Martonne ( $I_a$ ) se calcula usando la formula siguiente:

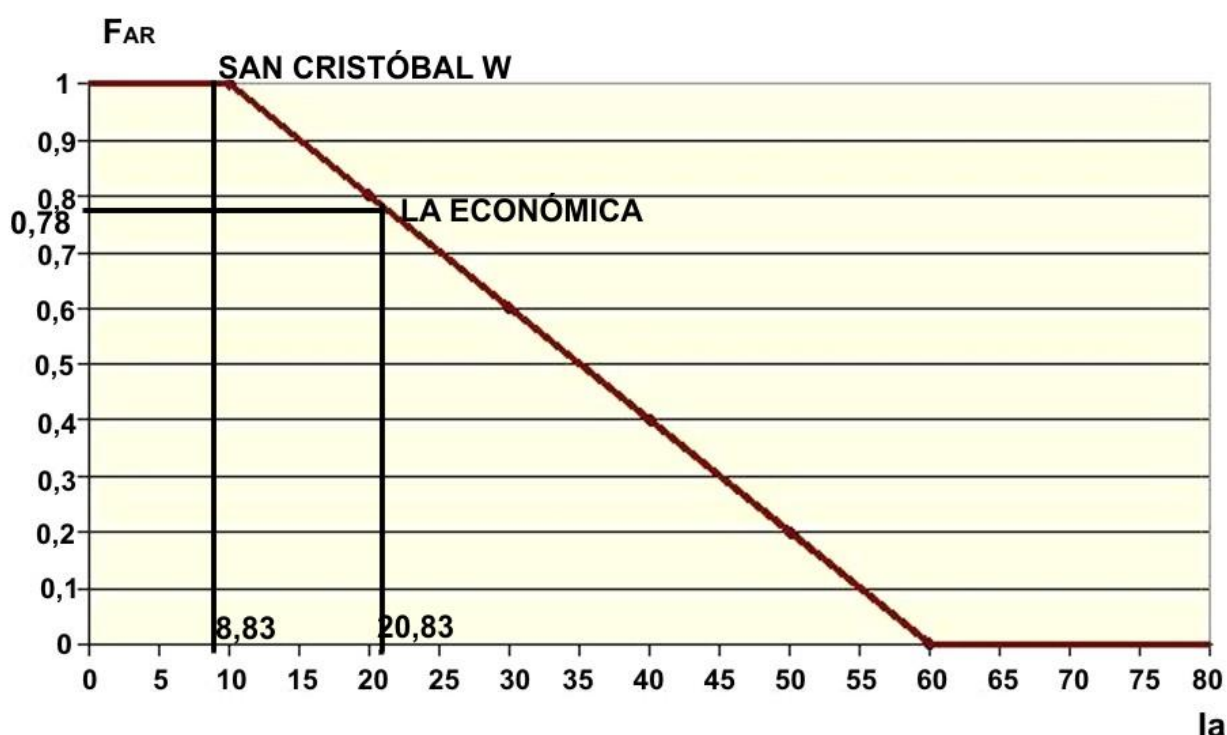
$$I_a = P / (T+10)$$

Dónde:

- $I_a$  = Índice de Aridez de De Martonne
- $P$  = Precipitación media anual en mm
- $T$  = Temperatura media anual en  $^{\circ}\text{C}$



Para la presa La Económica, el Índice de De Martonne resulta 20,83 y, por tanto, el Factor de Aridez del clima  $F_{AR}$  resulta 0,78. Para la presa San Cristóbal W, el Índice de De Martonne vale 8,93 (zona árida), por lo que  $F_{AR}$  resulta 1. En la Figura A11 se visualizan estas valoraciones.

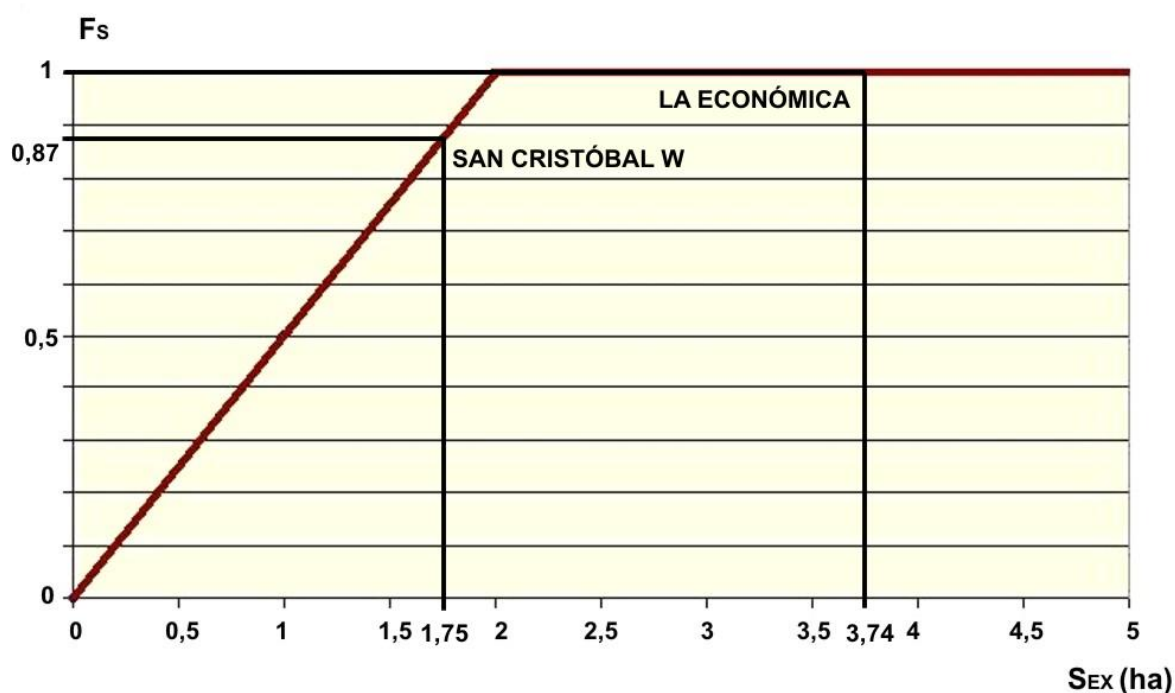


**Figura A11.** Gráfica donde se asignan los valores del Factor de Aridez ( $F_{AR}$ ) función del Índice de Aridez de Martonne ( $I_a$ ), para las presas seleccionadas.

El llamado Factor de Velocidad del Viento ( $V_v$ ), es evaluado a partir de los valores de la velocidad media anual (m/s) del viento en cada una de las zonas. La metodología del IGME propone que para España se haga uso del Mapa Eólico Nacional, desarrollado por el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER). Dicho mapa proporciona la velocidad media anual del viento, a una altura de 10 m, en todo el territorio. De allí se obtiene que la velocidad media del viento es 2,99 m/s, en el caso de La Económica, y de 3,2 m/s para San Cristóbal Oeste, resultando que  $V_v$  alcanza el valor de 1 en ambos escenarios.



El Factor Superficial ( $F_S$ ) puede valorarse utilizando la gráfica de la Figura A12. En esta gráfica se relaciona la Superficie expuesta ( $S_{EX}$ ) de cada presa con el Factor buscado. Para la presa La Económica, con 3,74 ha de Superficie expuesta, el Factor Superficial ( $F_S$ ) es igual a 1. Para la presa San Cristóbal W, con 1,75 ha de Superficie expuesta ( $S_{EX}$ ), el Factor Superficial ( $F_S$ ) resulta ser 0,87.



**Figura A12.** Gráfica que permite asignar los valores del Factor de Superficial ( $F_S$ ) en función de la Superficie expuesta de las presas de residuos La Económica y San Cristóbal W.

Por último, el Factor de Desprotección ( $F_{DS}$ ), para la presa La Económica resulta 0,8, como se deduce de la correspondiente tabla propuesta en la metodología, al considerarse que está ligeramente protegida por la presencia de encostramientos superficiales importantes y algo de vegetación herbácea. Sin embargo, la presa San Cristóbal Oeste se considera totalmente desprotegida, por lo que el Factor  $F_{DS}$  asignado es 1. Así, finalmente tenemos:

- ✓ Para La Económica:  $I_P (C3) = 5 \times 0,78 \times 1 \times 1 \times 0,8 = 3,1$
- ✓ Para San Cristóbal W :  $I_P (C3) = 5 \times 1 \times 1 \times 0,87 \times 1 = 4,3$





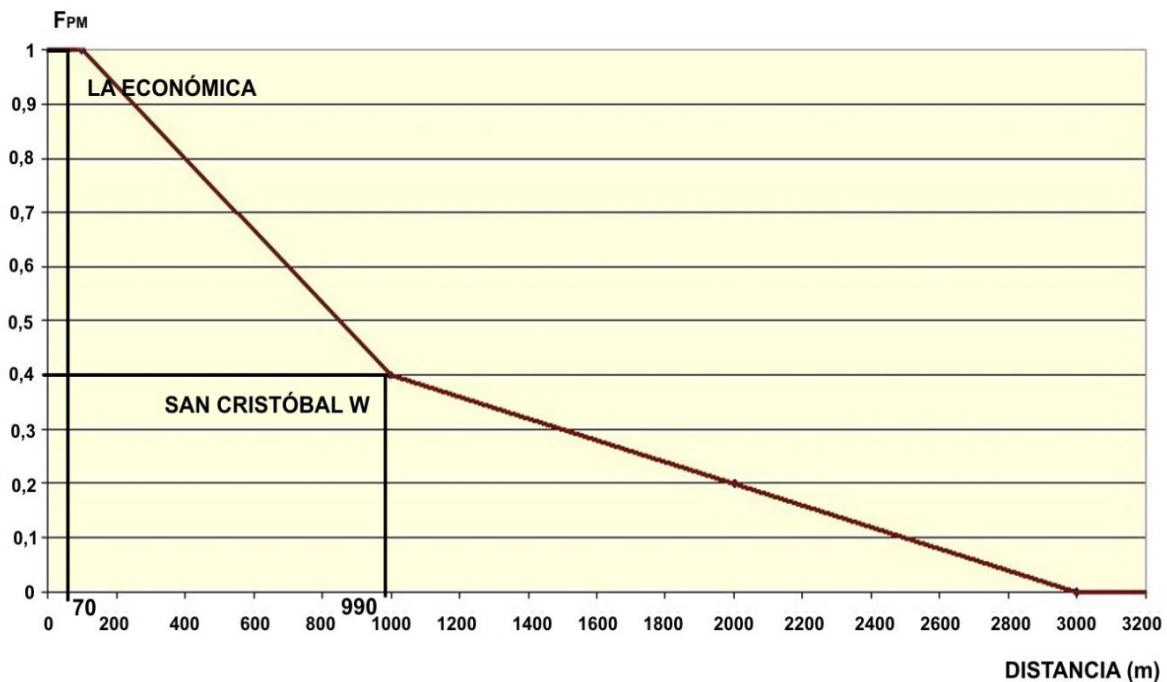
A continuación se explica el cálculo de los Índices de Severidad de los efectos sobre las personas o la población, el medio natural y el medio socioeconómico, derivados de la movilización de material particulado por acción del viento:  $I_S$  (C3PO),  $I_S$  (C3NA) y  $I_S$  (C3SE).

Para el Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población derivados de la movilización de material particulado por acción del viento  $I_S$  (C3PO), se emplea la siguiente expresión:

$$I_S (C3PO) = [0,5 P_{EX} + 0,5 (V_P \times F_{PM})] \times (1 + 5 \times F_{CO}/100)$$

Las valoraciones de los diferentes factores se realizan usando las correspondientes tablas del manual del IGME. El Factor de la población expuesta (PEX), para la presa La Económica es 0, porque no existe ninguna población a menos de 1000 m. Sin embargo, para la presa San Cristóbal Oeste alcanza el valor 5, por estar el municipio de Mazarrón (con más de 12500 habitantes) a unos 990 m.

Para el Factor de Exposición y Vulnerabilidad ( $V_P \times F_{PM}$ ), para la presa La Económica resulta igual a  $V_P \times F_{PM} = 2 \times 1 = 2$  con un escenario de exposición consistente en un uso muy poco vulnerable (agropecuario) a una distancia de unos 70 m. Para la presa San Cristóbal Oeste se tiene:  $V_P \times F_{PM} = 5 \times 0,4 = 2$  con un peor escenario de exposición consistente en un uso muy altamente vulnerable (áreas residenciales) a una distancia de unos 990 m. En la Figura A13 se muestra la forma de obtener el Factor  $F_{PM}$ .



**Figura A13.** Obtención del Factor  $F_{PM}$  relativo a los efectos del material particulado sobre la población para los usos del suelo más vulnerables.

El Factor de Capacidad de Contaminación asociado al material particulado ( $F_{CO}$ ) resulta 5 para las dos presas, por los elevados contenidos en Pb, As, y otros elementos (más adelante se muestran los datos), superándose para varios de ellos los Niveles Genéricos de Referencia para usos urbanos.

Así pues, finalmente el Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población derivados de la movilización de material particulado por acción del viento  $I_S$  (C3PO), resulta para ambos casos como se resume a continuación:

Para la presa La Económica:

$$I_S \text{ (C3PO)} = [0,5 \times 2] \times [1 + (5/100)] = 1,04$$

Para la presa San Cristóbal:

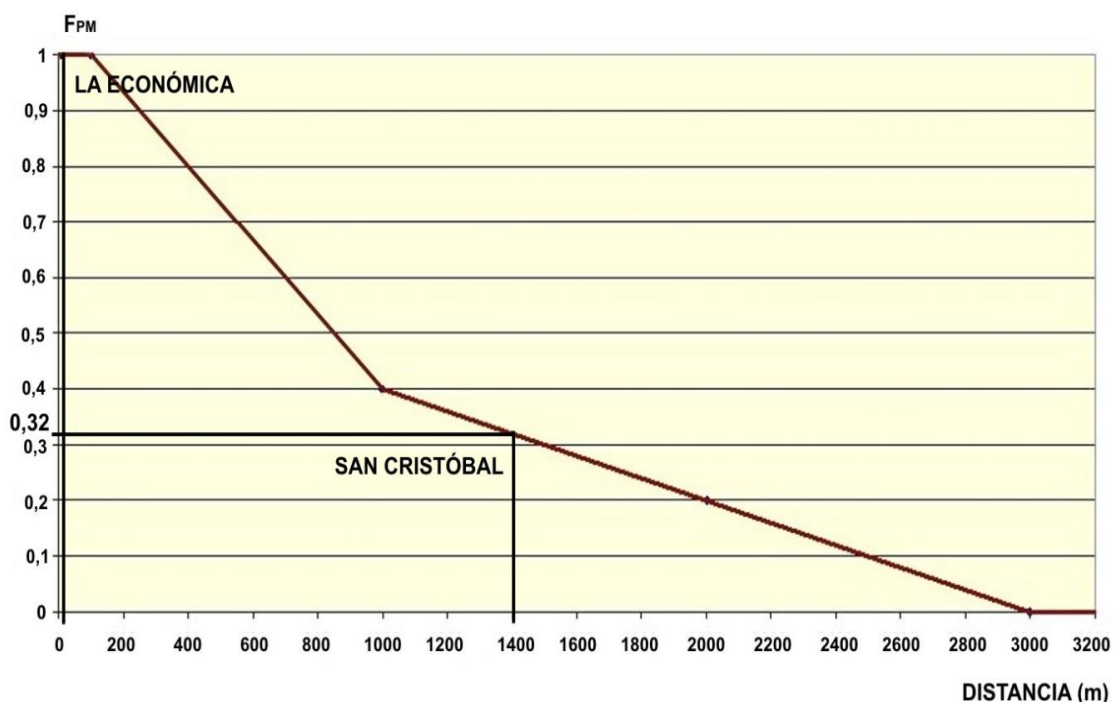
$$I_S \text{ (C3PO)} = [0,5 \times 5 + 0,5 \times (0,4 \times 5)] \times [1 + (5/100)] = 3,68$$



El Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural, derivados de la movilización de material particulado por acción del viento  $I_S$  (C3NA), queda expresado por la siguiente ecuación:

$$I_S (\text{C3NA}) = (V_E \times F_{PM}) \times (1 + F_{CO}/100)$$

El Factor de Exposición de los Ecosistemas ( $F_{PM}$ ) es 1 para la presa La Económica, debido a la existencia pastizales y cultivos como ecosistemas más vulnerables en las inmediaciones (Figura A14). Dichos espacios se consideran de una vulnerabilidad baja, con Factor de Vulnerabilidad del medio natural  $V_E=2$ . Para la presa San Cristóbal Oeste, el elemento más vulnerable es un LIC (la laguna de Las Moreras, que además es un Humedal RAMSAR) situada a 1400 m. Su Factor de Vulnerabilidad es  $V_E=5$ .



**Figura A14.** Obtención del Factor  $F_{PM}$  relativo a los efectos del material particulado sobre el medio natural considerando el elemento más vulnerable.

Resulta finalmente, para la presa La Económica,  $I_S$  (C3NA) = 2,1, y para la presa San Cristóbal Oeste,  $I_S$  (C3NA) = 1,7.

Para el cálculo del Índice de Severidad sobre el medio socioeconómico no se aprecia nada destacable, como ocurría anteriormente.



#### A.I.2.4. Escenario de emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica (C4)

La Probabilidad de Ocurrencia de la movilización de sedimentos contaminantes por erosión hídrica en cada estructura de almacenamiento de residuos mineros  $I_P$  (C4) se obtiene de la aplicación de la siguiente ecuación:

$$I_P (C4) = E_E \times F_{ER} \times F_{ST} \times VM \times F_{CO}$$

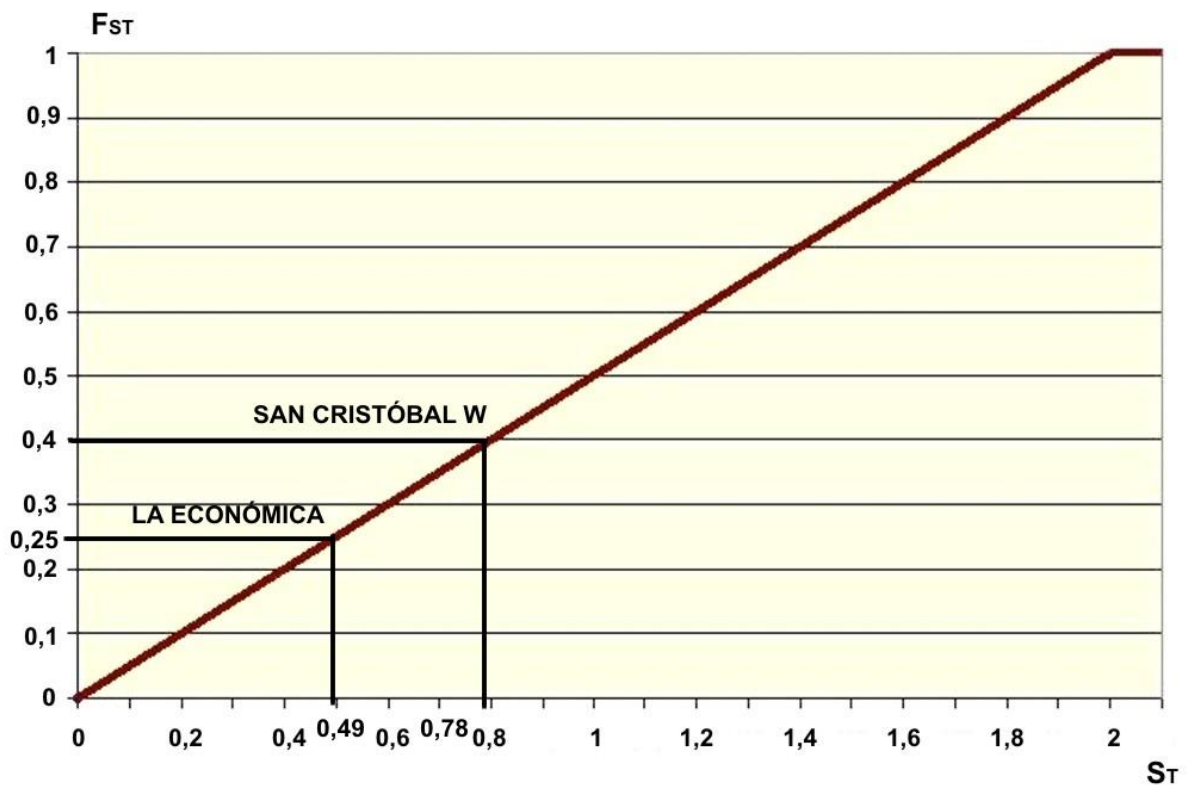
En cuanto al Estado Erosivo  $E_E$ , para la presa La Económica, se valoró considerando una fuerte incidencia de procesos erosivos, con abundantes rastros de erosión laminar, alguna cárcava y algún fenómeno de sufusión. Considerando los criterios de asignación de valores que se obtienen de tablas en el manual del IGME, se le asignó un valor de 0,9.

La presa San Cristóbal Oeste presenta una clara situación de máxima degradación por erosión hídrica. Esta presa lleva décadas emitiendo sedimentos tóxicos y reduciendo su estabilidad a consecuencia de los procesos de erosión hídrica. El valor asignado al Factor  $E_E$  es 1.

El valor del Índice de erosividad de las lluvias (R de la USLE, *Universal Soil Loss Equation*), ha sido valorado para toda la geografía española. Se trata de un valor promedio anual que puede permitir matizar la propensión a la erosión de un determinado depósito de residuos, en función de las características medias de la lluvia en el lugar donde se sitúa. En la zona donde se encuentra la presa La Económica el Factor R vale 72, y donde se sitúa la presa San Cristóbal Oeste, el Factor R vale 77. La información de la erosividad asociada al clima del lugar en el que se encuentra un depósito permite asignar valores al que se ha denominado Factor de erosividad ( $F_{ER}$ ), que para ambos casos vale 0,8.



Para evaluar las superficies más susceptibles a la erosión en las presas es necesario conocer la Superficie expuesta de los taludes de las mismas. Conociendo este dato es posible asignar un valor del llamado Factor de Superficie de taludes ( $F_{ST}$ ). En el caso de la presa La Económica, el talud del dique que se está erosionando es simple y único, y tiene una pendiente media de  $24^\circ$ . La Superficie que se ha denominado Superficie Total expuesta en taludes y/o diques ( $S_T$ ) vale  $4890 \text{ m}^2$  (0,49 ha), por lo que el Factor de Superficie de taludes ( $F_{ST}$ ) resulta 0,25. Para la presa San Cristóbal Oeste el talud del dique tiene una pendiente media de  $26^\circ$ , Superficie Total expuesta en taludes y/o diques ( $S_T$ ) vale  $7800 \text{ m}^2$  (0,78 ha), por lo que el Factor de Superficie de taludes ( $F_{ST}$ ) resulta 0,40. Estas valoraciones se muestran en la siguiente gráfica (Figura A15).



**Figura A15.** Gráfica que permite asignar valores del Factor Superficie de taludes ( $F_{ST}$ ) en función de la Superficie de taludes ( $S_T$ ), medida en hectáreas, para las presas seleccionadas

El denominado **Factor de control de la erosión (VM)**, para las dos presas es igual 1, porque simplemente no tienen ningún tipo de protección.



El Índice de Contaminación (IC), es una medida promedio de las fracciones entre los contenidos en elementos potencialmente tóxicos de interés y los valores de fondo encontrados en la bibliografía. El cálculo de este Índice para las dos presas se recoge en la tabla siguiente (Tabla A2):

PRESAS ELEMENTOS ( $\mu\text{g/g}$ )	San Cristóbal W (Mazarrón)	Nivel de Fondo de los suelos (Martínez-Sánchez <i>et al.</i> , 2007)	La Económica (Toledo)	Nivel de Fondo de los suelos (Jiménez-Ballesta <i>et al.</i> , 2010)
As	450,0	8,1	70,8	7,4
Cd	3,09	0,12	8,31	3,9
Co	4,7	7,7	13,0	5,8
Cr	27,8	44,6	93,4	54,8
Cu	45,4	18,7	54,3	10,3
Hg	4,45	0,05	--	--
Mo	1,64		1,2	0,9
Ni	12,7	16,8	30,8	16,9
Pb	1967,4	9,8	1008,0	19,3
V	35,4		33,6	49,9
Zn	4524,0	55,2	2623,0	35,7
IC	75,9		16,6	

**Tabla A2.** Valores totales obtenidos de diversos elementos potencialmente tóxicos y medida del Índice de Contaminación (IC), después de aplicar ataque trácido y medida en IC-MS a muestras compuestas superficiales de las dos presas de residuos de flotación.

Con los valores obtenidos se va a una gráfica, que permite asignar los valores del que se ha denominado Factor de Contaminación ( $F_{CO}$ ), para obtener valores siempre entre 0 y 5. Cuando se supera el valor de 16 en la valoración de IC, el Factor asignado es 5, como ocurre en ambos casos.

Finalmente, el Índice de Probabilidad de Ocurrencia de emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica  $I_P$  (C4) como se da a continuación resulta ser:



Para La Económica,  $I_P (C4) = E_E \times F_{ER} \times F_{ST} \times VM \times F_{CO} = 1 \times 0,8 \times 0,25 \times 1 \times 5 \approx 0,8$ . Para San Cristóbal Oeste,  $I_P (C4) = E_E \times F_{ER} \times F_{ST} \times VM \times F_{CO} = 1 \times 0,8 \times 0,39 \times 1 \times 5 \approx 1,6$ . Este resultado está de acuerdo con la bibliografía. Callaba y Vadillo (1989) encuentran claros indicios de contaminación en sedimentos aguas debajo de la presa La Económica. Las evidencias también son claras en Mazarrón (Oyarzun et al., 2011; Acosta et al., 2011).

El Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población derivados de la contaminación de suelos por material particulado procedente de los residuos mineros:  $I_S (C4PO)$ , se calcula con la ecuación siguiente:

$$I_S (C4PO) = 0,5 P_{EX} + 0,5 V_P$$

El Factor de la población expuesta ( $P_{EX}$ ) por abastecerse, para su consumo, de productos agrícolas cultivados en suelos afectados y el Factor de Vulnerabilidad ( $V_P$ ) de la población expuesta es función del tipo de aprovechamiento considerado más vulnerable. En ambos casos, se considera que tanto la población expuesta como el uso más vulnerable son mínimos (hay parcelas agrícolas pero son de cereal y su producción será muy baja, lo que presupone un consumo muy limitado). Por tanto,  $I_S (C4PO) = 0,5$ . Es una valoración algo arbitraria, dado el bajo nivel de información.

El Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la contaminación asociada a material particulado procedentes de la erosión hídrica de las presas de residuos mineros,  $I_S (C4NA)$ , se determina con la siguiente ecuación:

$$I_S (C4NA) = F_{SUP} \times V_E$$

Para la presa La Económica, el Factor de Exposición ( $F_{SUP}$ ) referido al ecosistema más vulnerable es 1, tratándose en este caso de un cauce en mal estado ecológico, por lo que el Factor de Vulnerabilidad  $V_E$  es también 1.



Para la presa San Cristóbal Oeste, se da la circunstancia de que hay un Humedal RAMSAR y LIC, aguas abajo a menos de 5000 m de distancia (concretamente a 1500 m). Con ello el Factor  $F_{SUP}$  resulta ser 0,7, siendo  $V_E = 5$ , dado que se considera un

Por lo tanto el Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la contaminación por material particulado generado por erosión hídrica  $I_S$  (C4NA), resulta, para la presa La Económica:  $I_S$  (C4NA) =  $1 \times 1 = 1$ , y para la presa San Cristóbal Oeste:  $I_S$  (C4NA) =  $0,7 \times 5 = 3,5$ .

#### **A.I.2.5. Escenario de contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades: CD**

El Índice de Probabilidad  $I_P$  (CD), se expresa:

$$IP (CD) = F_{CCD} \times F_{ACC} \times P_{RR}$$

El Factor de concentración de contacto directo ( $F_{CCD}$ ) se calcula sobre la base de los contenidos totales de elementos más tóxicos para personas (As, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb) medidos en los residuos. La concentración total de estos elementos traza se compara con los Niveles Genéricos de Referencia (NGR) determinados para cada metal por cada comunidad autónoma. En ocasiones, como ocurre en este caso, las comunidades autónomas a las que pertenecen las presas seleccionadas no tienen establecidos los niveles de referencia, por lo que se han considerado los trabajos de Martínez-Sánchez et al. (2007) y Jiménez-Ballesta et al. (2010). El Factor de concentración de contacto directo se establece de forma simple, asignándole el valor 5 para aquellos casos en los que se supere en NGR de alguno de los elementos anteriormente comentados. En ambas presas se tienen valores altos de As, Cd, Hg, y Pb; como se muestra en las tablas siguientes:





ELEMENTOS (µg/g)	La Económica (Toledo)	NGR propuestos para Castilla La Mancha
As	70,8	16,1
Cd	8,31	4,4
Cu	54,3	27,0
Pb	1008,0	44,2

ELEMENTOS (µg/g)	San Cristóbal W (Mazarrón)	NGR propuestos para la zona de Mazarrón
As	450,0	57
Cd	3,09	0,5
Hg	4,45	1
Pb	1967,4	22

**Tablas A3 y A4**, Contenidos totales en As, Cd, Hg, y Pb medidos en las presas seleccionadas y niveles genéricos de referencia empleados para comparar.

El llamado Factor de proximidad ( $P_{RR}$ ) a zonas residenciales (habitadas), depende de la distancia entre el depósito de residuos evaluado y la zona residencial más próxima.

La zona más próxima habitada se encuentra a más de 1000 m, por lo que  $P_{RR}$  vale 0,4 para la presa La Económica. La zona habitada más cercana, situada en las afueras de la población de Mazarrón está a algo más de 500 m por lo que  $P_{RR}$  vale 0,6 para la presa San Cristóbal Oeste.

Por otro lado, se evalúa el llamado Factor de accesibilidad ( $F_{ACC}$ ) que valora la facilidad de acceso. El valor 1 se asigna a aquellos depósitos en que la accesibilidad se ve incentivada por determinados elementos como la presencia de sendas, miradores, carteles, etc. Esto ocurre la presa de San Cristóbal Oeste, pues se ha facilitado la visita a toda la zona minera por su interés histórico (que lo tiene), aunque se ha hecho sin limitaciones, ni protecciones tales como cerramientos a los puntos más peligrosos. En el caso de La Económica no existen impedimentos importantes para el acceso, pero no está facilitado, por lo que el Factor se valora como 0,75

El Índice de Probabilidad  $I_P$  (CD), resulta, por tanto:

Para la presa La Económica:  $I_P$  (CD) =  $F_{CCD} \times F_{ACC} \times P_{RR} = 5 \times 0,4 \times 0,75 = 1,5$ .



Para la presa San Cristóbal Oeste:  $I_P (CD) = F_{CCD} \times F_{ACC} \times P_{RR} = 5 \times 1 \times 0,6 = 3$ .

En cuanto a la Severidad, sólo se contempla (como es lógico) un Índice de Severidad para la población  $I_S (CD)$ . Para ello se valora el tipo de uso del terreno que se esté dando, según la tabla siguiente. En el caso La Económica es 1, por no tener lugar sobre ella ningún uso específico, mientras que es 3 para la presa San Cristóbal Oeste, al considerarse que puede albergar un uso recreativo no intensivo.

#### **A.I.2 6. Escenario de fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros: FPRE**

El Índice de Probabilidad del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros  $I_P (FPRE)$  se evalúa sumando una serie de factores cuya valoración se obtiene en tablas incluidas en el manual del IGME.

Uno de los primeros parámetros a valorar es el volumen de residuos almacenados VOL. En función de dicho volumen se asigna un valor. En el caso de La Económica el Factor se valora como 8, pues tiene unos 300000 m<sup>3</sup>. Para San Cristóbal Oeste el Factor vale 4, pues tiene unos 180000 m<sup>3</sup>.

Otra serie de factores importantes a evaluar son todos aquellos que se refieren a las características constructivas. La valoración del Factor diseño y características constructivas del dique (DC) se expresa como suma de diversos factores:

$$DC = Mat + Mc + \Theta + H + LD$$

De la correspondiente tabla del manual del IGME se tiene:

Para La Económica:

- ✓ 12 por el material de construcción del dique (Mat), que son lodos de flotación ciclonados
- ✓ 16 por el método de recrecimiento del dique (Mc), que es aguas arriba.



- ✓ 12 por el ángulo medio del talud del dique ( $\Theta$ ), que es  $24^\circ$ .
- ✓ 8 por la altura del dique (H), que es 17 m.
- ✓ 6 por la longitud de coronación del dique ( $L_D$ ), que es 212 m.

Para San Cristóbal Oeste:

- ✓ 16 por el material de construcción del dique (Mat), que son lodos de flotación
- ✓ 16 por el método de recrecimiento del dique (Mc), que es aguas arriba.
- ✓ 12 por el ángulo medio del talud del dique ( $\Theta$ ), que es  $26^\circ$ .
- ✓ 16 por la altura del dique (H), que es 32 m.
- ✓ 4 por la longitud de coronación del dique ( $L_D$ ), que es 158 m.

El Factor denominado emplazamiento (EMP), que ha sido considerado de la máxima importancia, se valora como la suma de los valores asignados a los subfactores tipología de presa ( $T_{EMP}$ ), y el material del sustrato o cimiento sobre el que se apoya el dique (Sus):  $EMP = T_{EMP} + Sus$ .

Para La Económica, atendiendo a la tipología del lugar de emplazamiento, que es en cierre de valle se valora  $T_{EMP} = 80$ . Por el tipo de material de cimentación o sustrato sobre el que se asienta, que es roca compacta en su mayoría alterada superficialmente, se asigna el valor  $Sus = 4$ . El resultado es  $EMP = 84$ .

Para San Cristóbal Oeste, atendiendo a la tipología del lugar de emplazamiento, que es también en posición de cierre de valle se valora  $T_{EMP} = 80$ . Por el tipo de material de cimentación o sustrato sobre el que se asienta, que es roca alterada fundamentalmente, con algo de aluvial de muy poco espesor, se asigna el valor  $Sus = 8$ . El resultado es  $EMP = 88$ .

El Factor que se ha denominado integridad física de la presa (IF) se obtiene directamente mediante la correspondiente tabla de doble entrada, en la que se relacionan, por un lado, las inestabilidades observadas en la presa y, por otro, el grado de erosión o Estado Erosivo del dique. En ambas presas se ha considerado que el valor del Factor IF puede valer 80 (el máximo), dado el



extremo estado de erosión, con presencia de deslizamientos locales pequeños, asentamientos, grietas, etc.

El balance de humedad de los residuos mineros y de los materiales que conforman el dique (BH) se descompone en un sumatorio de subfactores:

$$\mathbf{BH = L_d + Fr + I_a + P_{24} + Q_E + D_E + R_v}$$

Los valores de los diferentes subfactores se obtienen de la correspondiente tabla del manual del IGME. En ambos casos se ha descrito la presencia de una laguna de decantación de agua intermitente cuya distancia al dique es inferior a la altura del mismo  $L_d = 27$ . Por otro lado, la posición del nivel freático en el dique no pudo ser evaluada (no se observaron evidencias) en el caso de San Cristóbal oeste, por lo que el correspondiente Factor  $Fr = 10$ . Por el contrario, en La Económica se detectó en el pie del dique, siendo por ello  $Fr = 4$ .

Las características climáticas se evalúan mediante el valor del Índice de De Martonne y la lluvia máxima en 24 horas para 100 años. En la zona donde se encuentra La Económica este Índice la es propio de zona sub-húmeda, con lo que el Factor vale 6.  $P_{24}$  es 83 mm, y el Factor vale 4. Para la presa San Cristóbal el Índice de De Martonne es 8,93 (zona árida), con lo que el Factor vale 2.  $P_{24}$  alcanza 123 mm, con lo que el Factor vale 6.

Por otro lado, se valoran otros factores hidrológicos con la correspondiente tabla del manual del IGME. El posible caudal punta de escorrentía que ingresa en la presa ( $Q_E$ ), considerando un periodo de retorno de 500 años. Para ambas presas se considera alto, a la vista de la cuenca vertiente a las mismas. El correspondiente Factor  $Q_E$  vale 8, en ambos casos.

La operatividad de los sistemas de drenaje interno e infraestructuras de evacuación, retención y desvío de las aguas de escorrentía ( $D_E$ ) lleva a que el correspondiente Factor valga 2 para La Económica y 15 para San Cristóbal



Oeste. La inexistencia de Cubierta vegetal ( $R_V$ ) en ambos casos hace que el correspondiente Factor valga 5.

Con todo, el valor del correspondiente balance de humedad (BH) es 46 en La Económica y 73 en San Cristóbal Oeste.

Además se considera un Factor Peligrosidad asociada al emplazamiento (PEM). Este se obtiene asignando el valor más alto obtenido entre los peligros considerados: sísmico (adaptado a España), movimientos del terreno (deslizamientos vertientes al vaso de la presa) o existencia de sobrecargas que puedan comprometer la estabilidad del depósito. Para la Económica sólo se considera el riesgo sísmico con valor de 8. Sin embargo, en San Cristóbal, además de una mayor sismicidad, se presenta una sobrecarga debida a otros estériles mineros vertidos sobre la presa, por lo que el valor asignado es el máximo valor posible: 20.

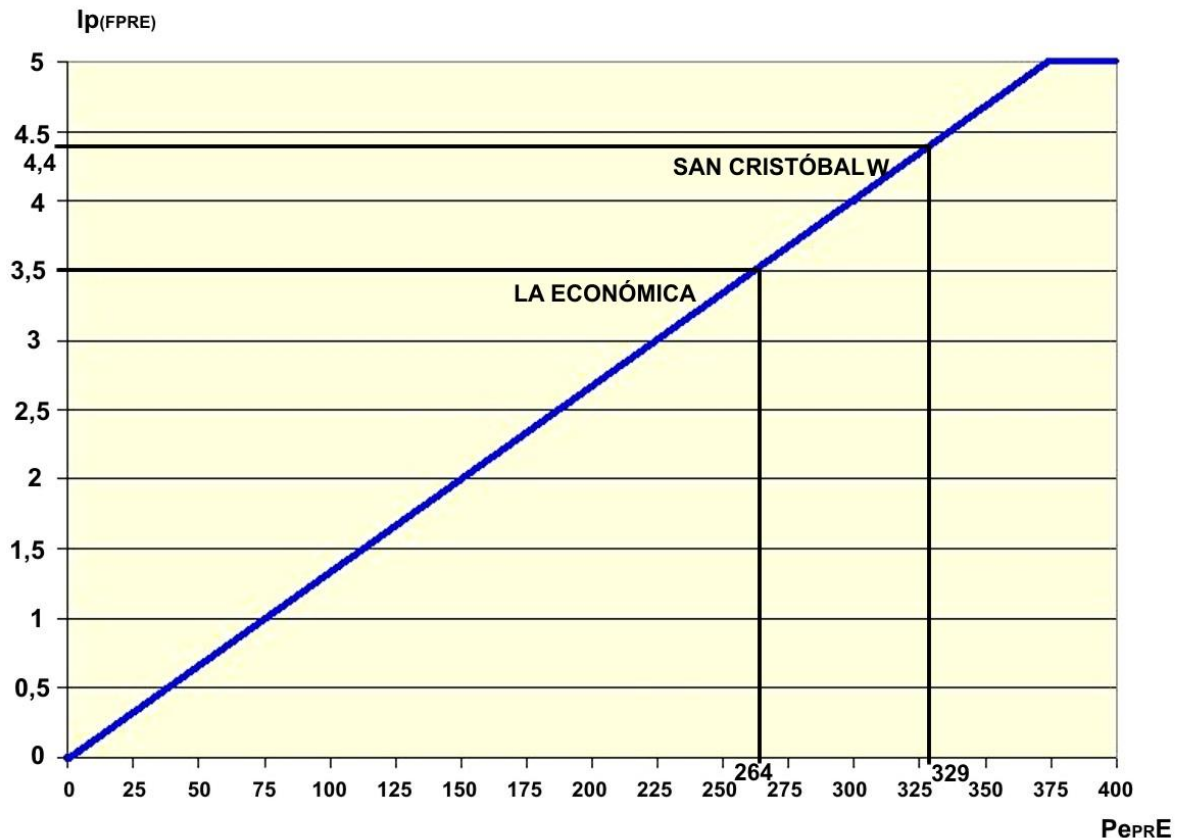
Si sumamos todos los factores que se han ido describiendo en los anteriores apartados, se obtiene el valor de la Peligrosidad ( $P_{PRE}$ ), entendida como susceptibilidad ante la posible rotura del talud y/o dique. La suma máxima teórica puede alcanzar el valor de 400 puntos. Para la presa de La Económica, resulta 264 que es alta. Para la presa San Cristóbal se obtiene 329 que es muy alta a la vista de los resultados de otras muchas presas españolas Tabla A5.

Puntuación $P_{PRE}$	
>300	Muy Alta
225-300	Alta
150-225	Media
75-150	Baja
<75	Muy baja

**Tabla A5.** Valores del Factor de Peligrosidad ante la rotura de  $P_{PRE}$ .



Para obtener un valor final del Índice de Probabilidad de Ocurrencia del fallo de la estructura ( $I_P$  (FPRE)) se emplea la gráfica siguiente (Figura A16). En el primer caso resulta 3,5. El segundo 4,4.



**Figura A16.** Índice de Probabilidad de Ocurrencia ( $I_P$  (FPRE)) en función de la Peligrosidad ( $P_{ePRE}$ ), para las presas seleccionadas.

Para el caso de la Severidad sobre la población, se analiza un Índice  $I_s$ (FPREPO) cuyos valores son asignados en función del valor del Factor población expuesta ( $P_{EX}$ ) en el peor de los escenarios, en la zona delimitada como de riesgo, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$I_s \text{ (FPREPO)} = P_{EX}$$

En el primer caso para la presa La Económica,  $I_s$  (FPREPO) es 0, porque no hay poblaciones a menos de 5000 m. para la presa San Cristóbal Oeste  $I_s$ (FPREPO) es 3, por la existencia de vías de intensidad moderada de tráfico como peor posible elemento expuesto de cara a daños sobre personas.



En cuando al medio natural,  $I_s$  (FPRENA) será función del ecosistema o elemento natural más vulnerable expuesto ( $V_E$ ).

$$I_s \text{ (FPRENA)} = V_E$$

En el caso de La Económica, resulta 3, que corresponde a la posible afección sobre matorrales y áreas de cultivo. Sin embargo, el caso de San Cristóbal Oeste se valora con 5, debido a la existencia de un Humedal RAMSAR y LIC a 1500 m de distancia.

Al contrario que ocurría con procesos de contaminación, los efectos posibles sobre el medio socioeconómico serán graves casi siempre en casos de rotura de presas. Por ello se valora un índice que depende del tipo de elementos expuestos:

$$I_s \text{ (FPRESE)} = V_{SE}$$

$V_{SE}$  viene a ser una “medida del valor” de los elementos expuestos, en función de su valor patrimonial y carácter prioritario desde el punto de vista social y económico. Lógicamente dichos criterios tienen un carácter generalista. En el caso de para la presa La Económica se valora como 2, y para la presa San Cristóbal Oeste se valora como 3, ambos de acuerdo con el tipo de infraestructuras y actividades expuestas.

#### **A.I.2.7 Matrices de riesgo de las presas seleccionadas**

Como resultado final, cuando se colocan sobre matrices de riesgo los correspondientes códigos de los escenarios evaluados, se obtienen dos matrices de riesgo que, a efectos comparativos, se muestran en la Figura A17. Puede verse que, siendo ambas presas merecedoras de estar en el inventario nacional español, ofrecen diferencias significativas en cuanto a los niveles de riesgo. Claramente, San Cristóbal Oeste es mucho más prioritaria desde el punto de vista de la necesidad de actuaciones.

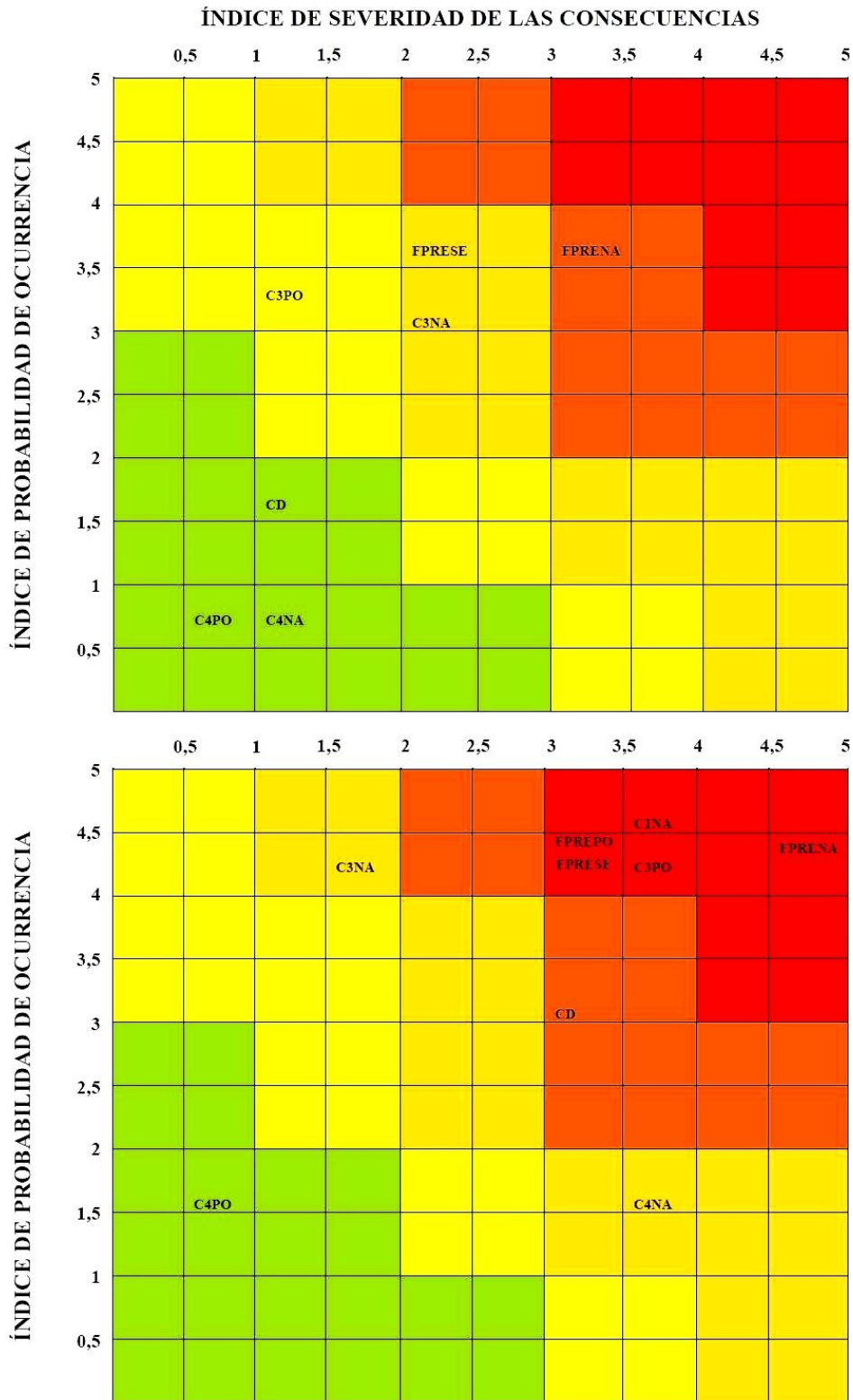


Figura A17. Imagen que permite comparar las matrices de riesgo de las presas seleccionadas.





## **ANEXO II. FICHAS DE EVALUACIÓN DE LAS PRESAS**

## EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INSTALACIONES DE RESIDUOS DE INDUSTRIAS EXTRACTIVAS CERRADAS O ABANDONADAS

<u>Datos de la instalación de residuos</u>			
Código identificador	Provincia (Comunidad autónoma)	Municipio	Coordenadas UTM
657-III-2-001	TOLEDO (CASTILLA LA MANCHA)	MAZARAMBROZ	X: 406810,04 Y: 4397525,51

<u>Índice de probabilidad de ocurrencia de escenarios de riesgo por contaminación (valores entre 0 y 5)</u>	
Generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales (C1)	I <sub>p</sub> (C1)= 0
Generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos (C2)	I <sub>p</sub> (C2)= 0
Movilización de material particulado por acción del viento (C3)	I <sub>p</sub> (C3)= 3,1
Emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica (C4)	I <sub>p</sub> (C4)= 0,8
Contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades (CD)	I <sub>p</sub> (CD)= 1,5

<u>Índice de probabilidad de ocurrencia de escenarios de riesgo por fallo en la estructura (valores entre 0 y 5)</u>	
Fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos (FPRE)	I <sub>p</sub> (FPRE)= 3,5

	EFECTOS SOBRE EL MEDIO NATURAL	EFECTOS SOBRE LAS PERSONAS Y LA POBLACIÓN	EFECTOS SOBRE EL MEDIO SOCIOECONÓMICO
--	--------------------------------	---	---------------------------------------

<u>Índice de severidad de las consecuencias de escenarios de riesgo por contaminación (valores entre 0 y 5; NP: no procede)</u>			
Generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales (C1)	I <sub>s</sub> (C1NA)= NP	I <sub>s</sub> (C1PO)= NP	I <sub>s</sub> (C1SE)= NP
Generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos (C2)	I <sub>s</sub> (C2NA)= NP	I <sub>s</sub> (C2PO)= NP	I <sub>s</sub> (C2SE)= NP
Movilización de material particulado por acción del viento (C3)	I <sub>s</sub> (C3NA)= 2,1	I <sub>s</sub> (C3PO)= 1	I <sub>s</sub> (C3SE)= NP
Emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica (C4)	I <sub>s</sub> (C4NA)= 1	I <sub>s</sub> (C4PO)= 0,5	I <sub>s</sub> (C4SE)= NP
Contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades (CD)	---	I <sub>s</sub> (CD)= 1	---

<u>Índice de severidad de las consecuencias de escenarios de riesgo por fallo en la estructura (valores entre 0 y 5; NP: no procede)</u>			
Fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos (FPRE)	I <sub>s</sub> (FPRENA)= 3	I <sub>s</sub> (FPREPO)= 0	I <sub>s</sub> (FPRESE)= 2

ÍNDICE DE SEVERIDAD DE LAS CONSECUENCIAS

		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
ÍNDICE DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	5										
	4,5										
	4										
	3,5				FPRESE		FPRENA				
	3		C3PO		C3NA						
	2,5										
	2										
	1,5		CD								
	1		C4PO	C4NA							
	0,5										

		SEVERIDAD DE LAS CONSECUENCIAS				
		MUY BAJA	BAJA	MEDIA	ALTA	MUY ALTA
PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	MUY ALTA	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO
	ALTA	BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO
	MEDIA	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	ALTO
	BAJA	MUY BAJO	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	MODERADO
	MUY BAJA	MUY BAJO	MUY BAJO	MUY BAJO	BAJO	MODERADO

CLAVE DE EVALUACIÓN DE RIESGOS

## EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INSTALACIONES DE RESIDUOS DE INDUSTRIAS EXTRACTIVAS CERRADAS O ABANDONADAS

<u>Datos de la instalación de residuos</u>			
Código identificador	Provincia (Comunidad autónoma)	Municipio	Coordenadas UTM (ETRS 89)
976-II-3-007	MURCIA (REGIÓN DE MURCIA)	MAZARRÓN	X: 647320,24 Y: 4162804,37

<u>Índice de probabilidad de ocurrencia de escenarios de riesgo por contaminación (valores entre 0 y 5)</u>	
Generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales (C1)	I <sub>P</sub> (C1)= 4,5
Generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos (C2)	I <sub>P</sub> (C2)= 0
Movilización de material particulado por acción del viento (C3)	I <sub>P</sub> (C3)= 4,3
Emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica (C4)	I <sub>P</sub> (C4)=1,6
Contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades (CD)	I <sub>P</sub> (CD)= 3

<u>Índice de probabilidad de ocurrencia de escenarios de riesgo por fallo en la estructura (valores entre 0 y 5)</u>	
Fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos (FPRE)	I <sub>P</sub> (FPRE)= 4,4

	EFECTOS SOBRE EL MEDIO NATURAL	EFECTOS SOBRE LAS PERSONAS Y LA POBLACIÓN	EFECTOS SOBRE EL MEDIO SOCIOECONÓMICO
<u>Índice de severidad de las consecuencias de escenarios de riesgo por contaminación (valores entre 0 y 5; NP: no procede)</u>			
Generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales (C1)	I <sub>S</sub> (C1NA)= 3,5	I <sub>S</sub> (C1PO)= 0	I <sub>S</sub> (C1SE)= 0
Generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos (C2)	I <sub>S</sub> (C2NA)= NP	I <sub>S</sub> (C2PO)= NP	I <sub>S</sub> (C2SE)= NP
Movilización de material particulado por acción del viento (C3)	I <sub>S</sub> (C3NA)= 1,7	I <sub>S</sub> (C3PO)= 3,6	I <sub>S</sub> (C3SE)= NP
Emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica (C4)	I <sub>S</sub> (C4NA)= 3,5	I <sub>S</sub> (C4PO)= 0,5	I <sub>S</sub> (C4SE)=NP
Contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades (CD)	---	I <sub>S</sub> (CD)= 3	---

<u>Índice de severidad de las consecuencias de escenarios de riesgo por fallo en la estructura (valores entre 0 y 5; NP: no procede)</u>			
Fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos (FPRE)	I <sub>S</sub> (FPRENA)= 5	I <sub>S</sub> (FPREPO)= 3	I <sub>S</sub> (FPRESE)= 3

ÍNDICE DE SEVERIDAD DE LAS CONSECUENCIAS

		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
ÍNDICE DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	5										
	4,5							CINA			
	4			C3NA			FPREPO FPRESE	C3PO		FPRENA	
	3,5										
	3						CD				
	2,5										
	2										
	1,5		C4PO						C4NA		
	1										
	0,5										

		SEVERIDAD DE LAS CONSECUENCIAS				
		MUY BAJA	BAJA	MEDIA	ALTA	MUY ALTA
PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	MUY ALTA	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO
	ALTA	BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO
	MEDIA	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	ALTO
	BAJA	MUY BAJO	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	MODERADO
	MUY BAJA	MUY BAJO	MUY BAJO	MUY BAJO	BAJO	MODERADO

CLAVE DE EVALUACIÓN DE RIESGOS

## EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INSTALACIONES DE RESIDUOS DE INDUSTRIAS EXTRACTIVAS CERRADAS O ABANDONADAS

<u>Datos de la instalación de residuos</u>			
Código identificador	Provincia	Municipio	Coordenadas UTM (ETRS89)
PERÚ-ANCASH	RECUAY	TICAPAMPA	X: 232163 Y: 8921351

<u>Índice de probabilidad de ocurrencia de escenarios de riesgo por contaminación (valores entre 0 y 5)</u>	
Generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales (C1)	I <sub>P</sub> (C1)= 3,4
Generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos (C2)	I <sub>P</sub> (C2)= 0
Movilización de material particulado por acción del viento (C3)	I <sub>P</sub> (C3)= 1,8
Emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica (C4)	I <sub>P</sub> (C4)=4,5
Contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades (CD)	I <sub>P</sub> (CD)= 3,8

<u>Índice de probabilidad de ocurrencia de escenarios de riesgo por fallo en la estructura (valores entre 0 y 5)</u>	
Fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos (FPRE)	I <sub>P</sub> (FPRE)= 4,2

	EFECTOS SOBRE EL MEDIO NATURAL	EFECTOS SOBRE LAS PERSONAS Y LA POBLACIÓN	EFECTOS SOBRE EL MEDIO SOCIOECONÓMICO
--	--------------------------------	---	---------------------------------------

<u>Índice de severidad de las consecuencias de escenarios de riesgo por contaminación (valores entre 0 y 5; NP: no procede)</u>			
Generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales (C1)	I <sub>S</sub> (C1NA)= 5	I <sub>S</sub> (C1PO)= 0	I <sub>S</sub> (C1SE)= NP
Generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos (C2)	I <sub>S</sub> (C2NA)= NP	I <sub>S</sub> (C2PO)= NP	I <sub>S</sub> (C2SE)= NP
Movilización de material particulado por acción del viento (C3)	I <sub>S</sub> (C3NA)= 5	I <sub>S</sub> (C3PO)= 4,7	I <sub>S</sub> (C3SE)= NP
Emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica (C4)	I <sub>S</sub> (C4NA)= 5	I <sub>S</sub> (C4PO)= 0	I <sub>S</sub> (C4SE)= NP
Contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades (CD)	---	I <sub>S</sub> (CD)= 1	---

<u>Índice de severidad de las consecuencias de escenarios de riesgo por fallo en la estructura (valores entre 0 y 5; NP: no procede)</u>			
Fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos (FPRE)	I <sub>S</sub> (FPRENA)= 5	I <sub>S</sub> (FPREPO)= 4,8	I <sub>S</sub> (FPRESE)= 4

**Matriz de Evaluación de Riesgos**

**ÍNDICE DE SEVERIDAD DE LAS CONSECUENCIAS**

		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
<b>ÍNDICE DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA</b>	5										C4NA
	4,5			CD					FPRESE		FPRENA FPREPO
	4										
	3,5										C1NA
	3										
	2,5										
	2										C3NA C3PO
	1,5										
	1										
	0,5										

		SEVERIDAD DE LAS CONSECUENCIAS				
		MUY BAJA	BAJA	MEDIA	ALTA	MUY ALTA
PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	MUY ALTA	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO	MUY ALTO
	ALTA	BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	MUY ALTO
	MEDIA	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	ALTO	ALTO
	BAJA	MUY BAJO	MUY BAJO	BAJO	MODERADO	MODERADO
	MUY BAJA	MUY BAJO	MUY BAJO	MUY BAJO	BAJO	MODERADO

**CLAVE DE EVALUACIÓN DE RIESGOS**