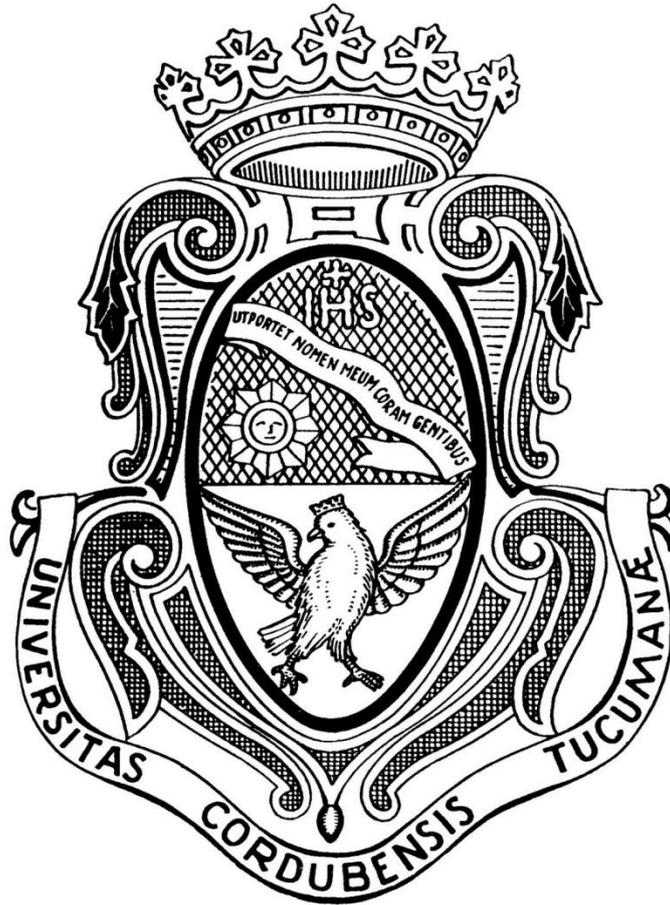


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y  
NATURALES**



*PRÁCTICA SUPERVISADA  
Ingeniería Ambiental*

***Estudio y propuestas de remediación para el predio de “El  
Chichón” de la Comisión Nacional de Energía Atómica en Alta  
Córdoba***

Viviana Farias

**Tutor:** Dr. Ing Franco M. Francisca

**Supervisor externo:** Dr. Ing. Daniel A. Glatstein

**Lugar:** Centro de Vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y  
Flujos Subterráneos, FCEFyN – UNC.

*Desde este lejano punto de vista, la Tierra puede no parecer muy interesante. Pero para nosotros es diferente. Considera de nuevo ese punto. Eso es aquí. Eso es nuestra casa. Eso somos nosotros. Todas las personas que has amado, conocido, de las que alguna vez oíste hablar, todos los seres humanos que han existido, han vivido en él. La suma de todas nuestras alegrías y sufrimientos, miles de ideologías, doctrinas económicas y religiones seguras de sí mismas, cada cazador y recolector, cada héroe y cobarde, cada creador y destructor de civilizaciones, cada rey y campesino, cada joven pareja enamorada, cada madre y padre, cada niño esperanzado, cada inventor y explorador, cada profesor de moral, cada político corrupto, cada “superestrella”, cada “líder supremo”, cada santo y pecador en la historia de nuestra especie ha vivido ahí —en una mota de polvo suspendida en un rayo de sol.*

*La Tierra es un escenario muy pequeño en la vasta arena cósmica. Piensa en los ríos de sangre vertida por todos esos generales y emperadores, para que, en gloria y triunfo, pudieran convertirse en amos momentáneos de una fracción de un punto. Piensa en las interminables crueldades cometidas por los habitantes de una esquina de este píxel sobre los apenas distinguibles habitantes de alguna otra esquina. Cuán frecuentes sus malentendidos, cuán ávidos están de matarse los unos a los otros, cómo de fervientes son sus odios. Nuestras posturas, nuestra importancia imaginaria, la ilusión de que ocupamos una posición privilegiada en el Universo... Todo eso es desafiado por este punto de luz pálido. Nuestro planeta es un solitario grano en la gran y envolvente penumbra cósmica. En nuestra oscuridad —en toda esta vastedad—, no hay ni un indicio de que vaya a llegar ayuda desde algún otro lugar para salvarnos de nosotros mismos.*

*La Tierra es el único mundo conocido hasta ahora que alberga vida. No hay ningún otro lugar, al menos en el futuro próximo, al cual nuestra especie pudiera migrar. Visitar, sí. Colonizar, aún no. Nos guste o no, por el momento la Tierra es donde tenemos que quedarnos. Se ha dicho que la astronomía es una experiencia de humildad, y formadora del carácter. Tal vez no hay mejor demostración de la locura de la soberbia humana que esta distante imagen de nuestro minúsculo mundo. Para mí, subraya nuestra responsabilidad de tratarnos los unos a los otros más amable y compasivamente, y de preservar y querer ese punto azul pálido, el único hogar que siempre hemos conocido.*

Un punto azul pálido - Carl Sagan (1994)

Sobre la icónica imagen de nuestra Tierra tomada por la nave espacial Voyager-1, el 14 de febrero de 1990

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia por su apoyo incondicional y confianza: Mis padres, Lucrecia y Daniel; y mi hermana, Mariana. Sin su sostén esta meta no hubiera sido posible, este logro es gracias a ellos en primer lugar.

A todos mis amigos y compañeros que hice en este camino, por su solidaridad y compañerismo; por multiplicar el aprendizaje con los trabajos y estudios en equipo; por los hermosos momentos compartidos, fuera y dentro de la facultad. Sobre todo a quienes me dieron su apoyo constante hasta el final, para la realización de este Informe: Julián, Maximiliano, Emiliano, Pamela, Luis, Agustina, Mariana, Franco, Noelia, Verónica, Juan, Patricia.

A mis amigos de la infancia, que a pesar del tiempo o distancia, siempre siguieron presentes en cada etapa de la vida: Xiomara, Tamara, Florencia, Silvana, Andrés, Cristian.

A todos los docentes que me educaron en este camino, sobre todo a mi tutor, Dr. Ing. Franco Francisca: por su seguimiento, paciencia y dedicación; por compartir sus conocimientos y sobre todo sus valores para la buena práctica de la ingeniería ambiental y su importancia; y por darme un espacio para dar mis primeros pasos en el ejercicio de la actividad profesional.

## **RESUMEN:**

Las actividades de Explotación de Uranio en el territorio nacional comenzaron en el año 1951, y se extendieron hasta la década de los 1990, período durante el cual se desarrollaron grandes exploraciones a escala local como regional, acompañadas de un sostenido crecimiento en materia de tecnología nuclear.

Desde la extracción del material en las minas hasta su procesamiento en plantas fabriles, el mineral pasa por diferentes estadios que generan pasivos ambientales (residuos), los cuales constituyen fuentes potenciales de repercusión química y radiológica.

A medida que se realizaban estas actividades, hubo un aspecto clave que fue ignorado o quizás hasta ese momento no se disponían de los medios necesarios para trabajarlo, y que representa el objetivo de esta Práctica Supervisada: el Tratamiento de los residuos originados por la conversión del Uranio en dióxido de uranio

Los sitios afectados por la minería y luego la molienda del Uranio han generado las denominadas “colas de mineral” o relaves. Estos sitios no han recibido un tratamiento adecuado para evitar su dispersión.

En este informe se desarrolla qué tratamientos posteriores al cierre podrían realizarse para estos residuos, acorde a la bibliografía disponible y recopilación de antecedentes ya que existentes de otras experiencias a nivel internacional que han logrado una correcta mitigación de los efectos que ocasionan dichos desechos.

Es primordial atender este problema, a fin de minimizar los riesgos para la salud de la población y el ambiente. Dado los largos períodos de vida de los radionucleidos que contienen los residuos, y las características físicas y químicas de los mismos, se propone una Obra de Ingeniería que garantice sequedad, estanqueidad y resistencia estructural a largo plazo, resistiendo a factores externos y climáticos.

**PALABRAS CLAVE:** Remediación, Encapsulado, Radiación, Uranio, Radón

# ÍNDICE

CAPÍTULO 1: MARCO DEL DESARROLLO DE LA PRÁCTICA PROFESIONAL SUPERVISADA .....	11
1.1.  ÁMBITO DE DESARROLLO DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA .....	11
1.2.  OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA .....	11
1.3.  ACTIVIDADES DESARROLLADAS DURANTE LA PRÁCTICA SUPERVISADA .....	12
1.4.  APLICACIÓN DE CONOCIMIENTOS ADQUIRIDOS EN ASIGNATURAS DE LA CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL .....	12
1.5.  ORGANIZACIÓN DEL INFORME.....	13
CAPÍTULO 2: CASO PRÁCTICO Predio “El Chichón” de Dixitek del predio Alta Córdoba de la CNEA .....	14
2.1. CARACTERÍSTICAS DEL EMPLAZAMIENTO .....	14
2.1.1. Ubicación .....	14
2.1.2 Geografía y geomorfología .....	15
2.1.3. Características geológicas.....	16
2.1.4. Colapsabilidad.....	18
2.1.5. Condiciones climáticas .....	18
2.1.6 Topografía y Drenaje .....	19
2.1.7Riesgo sísmico.....	20
2.2. ACTIVIDAD EN EL SITIO CÓRDOBA .....	20
2.2.1. Proceso industrial.....	21
2.2.1. Muestreo e Impacto de la actividad (PRAMU Proyecto de Restitucion Ambiental de la Minería del Uranio).....	24
2.2.2. Muestreos realizados por el laboratorio de geotecnia .....	28
2.2.3. Alternativas de gestión .....	28
2.2.4. Composición química de los relaves .....	29
2.3. CASOS DE REFERENCIA.....	29
CAPÍTULO 3: CONTAMINACIÓN RADIACTIVA .....	31
3.1. DEFINICIÓN DE CONTAMINACIÓN .....	31
3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA TORTA AMARILLA O “YELLOWCAKE” .....	31
3.3. PROCESO .....	32
3.4. IMPACTOS RADIOLOGICOS .....	33
3.4.1. IMPACTO NO RADIOLOGICO .....	34
3.5. GEOQUIMICA DEL URANIO.....	34
3.6. FLUJO DE MATERIALES Y DESECHOS .....	42

3.7. RADIACIÓN.....	35
3.8. DESCOMPOSICIÓN RADIATIVA.....	36
3.9. EMISIONES RADIATIVAS.....	38
3.10. URANIO: USOS Y EFECTOS SOBRE LA SALUD.....	39
3.10.1. Usos del Uranio.....	40
3.10.2. Efectos del Uranio.....	41
3.11. RELAVES Y RADÓN.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.11.1. Radon 222.....	44
3.12. RADÓN Y EFECTOS SOBRE LA SALUD.....	44
3.10. VÍAS Y RUTAS DE EXPOSICIÓN.....	48
3.10.1 Rutas de exposición.....	49
3.10.2. Vías de ingreso.....	50
3.11. IMPACTOS EN RECURSOS HÍDRICOS.....	51
3.12. IMPACTOS SOBRE LA BIODIVERSIDAD.....	52
3.12.1. Toxicidad del Uranio.....	52
3.13. IMPACTOS EN LA CALIDAD DEL AIRE.....	53
3.14. CLASIFICACIÓN DE DESECHOS RADIATIVOS.....	55
CAPÍTULO 4: REMEDIACIÓN IN SITU DE SUELOS CONTAMINADOS CON RESIDUOS RADIATIVOS.....	57
4.1. INTRODUCCIÓN.....	57
4.2. TECNOLOGÍAS DE CONTENCIÓN.....	57
4.2.1 Cubierta (Capping).....	58
4.2.2. Barreras verticales.....	59
4.2.3. Encapsulado.....	60
4.2.4. Comparación entre alternativas.....	61
4.3. SOLIDIFICACIÓN Y ESTABILIZACIÓN.....	61
4.3.1. Cementación.....	62
4.3.2. Solidificación y estabilización química.....	63
4.4. VITRIFICACIÓN.....	63
4.4.1. Comparación entre alternativas.....	65
4.6. METODOLOGÍA ADOPTADA. ALTERNATIVA 1. ENCAPSULAMIENTO. ....	76
4.6.1. Barreras.....	77
4.6.2. Cubiertas.....	79
4.6.3. Requisitos mínimos según DR 831/93.....	82

4.6.4. Requisitos mínimos según Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) – EPA Subtítulo C.....	84
4.6.5. Configuraciones de un relleno de seguridad.....	85
4.6.6. Resumen de partes de un relleno de seguridad y sus funciones.....	87
4.6.7. Parámetros de diseño.....	89
4.6.8. Ventajas y limitaciones.....	91
4.6.9 Verificaciones.....	91
CAPÍTULO 5: PROPUESTA DE REMEDIACIÓN.....	92
5.1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	92
5.2. TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL A ADOPTAR:.....	93
5.3. CONFIGURACIÓN DE LA CUBIERTA.....	95
5.4. CONFIGURACIÓN DE LA BARRERA DE FONDO.....	97
5.5. ASPECTOS OPERATIVOS Y RECOMENDACIONES.....	102
5.5.1. Estrategia operacional recomendada para ejecutar el proyecto.....	102
5.5.2. Instalaciones Accesorias.....	104
5.6. VERIFICACIÓN DE ESTABILIDAD PARA TALUDES 2:1 PARA SUELOS CON $\Phi > 0$ .....	105
5.7. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROYECTO.....	108
5.8. CÓMPUTO MÉTRICO.....	111
5.9. PRESUPUESTO DE AMBAS ALTERNATIVAS.....	112
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES.....	113
BIBLIOGRAFÍA.....	117
ANEXOS.....	119

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación en Google Earth de “El Chichón” .....	15
Figura 2: Caracterización geológica (Recuperado de <a href="https://sigam.segemar.gov.ar">https://sigam.segemar.gov.ar</a> ) ..	17
Figura 3: Colapsabilidad de la zona de estudio (Informe Final del estudio geotécnico en el predio Alta Córdoba , 2009).....	18
Figura 4: Variación de temperatura y precipitaciones en Córdoba (Servicio Metereológico Nacional).....	19
Figura 5: Rosa de los vientos en Córdoba (Recuperado de <a href="https://www.meteoblue.com/es/tiempo/archive/windrose/c%C3%B3rdoba_argentina_3860259">https://www.meteoblue.com/es/tiempo/archive/windrose/c%C3%B3rdoba_argentina_3860259</a> ) .....	19
Figura 6: Curvas de nivel equidistancia 1 m (Informe Final del estudio geotécnico en el predio Alta Córdoba , 2009).....	20
Figura 7: El ciclo del combustible en Córdoba (Secretaría de Energía de la Nación) ...	24
Figura 10: Sondeos realizados (Informe final, 2009).....	28
Figura 11: Proceso de Molienda de Uranio (Adapatado de Energy Information Administration) .....	33
Figura 12: Exposición de la población a la radiación (Recuperado de <a href="https://www.researchgate.net/profile/Jose_Solis5/publication/316441925/figure/fig1/AS:486793725386752@1493072076947/Diagrama-de-porcentaje-de-radiacion-natural-y-artificial-que-esta-expuesta-la-poblacion.png">https://www.researchgate.net/profile/Jose_Solis5/publication/316441925/figure/fig1/AS:486793725386752@1493072076947/Diagrama-de-porcentaje-de-radiacion-natural-y-artificial-que-esta-expuesta-la-poblacion.png</a> ) .....	36
Figura 13: Radiación alfa, beta y gama (Recuperado de <a href="https://energianuclearccb-abi.weebly.com/radiacion.html">https://energianuclearccb-abi.weebly.com/radiacion.html</a> ) .....	39
Figura 14: : Isótopos del Uranio( Recuperado de <a href="https://radiactividadfls.blogspot.com/2017/10/isotopos-radiactivos.html">https://radiactividadfls.blogspot.com/2017/10/isotopos-radiactivos.html</a> ).....	40
Figura 15: Cadena de decaimiento radiactivo del Uranio (Recuperado de <a href="https://pubs.usgs.gov/of/2004/1050/uranium.htm">https://pubs.usgs.gov/of/2004/1050/uranium.htm</a> ) .....	42
Figura 16: Ingreso del radón al hogar (Recuperado de <a href="https://www.lacomarcadepuertollano.com/diario/2010_03_08/miniaturas/640X/2010_03_08_No_10-Gasrad%C3%B3n.jpg">https://www.lacomarcadepuertollano.com/diario/2010_03_08/miniaturas/640X/2010_03_08_No_10-Gasrad%C3%B3n.jpg</a> ).....	46
Figura 17: Vías de ingreso y rutas de exposición (Uranium Mining Remedial Action Project Environmental Report, 1995) .....	48
Figura 18: Vías de exposición potencial que se originan en pilas de relaves de uranio. (Eldon D. Enger, 1995) .....	49
Figura 19: Análisis de tamaño de partícula para (a) relaves típicos de extracción mineral de varios minerales (Geoffrey Blight, 2009) .....	54
Figura 20: Procesos que conducen a la liberación de radón a la atmósfera.( <a href="https://www.researchgate.net/publication/272311951_Measurement_and_Calculation_of_Radon_Releases_from_NORM_Residues_IAEA_Technical_Reports_Series_No_474">https://www.researchgate.net/publication/272311951_Measurement_and_Calculation_of_Radon_Releases_from_NORM_Residues_IAEA_Technical_Reports_Series_No_474</a> ) .....	55
Figura 21: Sistema de clasificación de desechos (OIEA, 2009) .....	56
Figura 22: Cubierta (USEPA, 2009) .....	59
Figura 23: Barrera vertical (USEPA, 2009) .....	60
Figura 24: Encapsulado Ex Situ (USEPA, 2009) .....	61
Figura 25: Solidificación y estabilización (USEPA, 2009).....	62
Figura 26: Solidificación/estabilización in situ de suelo contaminado (USEPA, 2009) .	63
Figura 27: Vitricación in situ de suelo contaminado (USEPA, 2009) .....	65

Figura 28: Sistemas de revestimiento (Vesilind et al., 2002) .....	78
Figura 29: Sección transversal cubierta superior (Recuperado de <a href="https://www.researchgate.net/publication/307436757_Landfill_Design_and_Operation">https://www.researchgate.net/publication/307436757_Landfill_Design_and_Operation</a> ) .....	81
Figura 30 : Sistemas de barrera inferior Barrera doble (Hauser, 2009). .....	83
Figura 31: Rellenos de doble revestimiento compuesto con recolección de lixiviados siguiendo el requisito de RCRA Subtítulo C para rellenos sanitarios (Recuperado de <a href="http://www.cleanindiajournal.com">www.cleanindiajournal.com</a> ) .....	85
Figura 32: Distintas configuraciones de rellenos sanitarios (Recuperado de <a href="https://www.researchgate.net/publication/307436757_Landfill_Design_and_Operation">https://www.researchgate.net/publication/307436757_Landfill_Design_and_Operation</a> ) .....	87
Figura 33: Relleno de seguridad (Recuperado de <a href="https://www.freep.com/story/news/local/michigan/2014/09/07/landfill-taking-radioactive-waste-has-history-of-violations-leaks-fires/15210857/">https://www.freep.com/story/news/local/michigan/2014/09/07/landfill-taking-radioactive-waste-has-history-of-violations-leaks-fires/15210857/</a> ) .....	89
Figura 34: Área a ocupar por el encapsulado (Elaboración propia).....	94
Figura 35: Corte A-A de Alternativa 2 y 1 (Elaboración propia).....	95
Figura 36: Corte B-B (Elaboración propia) .....	95
Figura 37: Croquis del diseño (elaboración propia) .....	96
Figura 38: Detalle del sistema de cubierta (elaboración propia).....	97
Figura 39: Configuración del revestimiento inferior de la Alternativa 1 (elaboración propia) .....	100
Figura 40: Configuración del revestimiento inferior de la Alternativa 1 (elaboración propia) .....	101
Figura 41: Detalle de anclaje en zanja (Recuperado de <a href="https://www.igc.com.pe/conoce-metodos-de-anclaje-para-geomembranas-hdpe/">https://www.igc.com.pe/conoce-metodos-de-anclaje-para-geomembranas-hdpe/</a> ).....	102
Figura 42: Etapas de la excavación (elaboración propia) .....	103
Figura 43: Detalle de bordo (elaboración propia).....	104
Figura 44: Detalle en planta del predio (Elaboración propia) .....	110

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Concentración de elementos potencialmente peligrosos. Valores promedios y rango de variación de concentraciones, basados en 14 muestras (PRAMU, 2005) .....	26
Tabla 2: Composición química de suelos (PRAMU, 2005).....	26
Tabla 3: Composición química de agua subterránea (PRAMU, 2005) .....	27
Tabla 4: Riesgos del radón para fumadores y no fumadores (Adaptado de <a href="https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon">https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon</a> ) .....	47
Tabla 5: Resultados Obtenidos de Ensayo de Compresión Triaxial en condiciones drenadas sobre muestras inalteradas ensayadas en condición de saturación (Informe final, 2009).....	106
Tabla 6: Presupuesto de Alternativa 1 y 2.....	112

# **CAPÍTULO 1: MARCO DEL DESARROLLO DE LA PRÁCTICA PROFESIONAL SUPERVISADA**

## **1.1. ÁMBITO DE DESARROLLO DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA**

La Práctica Profesional Supervisada (PS) se ha realizado en el Centro de Vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y Flujos Subterráneos de manera de aplicar los conocimientos teóricos adquiridos a lo largo de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC).

El anteproyecto en el que se basa este informe, corresponde a la remediación del Sitio Córdoba de la Comisión Nacional de Energía Atómica, el cual está ubicado en el barrio Alta Córdoba.

Se hace un estudio de las posibles alternativas de remediación según consideraciones ambientales y económicas.

## **1.2. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA**

Para la PS se han planteado los siguientes objetivos generales propios de esta asignatura.

- Contacto del estudiante con profesionales afines a la ingeniería.
- Aplicación, profundización e integración de los conceptos adquiridos durante el cursado de la carrera de Ingeniería Ambiental
- Experiencia práctica para su inserción en el ejercicio de la profesión
- Aplicación de métodos y códigos propios de la organización laboral.
- Contacto y experiencias con la aplicación y/o utilización de nuevas tecnologías.
- Orientación del alumno respecto a su futuro ejercicio profesional.
- Vinculación Universidad-Medio.
- Redacción de informes Técnicos.

Por su parte como objetivos particulares se espera que el alumno, al finaliza la PS, pueda:

- Proponer soluciones ambientales técnica y económicamente factibles
- Determinar técnicas de remediación apropiadas para cada lugar
- Comprensión de las principales propiedades físico-químicas del suelo y contaminante.

- Aplicación de los conocimientos adquiridos en la carrera para tener conocimiento de las distintas interacciones de los contaminantes con las componentes del suelo
- Diseño de un relleno de seguridad

### **1.3. ACTIVIDADES DESARROLLADAS DURANTE LA PRÁCTICA SUPERVISADA**

En particular, la participación del estudiante se centrará sobre los siguientes aspectos:

- 1) Búsqueda y análisis bibliográfico de los temas a abordar: Tratamiento de residuos peligrosos, contaminación minera y en el proceso industrial, residuos de cola o relaves, tecnologías de remediación de suelos, fundamentos de ingeniería geoambiental. Búsqueda de recomendaciones de distintos organismos.
- 2) Búsqueda de antecedentes de remediación de la explotación y procesamiento de uranio y análisis de la problemática ambiental y contexto del caso de estudio.
- 3) Análisis técnico, económico, ambiental y comparación de las diferentes alternativas de remediación
- 4) Propuesta de dos alternativas para el caso de estudio.
- 5) Diseño y confección de planos
- 6) Realizar verificaciones del diseño
- 7) Se realiza el cómputo y presupuesto de las propuestas.
- 8) Se compara ambas alternativas técnica, ambiental y económicamente, estableciendo sus ventajas y desventajas
- 9) Conclusión
- 10) Escritura del informe

### **1.4. APLICACIÓN DE CONOCIMIENTOS ADQUIRIDOS EN ASIGNATURAS DE LA CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL**

Para el desarrollo de esta Práctica Supervisada se requirió de los contenidos aprendidos en diversas materias durante la carrera de Ingeniería Ambiental, principalmente:

- Geotecnia I y II: Para el conocimiento de las propiedades del suelo y los conceptos de la Mecánica de Suelos y comprendan el comportamiento de este material, pudiendo cuantificar sus características y propiedades para interpretar adecuadamente los problemas que se analizan y los resultados que se obtengan, como el estudio de suelos realizado en el sitio.

- Ingeniería ambiental I: Se aplican conceptos de gestión del ambiente, introducción en el Tratamientos de Residuos Sólidos y de los Peligrosos.

- Ingeniería Ambiental II: Entender los problemas vinculados a la contaminación por radiación.

- Ingeniería ambiental III: sistemas de contención in situ y aislación; tecnologías de remediación de suelos; riesgo ambiental y contaminación minera; barreras naturales y geotextiles; sistemas de cobertura; tratamiento y disposición de residuos tóxicos y peligrosos; depósitos de seguridad: características constructivas y de proyecto

### **1.5. ORGANIZACIÓN DEL INFORME**

En el presente capítulo se detallan las actividades realizadas, los objetivos establecidos y aplicación de los conocimientos adquiridos durante el cursado de la carrera de Ingeniería Ambiental.

En el segundo capítulo se evalúan los aspectos más relevantes del caso de estudio y antecedentes en la remediación de este tipo de residuos.

En el capítulo tres, se describe la contaminación que genera esta actividad, los impactos de la misma para profundizar en los desechos radiactivos de baja actividad particularmente.

En el capítulo cuatro, se explican las tecnologías existentes para remediar el residuo proveniente del procesamiento de uranio, con las consideraciones debidas; y una comparación según varios aspectos entre ellas, para elegir la más idónea para la resolución del caso de estudio.

En el capítulo cinco, se aplican los conceptos teóricos a la propuesta de remediación para el caso de "El Chichón". Se realiza un cómputo y presupuesto del anteproyecto.

## **CAPÍTULO 2: CASO PRÁCTICO Predio “El Chichón” de Dioxitek del predio Alta Córdoba de la CNEA**

### **2.1. CARACTERÍSTICAS DEL EMPLAZAMIENTO**

El Sitio Córdoba se ubica en un área con una densidad poblacional comprendida entre 76 y 100 habitantes por manzana. Las normativas municipales indican un uso urbano, para las tierras en que se ubica el predio del Sitio Córdoba. En los barrios que rodean al Sitio Córdoba se asienta una población de clase media. Las viviendas son de mampostería y son escasos los edificios de propiedad horizontal. Se trata en su mayoría de trabajadores asalariados, pequeños empresarios, profesionales independientes y en un sector bien definido un asentamiento de habitantes en precaria forma.

Cuenta con los servicios esenciales como electricidad, gas natural, cloacas, calles pavimentadas y agua potable de red. Funcionan establecimientos escolares y asistenciales tienen una distribución media. Es baja la densidad de asentamientos industriales en los alrededores.

#### **2.1.1. Ubicación**

El sitio se ubica en barrio Alta Córdoba, Rodríguez Peña al 3.200, de la Capital. Está ubicado en el norte de la zona conocida como *pericéntrica*, aproximadamente medio kilómetro al norte del Río Suquía. Es el segundo barrio más poblado de la ciudad, con más de 35 000 habitantes, detrás de Nueva Córdoba, y es el tercero en superficie, luego de Los Boulevares y Argüello.

Allí está el “chichón”, un predio donde se depositan provenientes del procesamiento del uranio, en el cual están declaradas más de 57.600 toneladas de colas de uranio mineral. Son de baja radioactividad. En la Municipalidad señalan que es el pasivo ambiental más grande que tiene la ciudad de Córdoba. Este predio, pertenece a la CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica).



**Figura 1: Ubicación en Google Earth de “El Chichón”**

### **2.1.2 Geografía y geomorfología (Informe Final del estudio geotécnico en el predio Alta Córdoba (“El Chichón”) de la CNEA – Laboratorio de Geotecnia – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba)**

El sitio se encuentra ubicado sobre el pedimento oriental de la sierra Chica de Córdoba, una plataforma de sedimentos eólicos labrada por el río Suquía.

Los suelos del estrato superficial están compuestos principalmente por limos de origen loésico (Barbeito y Quintana, 2004). Conforman un grueso manto de depósitos finos de origen eólico generados en la sucesión de períodos secos y húmedos del Pleistoceno. Presentan modelación posterior y re-movilización eólica e hídrica de materiales en un ambiente de baja energía. Son depósitos sucesivos de mantos modelados superficialmente por el viento y coronados por niveles de paleosuelo correspondientes a los ciclos más húmedos. Se presenta desarrollado en todo el ámbito de la ciudad y se encuentra labrado por la franja de paso antigua y actual del Suquía y sus afluentes menores locales. Presenta frecuentes niveles someros de sedimentos fluviales de granulometrías variadas intercalados, que representan los ámbitos de llegada de las antiguas crecientes del río y de sus canales marginales y afluentes, ocurridas según las pulsaciones climáticas en las diferentes etapas de labrado de la planicie marginal.

#### **Zona geomorfológica IV**

Corresponde a la Planicie Loésica que se extiende a ambos márgenes del Río

Suquía. Representa la mayor superficie del área de estudio. Se han definido en ella también dos Perfiles Tipo:

Perfil Tipo A: Compuesto por sedimentos depositados eólicamente (loess pampeano) no afectado por acciones hídricas de tipo deposicional, correspondiendo a las partes convexas del relieve de lomadas suaves. Está formado por el complejo litológico 2A (CL 2A): capas de loess, limos loéssicos, limos arenosos y arcillosos, con capas cementadas por carbonatos de calcio, y el complejo litológico 2B (CL 2B): capas de limos loéssicos, limos arenosos y arcillosos, arenas finas, etc., de origen eólico, transformados por la acción de agentes atmosféricos, aguas de lluvia, etc.

Perfil Tipo B: Corresponde a los sedimentos depositados en las partes cóncavas del relieve actual y paleo relieves, donde existen o han existido acciones hídricas de tipo deposicional o acumulativo. Formado por los CL 2A y CL 2B sobre arenas y gravas con rodados depositados por arroyos y torrentes temporarios actuales o pretéritos.

**2.1.3. Características geológicas (Informe Final del estudio geotécnico en el predio Alta Córdoba ("El Chichón") de la CNEA – Laboratorio de Geotecnia – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba).**

La geomorfología del área urbana corresponde a una planicie suavemente ondulada, cruzada por el Río Suquía, de bajo caudal y regulado por el lago artificial San Roque.

Sobre la margen norte de este río y en la planicie elevada se ubica el Sitio Córdoba, asentado sobre relleno sedimentario con un tamaño de grano fino que presenta en su composición arcillas, lo que dificulta la absorción rápida de las aguas de lluvia y así se producen en las épocas estivales inundaciones en forma de mantos que entran al área pavimentada urbana en dirección al río. Las áreas urbanas con riesgo de inundación, corresponden a los sectores cercanos al río y ocupan los niveles bajos donde el río escurre en forma de meandros sinuosos.

Los datos de escurrimiento de aguas subterráneas muestran la existencia de varios acuíferos y el más cercano a la superficie es generalmente portador de aguas no potables. La pendiente de la superficie freática local, responde a la topografía general del área donde se ubica el Sitio Córdoba. Su dirección es SSE y se dirige hacia la dirección del escurrimiento superficial mas importante de la ciudad, formado por el Río Suquía. Las fuertes pendientes de la geomorfología del área hacen que el nivel superior de este acuífero superficial oscila entre los 3 m y algo más de 50 m de profundidad.

Los estudios geomorfológicos, muestran que la ciudad está asentada sobre la parte media de depósitos de pie de monte, en la vertiente oriental de las Sierras de Córdoba.

Esta planicie es parte de un abanico de sedimentos de origen fluvial, y sobre ambas márgenes del río aparecen depósitos aterrizados compuestos de materiales de granulometría gruesa (arenas y gravas). A medida que nos alejamos de los márgenes entramos en las áreas planas, topográficamente más elevadas (alrededor de los 430 m.s.n.m.) compuestas de material de granulometría más fina (limos y arcillas) y de origen volcánico.

Este material fino, aparece en las perforaciones sobrepuesto al material grueso depositado en el abanico fluvial y con un espesor que no supera los 15-20m, aunque a

veces se intercala material grueso. Son frecuentes las Intercalaciones de material sedimentario cementado con carbonatos (tosca), que son impermeables. El espesor sedimentario alcanza en la ciudad valores entre 200 y 600 m por encima de una base de rocas duras, cristalinas.

Estas características geológicas, unidas al bajo carácter sísmico de la región permiten zonificar, con orientación ingenieril, a la ciudad<sup>3</sup>. Así el Sitio Córdoba se ubica en suelos tipo II según la norma INPRES-CIRSOC 103

- Qa - Holoceno - Depósitos de loess removilizado pedemontano. Limos, Arenas y gravas. Derrames pampea
- Qa - Holoceno - Depósitos pedemontanos
- Qa - Holoceno - Depósitos pedemontanos, gravas y arenas
- Qe - Holoceno - Depósitos arenosos eólicos
- Qe - Holoceno - Depósitos eólicos
- Qev - Holoceno - Depósitos evaporíticos
- Qev - Holoceno - Depósitos evaporíticos, lacustres y de playa
- Qev - Holoceno - Depósitos evaporíticos. Sedimentos de playa de salinas
- Qev - Holoceno - Depósitos lacustres, de bajos y evaporíticos
- Qev - Holoceno - Depósitos salinos. Limos
- Qf - Holoceno - Depósitos aluviales y coluviales
- Qfl - Holoceno - Depósitos aluviales y coluviales
- Qfl - Pleistoceno - Depósitos de limos y arenas fluviales

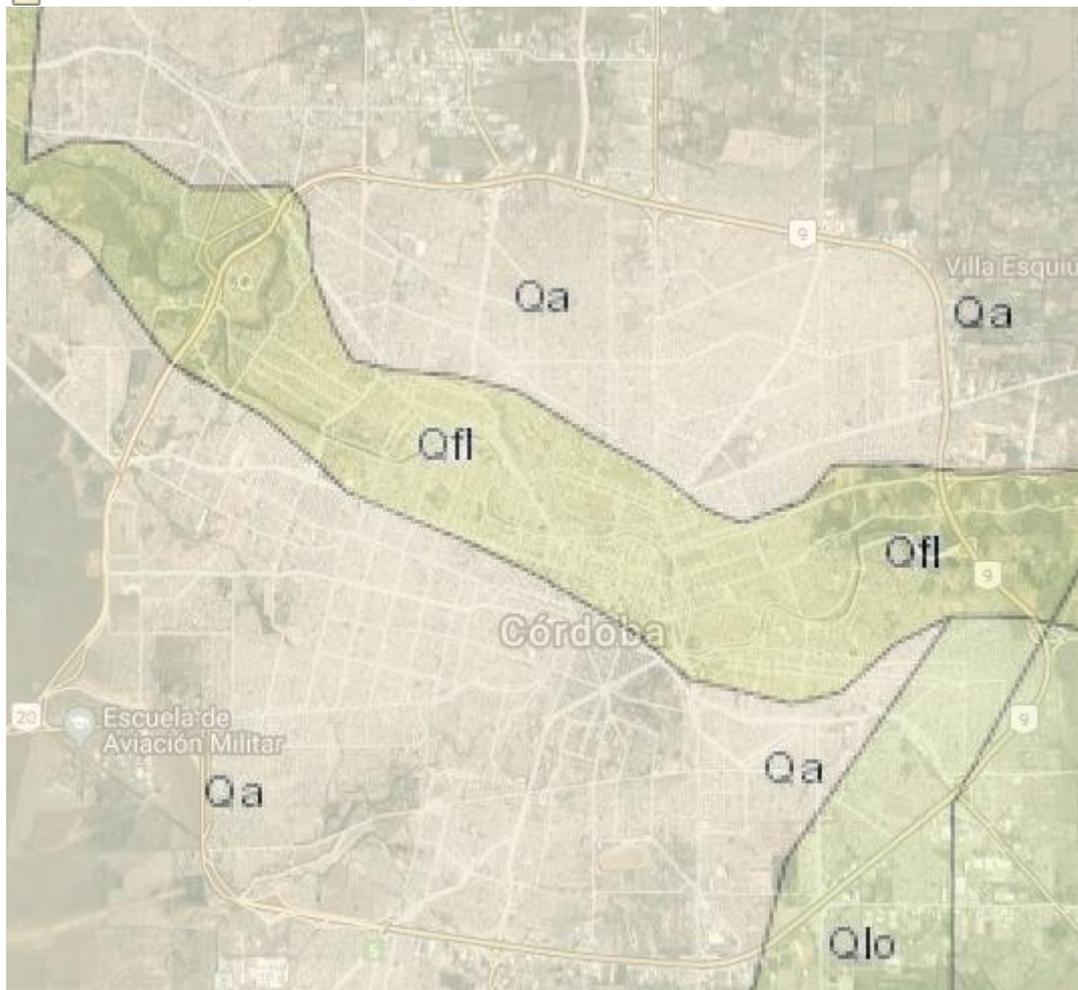


Figura 2: Caracterización geológica (Recuperado de <https://sigam.segemar.gov.ar>)

#### 2.1.4. Colapsabilidad (Informe Final del estudio geotécnico en el predio Alta Córdoba (“El Chichón”) de la CNEA – Laboratorio de Geotecnia – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba)

En el sitio de estudio los valores esperables se encuentran en el orden de los 10 cm. Este valor está en correspondencia al Tipo I de la clasificación china de colapsabilidad, es decir se trata de suelos de baja colapsabilidad (Lin et al 1982). Estos antecedentes deben ser contrastados con mediciones efectuadas en el sitio, aunque son indicativas de lo que se puede esperar en caso de humedecimiento generalizado de toda la zona.

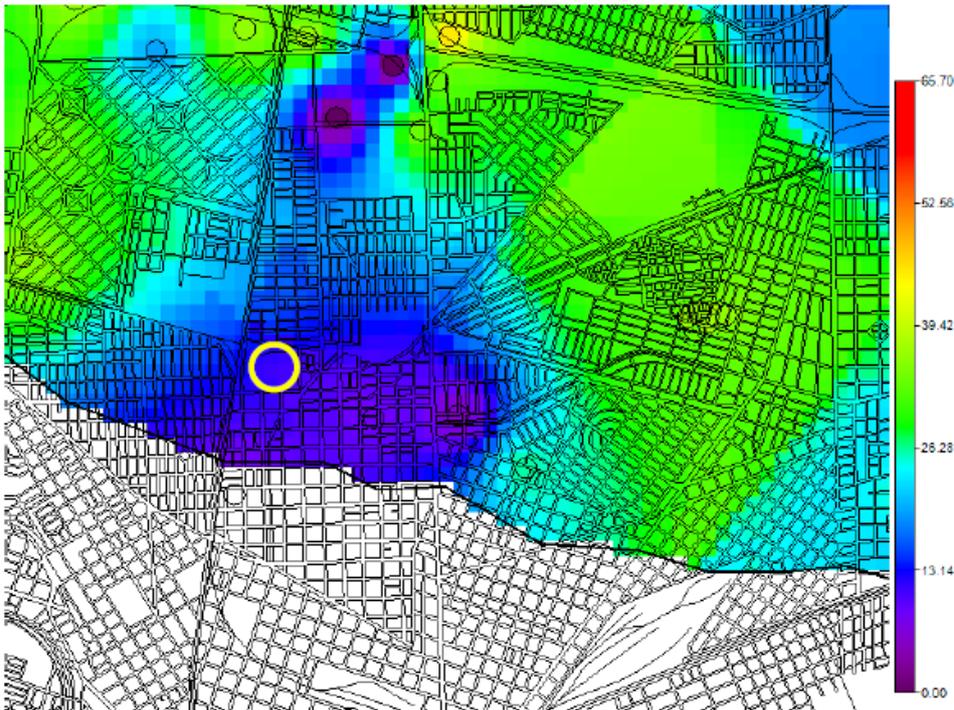


Figura 3: Colapsabilidad de la zona de estudio (Informe Final del estudio geotécnico en el predio Alta Córdoba , 2009)

#### 2.1.5. Condiciones climáticas

El clima de la ciudad es mediterráneo, templado y con frecuencia de cambios climáticos suaves. Se distingue principalmente un tiempo cálido y húmedo con vientos del norte en primavera y verano y un tiempo frío, seco con vientos del sur en invierno y en otoño.

Los promedios anuales de lluvia alcanzan los 750 mm.

Durante buena parte del año los vientos provienen del cuadrante NE. La urbanización modifica localmente las características climáticas al producirse recalentamientos con disminución de la presión y por ende de la humedad, sobre todo en los sectores céntricos.

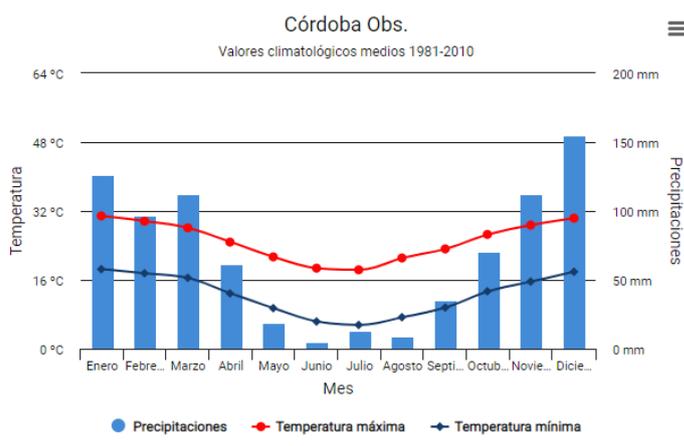


Figura 4: Variación de temperatura y precipitaciones en Córdoba (Servicio Meteorológico Nacional)

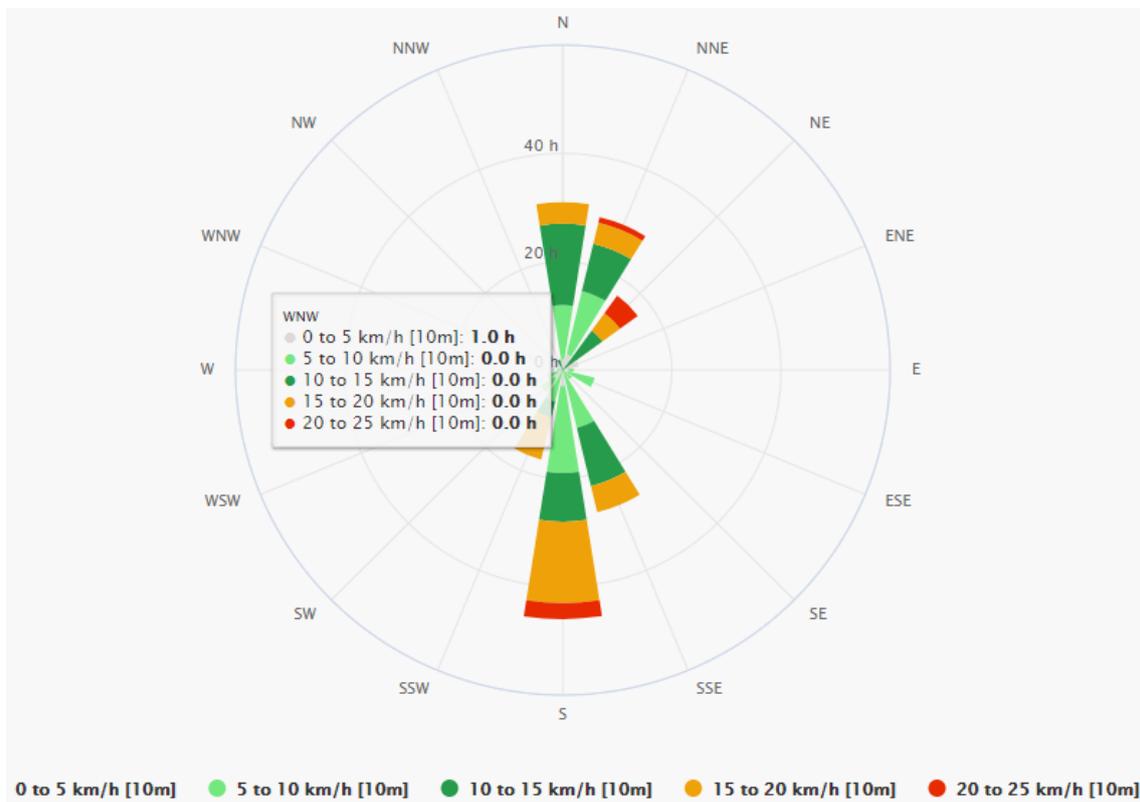


Figura 5: Rosa de los vientos en Córdoba (Recuperado de [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/archive/windrose/c%C3%B3rdoba\\_argentina\\_3860259](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/archive/windrose/c%C3%B3rdoba_argentina_3860259))

### 2.1.6 Topografía y Drenaje (Informe Final del estudio geotécnico en el predio Alta Córdoba ("El Chichón") de la CNEA – Laboratorio de Geotecnia – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba)

La cuenca que drena el sector de la planta de la CNEA tiene una superficie de 748 has y se encuentra ubicada a una cota de aproximadamente 433 – 434 msnm. La red de drenaje de la región muestra la tendencia general del escurrimiento y permite ubicar las divisorias de agua correspondientes

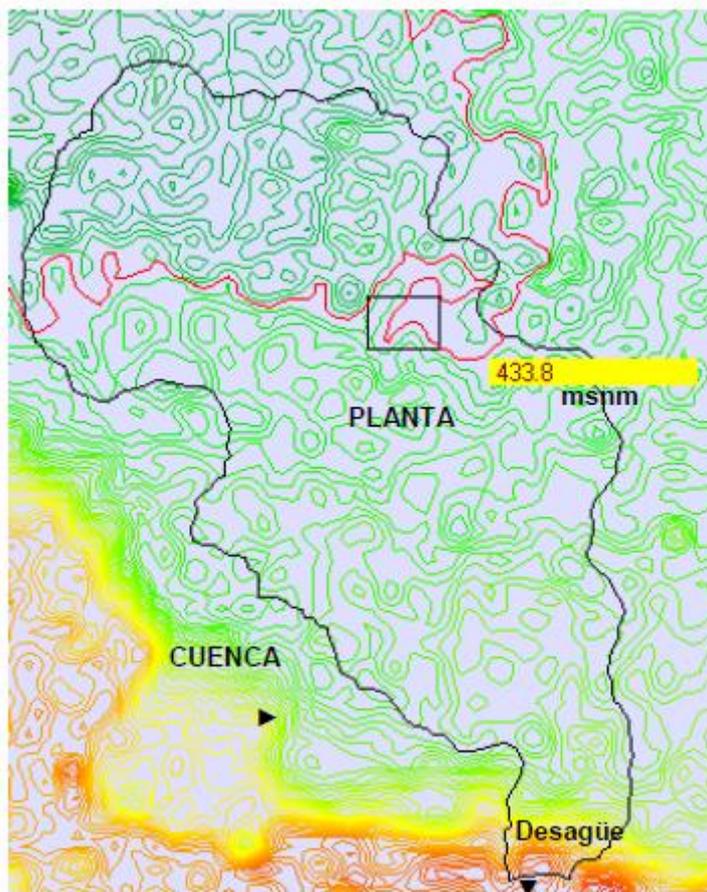


Figura 6: Curvas de nivel equidistancia 1 m (Informe Final del estudio geotécnico en el predio Alta Córdoba , 2009)

### 2.1.7 Riesgo sísmico

Desde el punto de vista sísmico la ciudad de Córdoba, se ubica en una región de sismicidad reducida (Zona 1 - Instituto Nacional de Prevención Sísmica y categoría “S” – Clasificación de Johnston).

Se hace notar que la permanencia a lo largo de varios siglos de construcciones históricas, con paredes de rodados de río y trabadas con ladrillos con una cubierta de techo de madera y tejas, típica de la arquitectura extremeña (España), es una muestra de la estabilidad sísmica de la región.

### 2.2. ACTIVIDAD EN EL SITIO CÓRDOBA

Desde hace más de 20 años, son dos áreas de Córdoba las que conviven con un pasivo ambiental a causa del proyecto nuclear nacional. La ex mina de uranio de Los Gigantes, en Punilla, que dejó de funcionar en 1990, pero nunca se realizaron los trabajos para remediar ese sitio que se encuentra en las nacientes de ríos serranos. Por otra parte, el ya mencionado “chichón” de Dioxitek: más de 57 mil toneladas de residuos del procesamiento de uranio, un predio ubicado en el barrio residencial de Alta Córdoba, de la Capital. Dichos desechos son de baja radioactividad. En la Municipalidad señalan que es el pasivo ambiental más grande que tiene la ciudad de Córdoba.

Dioxitek es una planta industrial de dióxido de uranio. Continuará abierta, trabajando y produciendo dióxido de uranio hasta marzo del 2020. Se preveía el traslado de la misma a Formosa.

El predio de 9,2 ha desarrolla tecnología de purificación de concentrados. A partir de 1961 se iniciaron ensayos a escala de laboratorio y de lixiviación en pilas, en 1976 se montó la instalación de purificación con desarrollo de ingeniería nacional. Convierte y purifica la materia prima en polvo de dióxido de uranio, insumo primordial para el funcionamiento de las centrales nucleares que aportan al sistema eléctrico el 6% de la energía. Este se envía a conuar SA, Ezeiza, provincia de Buenos Aires, para que se fabrique el combustible nuclear en pastillas de uranio para las centrales de Atucha y Embalse. Las colas de tratamiento de los minerales procesados con anterioridad a 1979 se destinaron a una zona de estériles dentro del predio del Complejo.

Dioxitek es una sociedad anónima estatal creada por Decreto PEN 1286/1996, el 99 % de cuyas acciones pertenecen a la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y el 1 % restante a la provincia de Mendoza. Fue creada por el Poder Ejecutivo Nacional, a partir del Área Ciclo de Combustible de la CNEA. Entró en funcionamiento en el año 1982 y pasó a operar como Dioxitek SA en en mayo de 1997.

### **2.2.1. Proceso industrial**

El proceso se compone de las siguientes etapas: disolución de ADU (diuranato de amonio) o  $U_3O_8$ , purificación, evaporación, precipitación de AUC (uranil carbonato de amonio), conversión a  $UO_2$ , homogeneización, envasado y tratamiento de efluentes. Reactivos químicos usados en el proceso son ácido nítrico; TBP; dióxido de carbono; amoniaco; metanol y cal.

Los reactivos líquidos y gaseosos son almacenados en tanques de distintos tamaños, y la cal - en bolsas de 30 kg. El proceso genera efluentes líquidos que son tratados químicamente y gestionados respetando las legislaciones vigentes. Los efluentes sólidos son enviados al CMFSR para su gestión.

Se encuentran depositadas  $31.500 m^3$  de colas de mineral. La cantidad total de material a remover en la zona de acumulación de colas será de aproximadamente  $36.000 m^3$ , teniendo en consideración la limpieza del piso donde se encuentran asentadas las colas.

### **2.2.2. Conflicto ambiental**

La ordenanza N° 8133 de uso de suelo, sancionada en 1985, prohíbe que una planta como ésta pueda estar ubicada en un barrio categoría 2 como lo es Alta Córdoba. Ya se anunciaron seis promesas de relocalización. La primera vez fue en 1994. Desde entonces, en otras cuatro oportunidades (1997, 2004, 2006 y 2012), se anunció el traslado de la fábrica de dióxido de uranio de Alta Córdoba. La última fue en enero de 2017.

1982. Comienza a funcionar la planta en Alta Córdoba.

1985. Sancionan ordenanza que prohíbe este tipo de fábricas.

1994. La Municipalidad pide la relocalización de la planta.
1995. Se acuerda el traslado. Se menciona Falda de Carmen.
1997. Se anuncia que la planta se trasladará a Despeñaderos.
2004. Se intenta un traslado a San Rafael (Mendoza).
2006. Se anuncia que la Nación relocalizará Dioxitek.
2007. Se firma convenio con la UTN para elegir un lugar en 2011.
2012. Tras una nueva clausura, se firma un compromiso para relocalizar la planta. Se comienza a construir la planta en Formosa.
2014. En noviembre, se clausura por incumplimiento del acuerdo.
2017. En enero se firma un nuevo acuerdo. Se debe cerrar en diciembre de 2018.

### **2.3. EL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR EN CÓRDOBA**

El uranio es un elemento natural en que primero se determina, mediante técnicas geológicas, en que zonas se halla el mineral. Luego, la prospección, se evalúa por muestras cuánto uranio hay por metro cubico de roca.

En la extracción se tritura la roca y, a través de una acción química, se separa el uranio de la roca para obtener un producto denominado torta amarilla (yellow cake). Para que la extracción sea rentable, en una tonelada de roca debe haber, por lo menos, 1 kg de uranio. La mina Los Gigantes funcionó entre 1982 y 1990 y produjo 200 toneladas de uranio.

La etapa de producción, la más relevante en el presente caso, es el primer eslabón de la industrialización del combustible para los reactores nucleares. En 1982, la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) puso en marcha una planta de producción de dióxido de uranio, con la pureza requerida para la fabricación de combustibles nucleares. Este proceso se inicia a partir de la denominada “torta amarilla” (yellow cake, en inglés), un concentrado de polvo de uranio que se obtiene por lixiviación tras ser extraído de la mina. Básicamente lo que hace Dioxitek es recibir el concentrado u óxidos de uranio, siendo una de las formas más conocidas esa torta amarilla, y lo convierte en dióxido de uranio. Es un proceso de conversión y purificación química para obtener un compuesto de “grado nuclear”, con más del 99,99% de pureza química. Para ello, la torta amarilla atraviesa procesos de disolución, purificación, evaporación, precipitación, conversión y homogeneización.

El dióxido de uranio se envía a Conuar SA que desarrolla el combustible nuclear en pastillas de uranio. Para la fabricación de combustibles para reactores de potencia, el dióxido de uranio se introduce en hornos donde se compacta hasta obtener pastillas cerámicas de 1 cm por 1 cm. A este proceso se lo denomina sinterizado. Las pastillas se colocan en tubos de zircaloy (una aleación de aluminio y zirconio); 37 de estos tubos llenos de pastillas conforman un elemento combustible. Luego de pruebas de

calidad, son trasladados para ser utilizados en las centrales nucleares con las que cuenta nuestro país: Atucha I y II (Lima, Buenos Aires) y Embalse (Río Tercero, Córdoba).

Los combustibles se introducen dentro del núcleo de un reactor de potencia. Allí se produce la etapa de fisión nuclear: división de los núcleos del uranio para liberar grandes cantidades de energía. En cada fisión se desprenden neutrones. Algunos son frenados (moderados) por el agua pesada del reactor. Esto genera una reacción en cadena que es controlada por las barras de control. El calor producido es transferido a un circuito secundario, en donde se calienta agua hasta transformarla en vapor, que moverá una turbina conectada a un generador. Así se obtiene la energía eléctrica que se usa en nuestros hogares, la industria y los espacios públicos.

El dióxido de Uranio también se usa para la fabricación de combustibles para reactores de investigación. Para este tipo de combustibles el dióxido de uranio es transformado en otros compuestos, a los que se coloca entre dos láminas de aluminio para formar una placa fina. Alrededor de veinte placas constituyen un elemento combustible para reactores de investigación. En estos reactores se busca disipar el calor que se produce con la fisión del uranio para producir neutrones. Los neutrones irradiarán diversos elementos naturales para obtener radioisótopos, que son sustancias radiactivas que se caracterizan por tener un núcleo atómico inestable y emitir energía. Podemos utilizarlos como trazadores, posibilitando múltiples aplicaciones de la tecnología nuclear que mejoran nuestra vida cotidiana.

La tecnología nuclear también se usa en diversos campos del quehacer humano por medio de la utilización de radioisótopos y radiaciones ionizantes que permiten prolongar la vida de los alimentos, modificar las propiedades de polímeros, realizar estudios de fertilidad de suelos, diagnosticar y tratar enfermedades, esterilizar materiales de uso médico y alimentos, controlar plagas, proteger el patrimonio artístico y documentos históricos, entre otras aplicaciones.

La CNEA trabaja en la remediación de aquellos lugares donde se desarrollaron actividades de minería del uranio. El objetivo de la remediación es disponer de forma segura y definitiva las colas o relaves (restos) de mineral y suelos para evitar su dispersión e interacción con el ambiente y las personas. Utilizando las tecnologías adecuadas, las minas y plantas de concentrado de uranio ya inactivas en nuestro país deben restituirse a un estado de impacto mínimo, seguro y sustentable.

La CNEA es el organismo responsable de establecer los criterios y procedimientos para el tratamiento, acondicionamiento y disposición de los combustibles nucleares gastados y de los residuos radiactivos generados en todo el país. Los combustibles irradiados y los residuos radiactivos originados en las centrales nucleares se acondicionan y almacenan en forma segura en los mismos predios de las centrales. Los residuos provenientes del resto de las aplicaciones nucleares se gestionan en el Centro Atómico Ezeiza.

## El ciclo del combustible

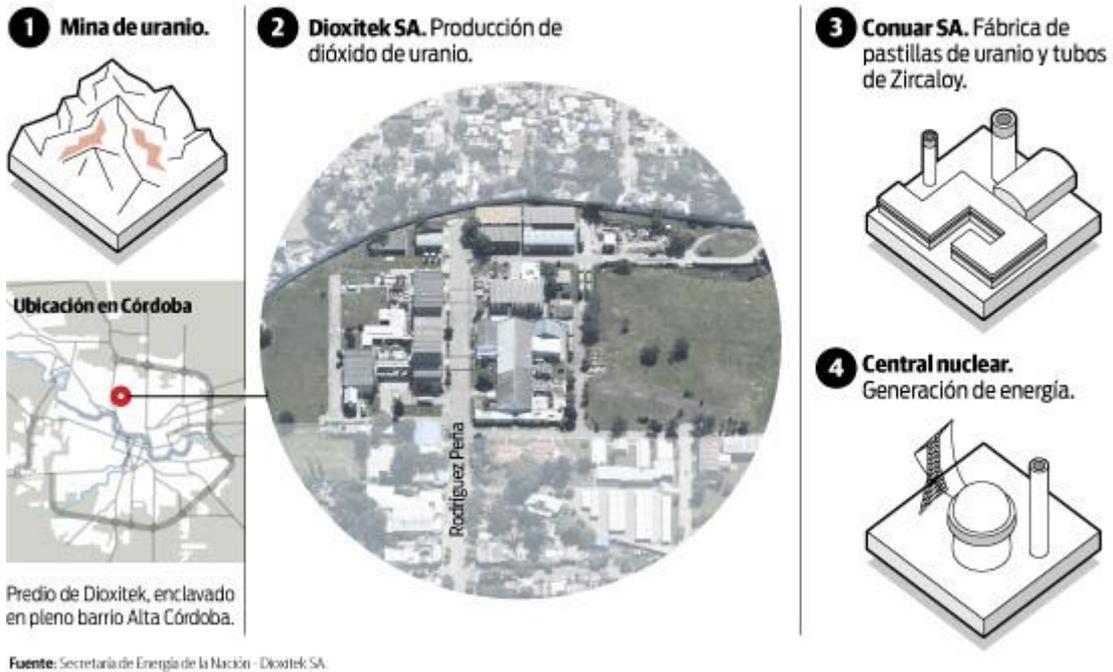


Figura 7: El ciclo del combustible en Córdoba (Secretaría de Energía de la Nación)

### 2.2.1. Muestreo e Impacto de la actividad (PRAMU Proyecto de Restitución Ambiental de la Minería del Uranio)

Se exponen los muestreos realizados en el marco del Proyecto de Restitución Ambiental de la minería de Uranio. Estos muestreos no fueron realizados durante la Práctica Supervisada, sin embargo, sirven para tener una idea de la contaminación existente y la necesidad de plantear un anteproyecto de remediación.

(a) de colas por medio de pozos cavados hasta el nivel de piso, y se continuaron 1 m por debajo de ese nivel, (b) muestreo del predio, y (c) muestreo de agua subterránea

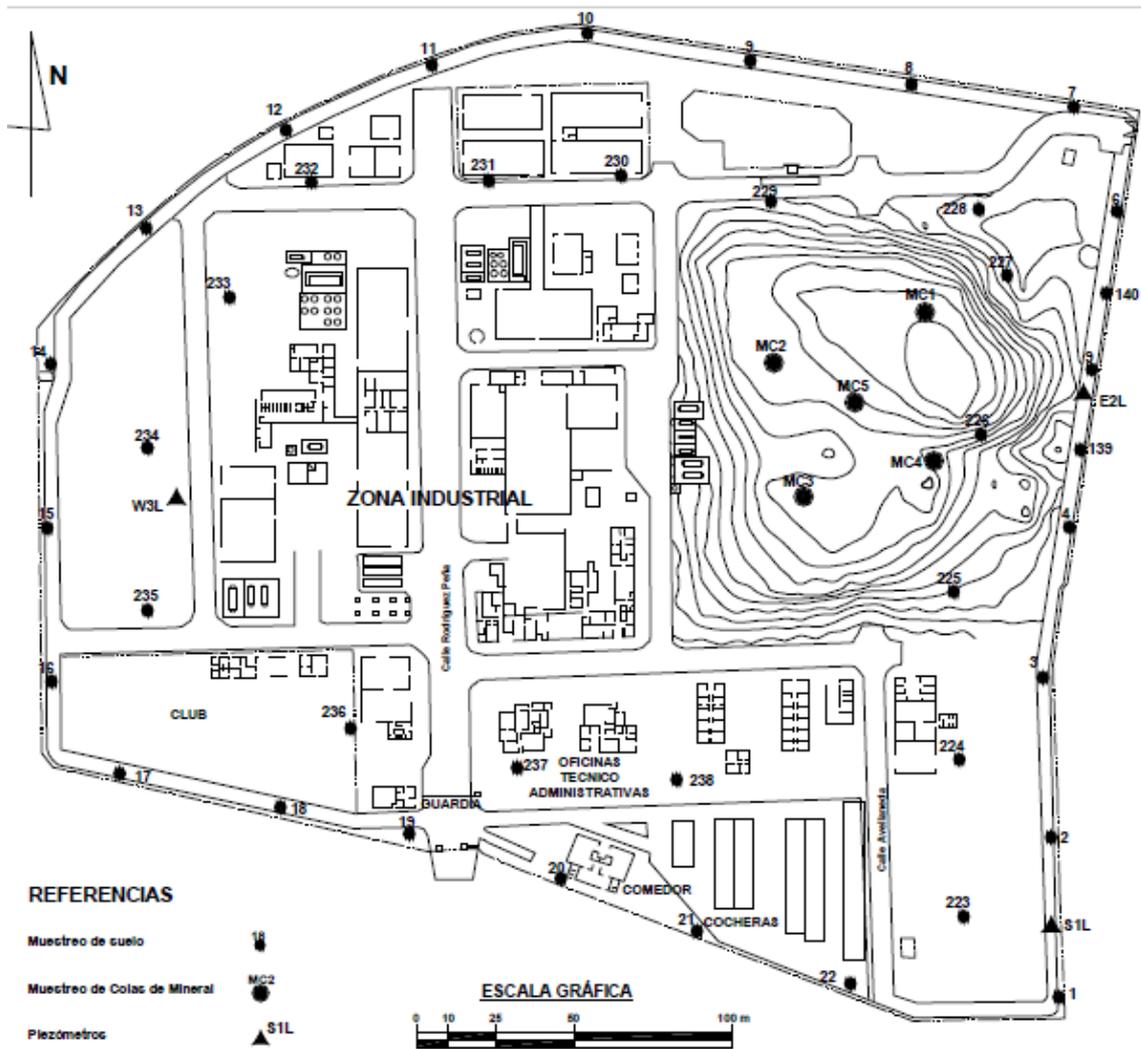


Figura 8: Puntos de muestreo ambiental (PRAMU, 2005)

**Contaminantes radiológicos:** La concentración promedio de U para los tramos considerados colas (residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que queda como resultado de haber extraído los minerales sulfurados en el proceso de flotación) es 337 mg/g y la de radio 11 Bq/g. La emanación promedio de radón sobre las colas es 6,6 Bq/m<sup>2</sup>s.

**Contaminantes no radiológicos:** En la Tabla se indican las concentraciones promedio de metales pesados, iones y el pH de los materiales extraídos de los pozos para los tramos considerados colas.

Elemento	Unidad	Concentración Promedio	Rango de variación de concentraciones
Cu	(µg / g)	615	52 - 2650
Pb	(µg / g)	124	2.6 - 365
Zn	(µg / g)	751	90 - 2385
V	(µg / g)	1032	70 - 4325
Mn	(µg / g)	1119	500 - 1850
Bi	(µg / g)	57	10 - 110
Mo	(µg / g)	130	n/d - 400
Ba	(µg / g)	242	n/d - 300
Cd	(µg / g)	23	2 - 69
Cr	(µg / g)	254	80 - 785
Li	(µg / g)	28	20 - 40
Ni	(µg / g)	114	20 - 350
Co	(µg / g)	59	n/d - 112
Na	(g/100g)	0,73	0.15 - 2.1
K	(g/100g)	1,04	0.05 - 1.6
Fe	(g/100g)	2,82	1.9 - 3.62
Mg	(g/100g)	0,64	0.32 - 0.94
Al	(g/100g)	5,06	1.75 - 8.67
Ca	(g/100g)	6,06	0.5 - 14.6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	(g/100g)	0,43	0.16 - 1.04
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	(g/100g)	16,4	0.73 - 35.3
S <sup>=</sup>	(g/100g)	3,31	n/d - 0.38
NO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	(µg/g)	731	n/d - 2190
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	(µg/g)	80	5 - 498
pH		7,2	5.8 - 7.9

Tabla 1: Concentración de elementos potencialmente peligrosos. Valores promedios y rango de variación de concentraciones, basados en 14 muestras (PRAMU, 2005)

Elemento	Concentración	Elemento	Concentración
U (µg/g)	2	Cr(µg/g)	60
Ra(pCi/g)	1,35	Li(µg/g)	36
Cu (µg/g)	50	Ni(µg/g)	20
Pb (µg/g)	70	Co(µg/g)	35
Zn(µg/g)	106	Na(g/100g)	1,04
V(µg/g)	250	K(g/100g)	1,4
Mn(µg/g)	970	Fe(g/100g)	3,1
Bi(µg/g)	60	Mg(g/100g)	0,96
Mo(µg/g)	Nd	Al(g/100g)	7,2
Ba(µg/g)	220	Ca(g/100g)	0,55
Cd(µg/g)	2	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g/100g)	0,41

Tabla 2: Composición química de suelos (PRAMU, 2005)

Parámetro	Pozo			
	S1L	E2L	W3L	Blanco (*)
U (µg/l)	27	83	16	85
Ra (pCi/l)	0,49	0,26	0,37	0,41
Cu (mg/l)	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Pb (mg/l)	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Zn (mg/l)	0,2	< 0,02	0,07	< 0,02
V (mg/l)	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4
Mn (mg/l)	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Bi ( mg/l)	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4
Mo (mg/l)	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4
Ba (mg/l)	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4
Cd (mg/l)	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Cr (mg/l)	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Li (mg/l)	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Co (mg/l)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Ag (mg/l)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Na (mg/l)	36	216	107	52
K (mg/l)	< 2	< 2	< 2	< 2
Fe (mg/l)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Mg (mg/l)	21	8,5	7,9	18
Al (mg/l)	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4
Ca (mg/l)	26	15,7	36	88
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/l)	< 5	< 5	< 5	< 5
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> (mg/l)	70	910	120	200
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	46	35	74	71
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	83	21	210	83
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
CO <sub>3</sub> <sup>=</sup> (mg/l)	13	< 10	13,2	< 10
CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup> (mg/l)	262	671	416	389
Dureza (mg/l)	280	260	190	280
Cond (uS/cm)	675	1977	1220	1090
pH	7,8	8	8	7,8

**Tabla 3: Composición química de agua subterránea (PRAMU, 2005)**

Se puede observar que en los 0,0-1,0 m de profundidad se presentan las mayores concentraciones de los distintos elementos analizados.

El sector con valores más altos de contaminación en U (en extremo noroeste del predio, pozos de muestreo TC231, TC232 y TC233) presenta rangos de variación en concentración de Uranio comprendidos entre 100 y 466 mg/g. Estos valores están en concordancia con los contenidos de U de los minerales que se acumulaban en estas playas.

La tasa de dosis promedio sobre las colas es 4,94 mSv/h, con valores máximos de

19,6 mSv/h. Estos valores justifican la gestión de las colas. Otras zonas dentro del área del Complejo (caminos internos) dieron valores promedio del orden de 0,15 mSv/h.

También se realizaron mediciones en puntos alejados al CFC, para definir el nivel de radiación natural o de fondo, obteniéndose valores promedio de  $0,11 \pm 0,01$  mSv/h. Mediciones realizadas sobre un sector de un camino público en las inmediaciones del sitio, dieron valores de radiación gamma comprendidos entre 0,10-0,16 mSv/h.

## 2.2.2. Muestreos realizados por el laboratorio de geotecnia

Se realizaron muestreos, por el Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, para determinar humedad natural, límites de Consistencia, lavado sobre Tamiz N° 200, granulometría, permeabilidad, doble oedómetros (para la medición directa de la colapsabilidad del suelo), triaxiales. Para ello se hicieron tres (3) sondeos mediante perforaciones rotativas de hasta 25,00 metros de profundidad (1,2 y 3 en la figura) y perforaciones existentes de inspección en el predio, para tomar muestras de los distintos tipos de suelos atravesados y realizar ensayos de penetración Standard (SPT) (4 y 5 en la figura). Estos muestreos tampoco fueron realizados durante la Práctica Supervisada, pero son relevantes para conocer las condiciones del suelo sobre el que se quiere aplicar una tecnología de remediación.



Figura 8: Sondeos realizados (Informe final, 2009)

## 2.2.3. Alternativas de gestión

Las opciones para tratar este predio son dos: realizar un tratamiento en el lugar o trasladar las 57 mil toneladas hasta Los Gigantes para remediar todo junto.

### Tratamiento In-Situ

Considerando los bajos niveles de radiactividad monitoreados en el sitio y sus alrededores, una alternativa es la de gestionar las colas en el lugar.

En caso del tratamiento In-Situ, la solución sería encapsular los residuos en el lugar para que dejen de contaminar y vigilarlos indefinidamente. Primero, debería realizarse

una auditoría radiológica y de metales pesados independiente, en el predio y en el barrio.

### **Tratamiento Ex-Situ**

Se consideraron dos alternativas de tratamiento ex situ

a) Remoción de las colas hasta un lugar de gestión de residuos peligrosos a una decenas de Km de distancia de la ciudad, y en la eventualidad que estudios posteriores demuestren que no existe relación causal entre el elevado contenido iónico de las aguas subterráneas y la movilización del lixiviado de las colas, se procedería al cubrimiento de las colas in situ para prevenir el impacto de las partículas suspendidas en el aire durante la remoción de las colas

b) Reubicación de 36.000m<sup>3</sup> de colas en el complejo Minero Fabril Los Gigantes. Para ello se estima que deberían realizarse 27 viajes diarios durante 7-8 meses, con camiones de 15 Ton de capacidad. La mitad de los 100 km de distancia serían transitados por un camino de una sola mano, sin pavimentar y multiuso; pasando además por distintas comunidades incluyendo la Ciudad de Carlos Paz, la cual se encuentra junto al lago San Roque, el que cumple varias funciones (suministrar y almacenar agua potable a la ciudad de Córdoba ) por lo que implica un riesgo.

#### **2.2.4. Composición química de los relaves**

La composición química de los relaves es:

- Concentración media de U: 337 ug / g
- Concentración media de Ra-226: 11 Bq / g = 297.2973 pCi/g
- Emanación media de radón en los relaves: 6.6 Bq / m<sup>2</sup>s = 178.378 pCi/m<sup>2</sup>s
- La tasa de dosis promedio sobre los relaves es 4.94 uSv / h, con valores máximos de 19.6 uSv / h
- El nivel de radiación natural o de fondo fuera del sitio es 0.11 ± 0,01 uSv / h

### **2.3. CASOS DE REFERENCIA**

El Proyecto de Acción Remediadora de Relaves de Uranio (UMTRA por sus siglas en inglés Uranium Mill Tailings Remedial Action) fue creado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos para monitorear la correcta disposición de uranio. En 1978, el Congreso de los EE. UU. aprobó la Ley de Control de Radiación de Relaves de Uranio (UMTRCA), que le asignó al DOE la responsabilidad de estabilizar, eliminar y controlar los relaves de uranio y otros materiales contaminados en el procesamiento de uranio en 10 estados y desmantelar 24 minas de uranio y eliminar sus residuos residuales.

Los estándares de UMTRA de la EPA establecen que las emisiones promedio de radón de los relaves de las ex minas no deben exceder los 20 pCi/m<sup>2</sup>-s. También

declaran que la barrera ingenieril contra el radón debe ser efectiva por unos 100 años por lo menos.

En tanto en nuestro país y en Latinoamérica, la primera obra de remediación ambiental de la minería del uranio se realizó en Malargüe, Mendoza mediante el proceso de ingeniería denominado encapsulado y se integró a la ciudad con la construcción del parque "El Mirador", un espacio de esparcimiento para toda la comunidad local. Con este logro el Sitio queda remediado e integrado con la ciudad de Malargüe.

Se hizo una revisión de estos casos para poder proponer la solución para el Sitio Córdoba.

## **CAPÍTULO 3: CONTAMINACIÓN RADIATIVA**

### **3.1. DEFINICIÓN DE CONTAMINACIÓN**

Allaby, apunta que contaminación significa: “Alteración directa o indirecta de las propiedades radiactivas, biológicas, térmicas o físicas de una parte cualquiera del medio ambiente, que puede crear un efecto nocivo o potencialmente nocivo para la salud, supervivencia o bienestar de cualquier especie viva”. El entorno está compuesto por sistemas interactivos que incluyen elementos biológicos, fauna y flora, elementos físicos, atmósfera, tierra y agua, y elementos sociales y culturales. Los impactos pueden definirse como aquellos efectos que alteran el sistema existente de manera temporal o permanente. La definición y la medición de los impactos dependen en gran medida de la ubicación, el país y los factores sociales y económicos.

La minería y la molienda de uranio generan su impacto en el medio ambiente, particularmente en la radiactividad ambiental. Se sabe que movilizan cantidades significativas de radionucleidos naturales y otros elementos tóxicos, originalmente contenidos en los depósitos de uranio sin explotar, al liberarlos a la atmósfera y la hidrosfera, y contaminar el medio ambiente con sustancias nocivas utilizadas en la extracción y molienda. Los seres humanos y otros organismos están en peligro principalmente por la irradiación externa o interna de los radionucleidos liberados en estos procesos y por los efectos tóxicos y de otro tipo de los productos químicos inhalados, ingeridos o contaminantes de la superficie del organismo. En algunos lugares o regiones, la contribución industrial a la tasa anual de dosis de radiación para los humanos se debe principalmente a los radionucleidos liberados o translocados, existiendo así muchas áreas contaminadas en el mundo. Muchos de estos sitios e instalaciones de producción necesitan medidas correctivas para detener o minimizar sus efectos ambientales adversos. Mientras, para las instalaciones de uranio todavía en funcionamiento, se buscan estándares mejorados para sus métodos de producción y para la planificación de su desmantelamiento.

### **3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA TORTA AMARILLA O “YELLOWCAKE”**

El material extraído se muele a un tamaño inferior a 100mm, y se almacena según su concentración de uranio y granulometría, pasando a un proceso de lixiviación estática (menos concentración) o dinámica (más concentración), el producto se manda a un lavado donde se terminan de separar los compuestos orgánicos o sólidos finos sueltos. La pulpa resultante se pulveriza sobre una corriente de agua caliente, se seca y se enfría obteniendo un polvo con un 90% de  $U_3O_8$ , que se almacena en bidones, este producto se denomina “yellow cake” (torta amarilla).

El óxido de uranio concentrado, torta amarilla, urania es un concentrado de óxido de uranio obtenido mediante la pulverización del mineral de uranio. Es un producto industrial cuyo contenido de uranio es superior al del mineral de origen con un contenido habitualmente superior al 70 por ciento y que suele estar constituido por un uranato (sódico, magnésico, amónico, etc.) o un óxido de uranio

Se suele representar con la fórmula  $U_3O_8$ .

El concentrado de uranio es radiactivo, insoluble en agua y contiene un 80% de óxido de uranio. Se funde a unos 2878 °C.

### 3.2.1. Proceso

Antes de poder utilizar el uranio que se explota en la minería, es necesario separarlo de otros minerales en el mineral y producir una forma concentrada, que normalmente es  $U_3O_8$ , llamada torta amarilla. Para lograr este objetivo, el mineral es molido y lixiviado con un ácido o base, la lixiviación con ácido sulfúrico es el método más común. Sin embargo, algunas fábricas usan lixiviación alcalina cuando el mineral contiene piedra caliza o componentes básicos similares que consumirían cantidades excesivas de ácido. La solución de uranio se purifica y se concentra mediante tecnología de intercambio iónico o extracción por solvente. Luego se precipita el uranio de la solución, se filtra y se seca para producir un concentrado, conocido como torta amarilla. Yellowcake contiene entre 60% y 90% de uranio en peso. La fracción de uranio se separa del otro material, llamado "mil tailings" en inglés, relaves de molienda. En el proceso se liberan partículas de la trituración, molienda y transporte de mineral molido, así como las liberaciones durante el secado y envasado de la torta amarilla. Ese desecho que queda, relave de molienda, contiene casi toda la progenie radiactiva natural de la descomposición del uranio, especialmente el torio 230 y el radio 226. La presencia de torio 230 proporciona una fuente a largo plazo de radón. Los relaves contienen metales pesados originalmente presentes en el mineral. También incluyen productos químicos de proceso como el amoníaco y solventes orgánicos. La contaminación en la molienda de uranio incluyen relaves, agua contaminada, sobrecarga y residuos de roca contaminada y efluentes transportados por el aire. La lechada de residuos es el desperdicio más significativo del proceso de molienda. Esta corriente de desechos es una mezcla de mineral sólido lixiviado y soluciones de desechos de los circuitos de molienda, lixiviación, purificación de uranio, precipitación y lavado de la fábrica. Debido a que el uranio constituye solo una pequeña parte del mineral, los relaves son esencialmente del mismo volumen que los alimentados en la molienda.

Los relaves se caracterizan por sus volúmenes relativamente grandes y concentraciones relativamente bajas de radionucleidos naturales de larga vida. Alrededor del 15% de la radiactividad total originalmente contenida en el mineral se incluye en la torta amarilla. Una vez que los nucleidos radiactivos de vida más corta han decaído, aproximadamente el 70% de la radiactividad originalmente presente en el mineral queda en los relaves.

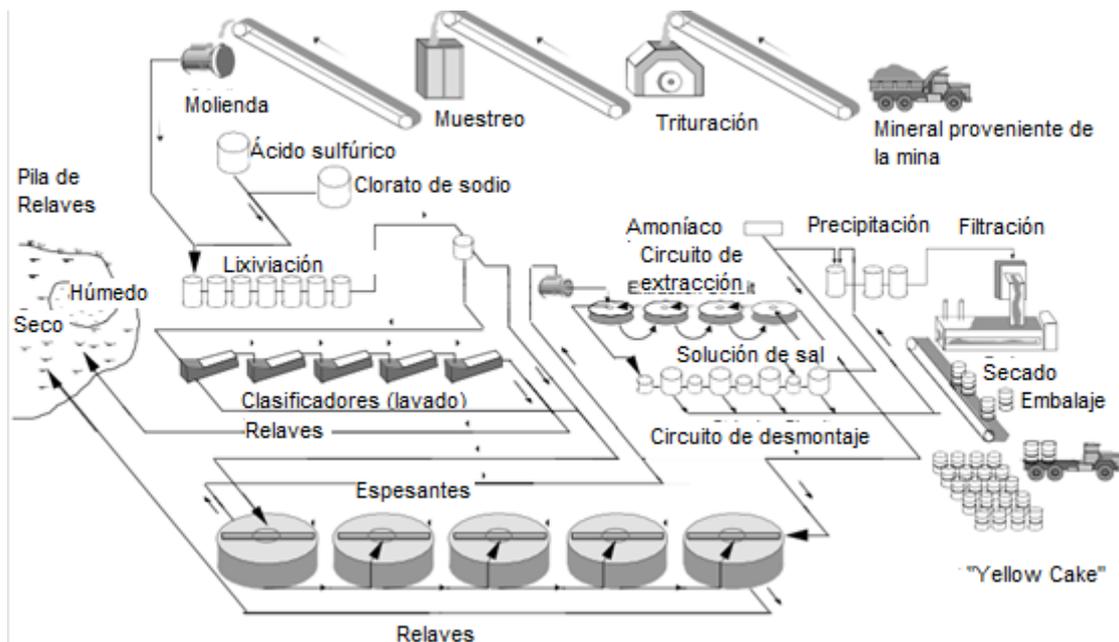


Figura 9: Proceso de Molienda de Uranio (Adaptado de Energy Information Administration)

### 3.3. IMPACTOS RADIOLOGICOS

En la operación de molienda, el mineral se procesa mecánica y químicamente para extraer la mayor parte del uranio y produce un concentrado de óxidos de uranio, llamado "torta amarilla". Los impactos radiológicos en las operaciones de molienda resultan de la liberación de polvos que contienen uranio y productos secundarios de uranio (torio-226 y torio-230), subproductos del radón. El radón se libera del tanque de lixiviación, pilas de mineral, sistema de retención de relaves y el sistema de ventilación de trituración y molienda de mineral. La mayor parte del radio en el mineral es insoluble y permanece en los relaves sólidos; se disuelve una pequeña porción, aproximadamente 1 por ciento o menos. Las soluciones de desecho contienen radio-226, torio-230, uranio y pequeñas concentraciones o productos de descomposición de radón.

Un grupo de trabajo internacional apoyado por el Instituto Sueco de Protección Radiológica ha realizado esfuerzos de modelado para evaluar los impactos a largo plazo de los contaminantes liberados de los relaves de los molinos de uranio, que involucran múltiples vías, múltiples contaminantes y múltiples receptores ambientales. Utilizando un escenario realista basado en la degradación de la cubierta (capping) que comienza 200 años después de la eliminación, los autores demostraron que la liberación de radón y la deposición de polvo contaminado de la atmósfera siguen contribuyendo de manera importante a la dosis de radiación para los seres humanos. La ingestión de verduras de hoja cultivadas en suelos contaminados con polvo radiactivo es la vía más importante para contribuir a la ingesta y la dosis (71-79% de la dosis total). El resto de la dosis se atribuye a la inhalación de polvo y gases (12-20%), la exposición externa de los suelos (3-9%) y la ingestión de carne (4-7%). Para la radiactividad liberada en el agua subterránea, las vías que más contribuyeron a la dosis interna fueron la ingestión de vegetales de hoja cultivados con agua subterránea contaminada y la ingestión directa de agua para todos los contaminantes, excepto el

arsénico, para lo cual la ingestión de carne fue importante debido a su factor de transferencia de carne relativamente alto. (Camus et al., 1999)

### **3.3.1. Impactos no radiológicos**

Se utilizan muchos productos químicos y tipos de equipos diferentes en las instalaciones de minería y molienda. En la mayoría de los casos, son los mismos que los utilizados en otras industrias. Por lo tanto, los efectos del uso de estos productos químicos y equipos también son muy similares

“La presencia de otros contaminantes puede acentuar a los radionucleidos para el medio ambiente, y además de tener efectos nocivos directos en sí mismos. A este respecto, el potencial de la extracción de uranio y los residuos de molienda para causar daño ambiental es muy diferente al de otras formas de minería, y los impactos resultantes pueden ser bastante similares. De hecho, no es adecuado considerar únicamente el riesgo radiológico. Los otros efectos pueden incluir:

- (1) La toxicidad química de los radionucleidos, incluido el uranio;
- (2) La toxicidad química de metales pesados y compuestos metálicos;
- (3) La toxicidad química de minerales y compuestos no metálicos en el mineral o introducidos durante el procesamiento (por ejemplo, ácido sulfúrico, queroseno);
- (4) Acidez, resultante de minerales sulfurosos (minerales) o ácidos introducidos durante la molienda;
- (5) aumento de la turbidez en las aguas superficiales;
- (6) Aumento de la salinidad.

La acidez elevada desempeña un papel importante en el aumento de la movilidad de los metales en solución acuosa, incluido el uranio, así como el cobre, el arsénico, el cadmio y otros metales. Los efectos de la contaminación por metales pesados son complejos y dependen en gran medida de los factores geográficos y climáticos locales, la mezcla de componentes químicos presentes y la naturaleza de los organismos afectados. Los efectos pueden ser letales o no letales. La intoxicación sub-letal crónica puede afectar el crecimiento, la reproducción, los patrones de comportamiento y dar como resultado una menor resistencia a las enfermedades, además de causar que el organismo tenga concentraciones corporales de elementos por encima de los estándares permitidos para el consumo. En algunos casos, los riesgos no radiológicos tienen un efecto mucho mayor que los contaminantes radiológicos. “(International Atomic Energy Agency, 2004)

### **3.3.2. Geoquímica del uranio**

Por su naturaleza, la molienda está diseñada para cambiar las características mineralógicas y químicas del mineral extraído, poniendo así el uranio en una forma más soluble y concentrada. Las operaciones de molienda también tienden a aumentar la solubilidad de ciertos contaminantes asociados con el mineral. Por ejemplo, el

proceso ácido tiende a promover la disolución y la movilización potencial de los productos de desintegración del radio, así como de diversos metales pesados presentes en el mineral. Las instalaciones de gestión de relaves están diseñadas para controlar la liberación de estos contaminantes o mitigar sus consecuencias.

En la naturaleza, el uranio generalmente existe en el estado de oxidación

En la naturaleza, el uranio generalmente existe en el estado de oxidación  $U^{6+}$  o  $U^{4+}$ . Bajo condiciones oxidantes,  $U^{6+}$  está presente en forma de uranil ion  $UO_2^{2+}$ , que es soluble en agua. La movilidad del uranio es aún mayor tras la formación de complejos de carbonato de uranilo, en condiciones neutras a alcalinas. Sin embargo, en condiciones reductoras,  $U^{4+}$  precipita como una fase  $UO_2$  altamente insoluble. En los sitios de eliminación de relaves, las condiciones oxidantes son dominantes, pero el confinamiento y la actividad microbiana pueden conducir a condiciones reductoras localizadas. (Abdesselam Abdelouas, 2006, p.340)

### 3.4. RADIACIÓN

La radiación consiste en el transporte o propagación de la energía en forma de partículas u ondas, que podemos definir como “energía en tránsito”

Tienen radiación el suelo, el agua, los alimentos e incluso nosotros mismos. Y el cuerpo humano está constantemente sometido a la radiación: desde la que proviene del sol hasta el uso del celular. El mismo planeta está constantemente bombardeado por rayos cósmicos, que consiste principalmente de: protones, núcleos pesados, radiación gamma y partículas alfa y beta. El suelo, el agua, los alimentos e incluso nosotros mismos somos un radiactivo, por lo que es un fenómeno natural. No toda radiación es nociva para el humano y demás organismos, en términos generales, esto dependerá del tiempo y cantidad a la que estén expuestos.

Se puede clasificar la radiación según su naturaleza, es decir su forma de propagarse, en:

- 1) Electromagnética o en forma de onda: ondas de radio, microondas, ondas infrarrojas, luz visible, luz ultravioleta, rayos X, rayos gamma
- 2) Corpusculares dadas por la energía ligada a partículas subatómicas: Alfa, beta, cósmica

Para poder diferir cual es la que puede ser nociva para la salud, se la clasifica en ionizante y no ionizante. Su diferencia radica en lo que se explica a continuación:

Los átomos en la naturaleza se encuentran formados por protones, neutrones y electrones. Normalmente estos átomos se encuentran estables, esto significa que la cantidad de electrones es igual al número de protones. Entonces se dice que el átomo es neutro, y que su carga total es cero. Si esto no es así, el átomo tiene una carga eléctrica y se llama ión. Sin embargo, algunos núcleos atómicos son inestables, en el sentido de que pueden emitir espontáneamente partículas cargadas o radiación electromagnéticas. A estos núcleos inestables se les llama *radioisótopos* y el proceso de emisión se llama *radiactividad*. Si estos átomos entran en contacto con otro átomo o molécula y liberan un electrón se dice que ocurrió una ionización. La radiación no

ionizante o de baja energía es aquella que no puede ionizar los átomos, por lo que el efecto biológico es menor, actuando más bien a través del efecto, térmico o mecánico y fotoquímico de los tejidos. Estas son del tipo electromagnético y engloban radiaciones ópticas como ultravioleta, espectro visible e infrarroja y los campos electromagnéticos microondas y radiofrecuencias.

Mientras tanto la ionizante o de alta energía es aquella que tiene la fuerza suficiente para arrancar los electrones de un átomo. Esta es la que tiene potencial de causar daños severos a la salud y daños ambientales.

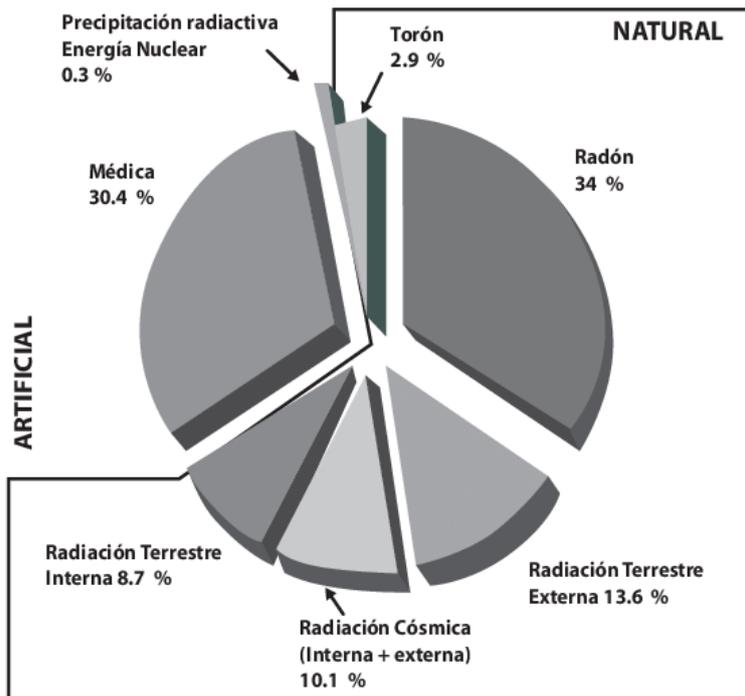


Figura 10: Exposición de la población a la radiación (Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Jose\\_Solis5/publication/316441925/figure/fig1/AS:486793725386752@1493072076947/Diagrama-de-porcentaje-de-radiacion-natural-y-artificial-que-esta-expuesta-la-poblacion.png](https://www.researchgate.net/profile/Jose_Solis5/publication/316441925/figure/fig1/AS:486793725386752@1493072076947/Diagrama-de-porcentaje-de-radiacion-natural-y-artificial-que-esta-expuesta-la-poblacion.png))

### 3.4.1. Descomposición radiactiva

El proceso de descomposición puede durar desde una fracción de segundo hasta miles de millones de años, dependiendo del tipo de átomo. La radioactividad de todos los residuos radiactivos se debilita con el tiempo. La tasa de descomposición radiactiva se mide en **vida media**, que es el tiempo que tarda la mitad de los átomos en descomponerse en otro nucleído, y, finalmente, todos los residuos radiactivos se descomponen en elementos no radiactivo, es decir, nucleídos estables.

La energía y el tipo de radiación ionizante emitida por una sustancia radiactiva también son factores importantes para determinar su amenaza para los humanos. Las propiedades químicas del elemento radiactivo determinarán la movilidad de la sustancia y la probabilidad de que se propague al medio ambiente y contamine a los humanos. Esto se complica aún más por el hecho de que muchos radioisótopos no se desintegran inmediatamente a un estado estable, sino más bien a productos de

desintegración radiactivos dentro de una cadena de desintegración antes de alcanzar finalmente un estado estable.

Por lo tanto, estos desechos deben protegerse durante siglos y aislarse del entorno vital durante milenios.

**Ley de desintegración radiactiva:** En 1902 Ernest Rutherford y Frederick Soddy, sugirieron que el ritmo con que una sustancia radiactiva emitía partículas radiactivas disminuía exponencialmente con el tiempo. La desintegración de un núcleo cualquiera se produce al azar, y el número de núcleos que se desintegran en un intervalo de tiempo  $dt$  es directamente proporcional al tiempo y al número de núcleos existentes. Su expresión matemática es:

$$N = N_0 * e^{-\lambda t}$$

**Semivida o periodo de desintegración,**  $T_{1/2}$  es el tiempo que tarda una muestra radiactiva en reducirse a la mitad.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Se define también la **vida media**  $\tau$ , como el tiempo que tarda un núcleo en desintegrarse

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

**Actividad radiactiva:** se mide la velocidad de desintegración de la muestra, es decir el número de desintegraciones que se producen por unidad de tiempo.

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

La unidad en la que se mide la actividad es el **Becquerelio** ,Bq, en honor a Henri Becquerel.

1 Bq = 1 d.p.s (desintegración por segundo)

Notación:

$T_{1/2}$  es el período de semidesintegración.

**N(t)** es el número de núcleos de la muestra en el instante tiempo  $t$ .

**N<sub>0</sub>** es el número inicial (cuando  $t = 0$ ) de núcleos de la muestra.

$\lambda$  es la constante de desintegración.

$\tau$  es la vida media

El curio (abreviación Ci) es una unidad de actividad radiactiva, nombrada así en homenaje a los físicos y químicos Pierre y Marie Curie.

Representa  $3,7 \times 10^{10}$  desintegraciones nucleares por segundo, que es más o menos la actividad de 1 g de  $^{226}\text{Ra}$  (isótopo del elemento químico «radio»).

El curio representaba una cantidad muy grande de radiactividad desde el punto de vista biológico, por lo que se comenzaron a utilizar unidades más pequeñas:

$$\text{milicurio (mCi)} = 10^{-3} \text{ Ci}$$

$$\text{microcurio (\mu Ci)} = 10^{-6} \text{ Ci}$$

$$\text{nanocurio (nCi)} = 10^{-9} \text{ Ci}$$

$$\text{picocurio (pCi)} = 10^{-12} \text{ Ci}$$

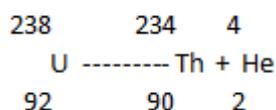
El curio ha sido reemplazado por una unidad derivada del SI, el becquerel (Bq):

$$1 \text{ Bq} = 2,703 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

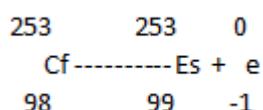
### 3.4.2. Emisiones radiactivas

**Radiación  $\alpha$** , que aligera los núcleos atómicos en 4 unidades másicas, y cambia el número atómico en dos unidades.



Como en cualquier reacción donde los productos son más estables que los reactivos, se desprende energía.

**Radiación  $\beta$** , que no cambia la masa del núcleo, ya que implica la conversión de un protón en un neutrón o viceversa, y cambia el número atómico en una sola unidad (positiva o negativa, según si la partícula emitida es un electrón o un positrón).



Es decir, es equivalente a transformar un protón dentro del núcleo en un neutrón.

**Radiación  $\gamma$** , por su parte, se debe a que el núcleo pasa de un estado excitado de mayor energía a otro de menor energía, que puede seguir siendo inestable y dar lugar a la emisión de más radiación de tipo  $\alpha$ ,  $\beta$  o  $\gamma$ . La radiación  $\gamma$  es, por tanto, un tipo de radiación electromagnética muy penetrante, ya que tiene una alta energía por fotón emitido.

Las dos primeras indican que, cuando un átomo emite una radiación alfa o beta, se transforma en otro átomo de un elemento diferente. Este nuevo elemento puede ser radiactivo y transformarse en otro, y así sucesivamente, con lo que se generan las llamadas series radioactivas.

El uranio es un elemento inestable, debido a que tiene más neutrones que protones en su núcleo; por lo tanto, se produce un decaimiento mediante emisiones radiactivas hasta transformarse en un elemento de núcleo estable como el Plomo.

Los protones nunca se tocan entre sí. Similar a un imán, los protones cargados repelen cada uno a otro. Debe haber neutrones separando los protones.

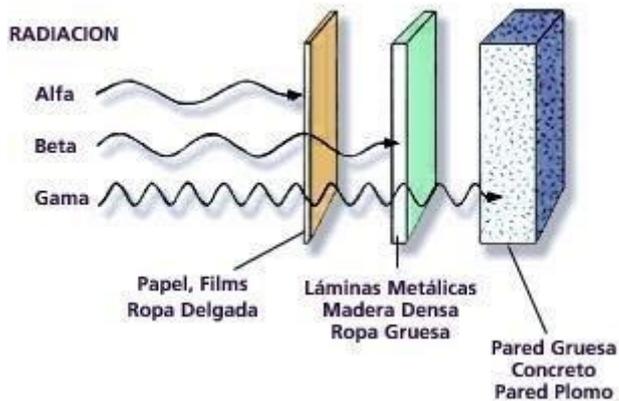


Figura 11: Radiación alfa, beta y gama (Recuperado de <https://energianuclearccb-abi.weebly.com/radiacion.html>)

### 3.5. URANIO: USOS Y EFECTOS SOBRE LA SALUD

Dentro de del campo de la química nuclear, los elementos con número atómico mayor a 83 ( $z > 83$ ), serán radiactivos, por lo tanto, su núcleos son inestables y estos emitirán radiaciones de manera espontánea.

El uranio es un elemento que en su estado natural se compone de tres isótopos:  $^{234}\text{U}$  (0,006%),  $^{235}\text{U}$  (0,7%), y  $^{238}\text{U}$  (99,3%), que tienen el mismo número atómico  $Z=92$  [92 electrones (cargas -) y protones (cargas +)] y diferente masa atómica debido a que tienen distinta cantidad de neutrones en el núcleo por lo tanto, difieren en su número másico.

El uranio es un elemento de alto peso atómico.

Debido a los porcentajes de cada uno de ellos, nos referiremos sólo al URANIO-238 Y URANIO-235.

El uranio es una sustancia radiactiva que se encuentra en forma natural. Forma parte de las rocas, tierra, aire y el agua y se halla en la naturaleza en forma de minerales, pero nunca como metal.

El uranio es un material radiactivo que es muy reactivo. Como resultado, no se puede encontrar en el medio ambiente en su forma elemental. La solubilidad en agua de un compuesto de uranio determina su movilidad en el medio ambiente, así como su toxicidad.

Tal como se mencionó, si bien el uranio en sí no es particularmente peligroso, algunos de sus productos de descomposición representan una amenaza, especialmente el radón.

Más neutrones, más pesado es.

Vida media de algunos radioisotopos	Semivida	Tipo de desintegración
Uranio-234	250,000 años	Alfa
Uranio-235	704,000,000 años	Alfa
Uranio-238	4,470,000,000 años	alfa

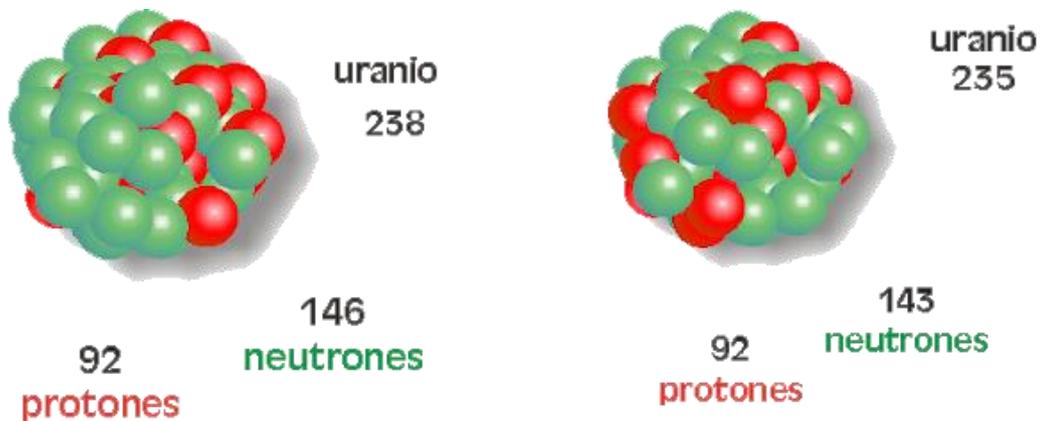


Figura 12: Isótopos del Uranio( Recuperado de <https://radiactividadfls.blogspot.com/2017/10/isotopos-radiactivos.html>).

### 3.4.1. Usos del Uranio

El uranio metálico es de color plateado con superficie gris y es casi tan resistente como el acero.

En el proceso de explotación de uranio, al extraerlo y concentrarlo inicia su decaimiento ya que es inestable, emitiendo partículas y rayos ionizantes hasta convertirse en plomo estable.

El residuo que queda se llama relave o cola. Los relaves contienen grandes cantidades de productos químicos y sustancias radiactivas que no fueron removidas, tales como radio y torio.

Una de las propiedades radiactivas del uranio es la vida media, o el tiempo que tarda la mitad del isótopo en emitir su radiación y transformarse a otra sustancia.

Las vidas medias son muy largas (cerca de 200,000 años para el  $^{234}\text{U}$ , 700 millones de años para el  $^{235}\text{U}$ , y 5 billones de años para el  $^{238}\text{U}$ ). Es por esto que el uranio aún existe en la naturaleza y no ha decaído totalmente.

El isótopo  $^{235}\text{U}$  es útil como combustible en plantas nucleares y en armamentos. Para producir combustible, el uranio natural es separado en dos porciones. La porción combustible tiene más  $^{235}\text{U}$  que lo normal y se llama uranio enriquecido. La porción sobrante con menos  $^{235}\text{U}$  que lo normal se llama uranio empobrecido. El uranio natural, enriquecido o empobrecido es químicamente idéntico. El uranio empobrecido es el menos radiactivo; el uranio enriquecido, el más radiactivo.

El principal uso del uranio en la actualidad es como combustible para los reactores nucleares, en las centrales nucleares de potencia (CNP) para la producción de energía eléctrica. Las CNP producían, en el año 2009, el 16% de la electricidad en el mundo. El uranio es enriquecido aumentando la proporción del isótopo  $^{235}\text{U}$  desde el 0,7% hasta valores en el rango 3-5%, para utilizar su capacidad para provocar una reacción en cadena de fisión que se expande rápidamente. El uranio-235 es el único isótopo fisible que se encuentra en la naturaleza.

Debido a su alta densidad se usa en la construcción de estabilizadores para aviones y satélites artificiales.

Se usa como agregado para la creación de cristales de tonos fluorescentes verdes o amarillos.

El alto peso atómico hace que el  $^{238}\text{U}$  pueda ser utilizado también como un eficaz blindaje contra las radiaciones de alta penetración.

Se usa para crear radioisótopos como el cobalto que tiene utilidad médica.

El  $^{238}\text{U}$  se convierte en plutonio en los reactores reproductores. El plutonio puede ser usado en reactores o en armas nucleares.

### **3.4.2. Efectos del Uranio**

Todas las mezclas de uranio (natural, enriquecido y empobrecido) tienen los mismos efectos químicos en el organismo, reaccionando con los tejidos y dañando los riñones. El daño de radiación por exposición a altos niveles de uranio natural o empobrecido, no produce cáncer. Sin embargo, el uranio puede transformarse a otras sustancias radiactivas, como por ejemplo radio, las que sí pueden producir cáncer si existe una exposición a ellas en suficiente cantidad por un período prolongado.

El uranio en sí mismo es radiactivo, aunque con el isótopo principal U-238 tiene una vida media igual a la edad de la tierra, ciertamente no es fuertemente radiactivo. U-235 tiene una vida media de un sexto de esta y emite rayos gamma, así como partículas alfa. Por lo tanto, un trozo de uranio puro emitiría algunos rayos gamma, pero menos que los de un trozo de granito. Su radiactividad alfa en términos prácticos depende de si es una roca como mineral, o como un polvo seco. En este último caso, la radiactividad alfa es un peligro potencial, aunque no importante. También es tóxico químicamente, siendo comparable con el plomo. El uranio metálico se maneja comúnmente con guantes como precaución suficiente. El concentrado de uranio se maneja y contiene para garantizar que las personas no lo inhalen ni ingieran.

La radiación gamma detectada por los geólogos de exploración que buscan uranio en realidad proviene de elementos asociados como el radio y el bismuto, que a lo largo del tiempo geológico han resultado de la desintegración radiactiva del uranio.

## La cadena de decaimiento del Uranio-238

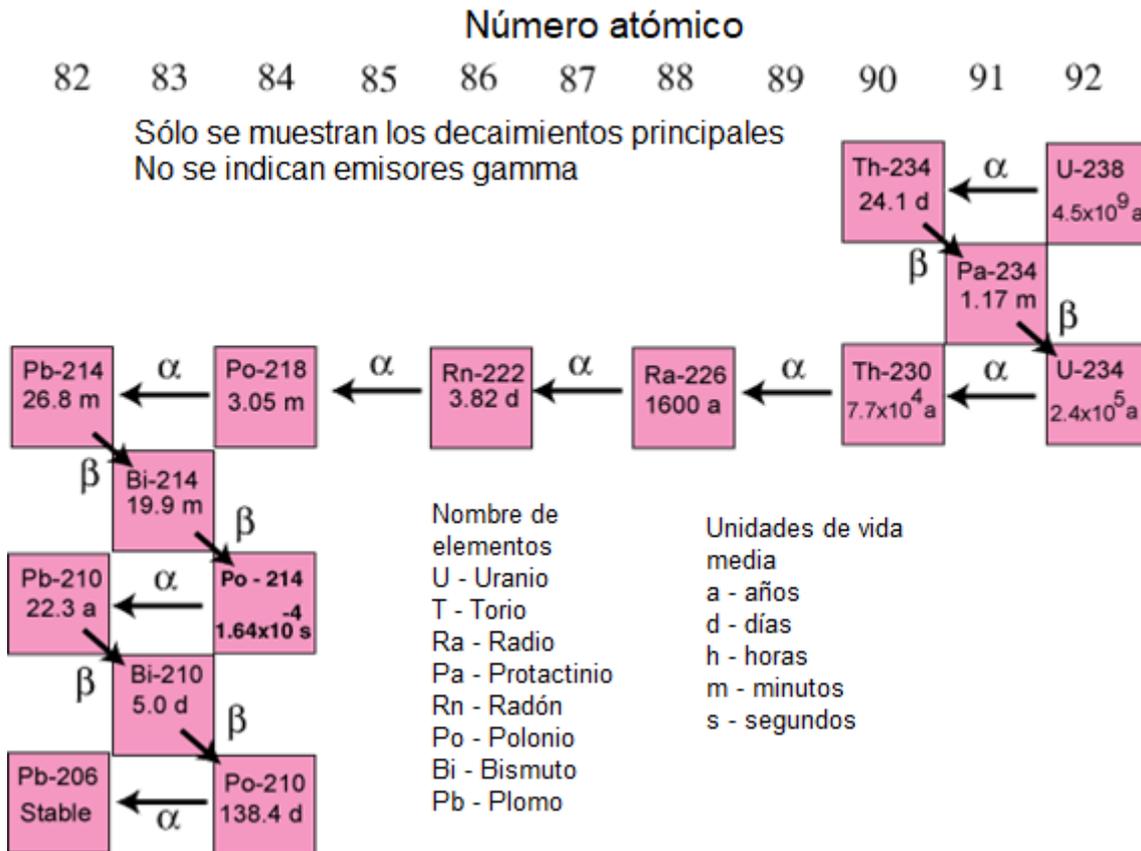


Figura 13: Cadena de decaimiento radiactivo del Uranio (Recuperado de <https://pubs.usgs.gov/of/2004/1050/uranium.htm>)

### 3.6. FLUJO DE MATERIALES Y DESECHOS

Cada instalación produce un producto a partir de materias primas mediante el uso de recursos (energía, agua, tierra) y reactivos. La instalación también produce desechos en forma de emisiones o efluentes ambientales al aire, el agua y el suelo. Algunos de estos desechos (es decir, relaves de molienda "mil tailings") normalmente se contienen en estructuras de ingeniería o áreas controladas. a la naturaleza de larga duración de algunos de los radionucleidos liberados en el ciclo del combustible nuclear, la concentración y la bioacumulación en todas las cadenas alimentarias deben tenerse en cuenta cuando sea apropiado al evaluar los impactos ambientales. La minería y la molienda de minerales generalmente implican la interrupción de la superficie de la tierra y pueden afectar los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Por lo tanto, los impactos ambientales son potencialmente más amplios y más diversos que para otros pasos del ciclo del combustible nuclear (es decir, conversión, enriquecimiento, fabricación de combustible, reprocesamiento de combustible, etc.).

Los desechos radiactivos se generan en prácticamente todas las áreas de la industria nuclear y se acumulan como líquidos, sólidos o gases con niveles variables de radiación. La mayor parte de los desechos se producen en la minería y la molienda, sin embargo los desechos más radiactivos se producen al final del ciclo.

En la definición de la NRC de molienda de uranio, se encuentra el concepto de relaves de molienda producidos por la extracción y concentración de uranio. "Los relaves del molienda son el material derivado de los desechos arenosos de grano fino que queda después de que el proceso de molienda extrae y concentra el uranio del mineral. Los relaves generalmente se generan en forma de lodo durante el procesamiento, y luego se depositan en un depósito o "pila de relaves del molino", que debe ser cuidadosamente regulado, monitoreado y controlado. Esto se debe a que los relaves del molienda contienen los componentes de mineral de metal pesado, así como una cantidad residual de radio, que se produce durante la descomposición radiactiva del uranio. El radio, a su vez, se descompone para producir un gas radiactivo, conocido como radón, que luego se puede liberar al medio ambiente. Debido a que este radón es un gas radiactivo, que puede inhalarse y depositarse en el tracto respiratorio, algunos investigadores han sugerido que su presencia en áreas confinadas (como minas u hogares) puede estar asociada con un mayor riesgo de cáncer de pulmón" (United States Nuclear Regulatory Commission, 2017).

Los productos de desecho sólido de la operación de molienda son relaves. Comprenden la mayor parte del mineral original y contienen la mayor parte de la radiactividad en él. En particular, contienen todo el radio presente en el mineral original.

Debido a que el mineral de uranio emite gas radón, la extracción de uranio puede ser más peligrosa que otra extracción subterránea, a menos que se instalen sistemas de ventilación adecuados. Es una de las sustancias más densas que sigue siendo un gas en condiciones normales y se considera un peligro para la salud debido a su radiactividad. Su isótopo más estable,  $^{222}\text{Rn}$ , tiene una vida media de 3,8 días.

Debido a que el radón y sus productos de descomposición son radiactivos y porque los relaves se encuentran en la superficie luego de la explotación, se toman medidas para minimizar la emisión de gas radón. Durante la vida operativa de una mina, el material en la presa de relaves a menudo se mantiene cubierto por agua para reducir la radioactividad de la superficie y la emisión de radón (aunque con minerales de menor grado ni representa un peligro en estos niveles).

El radón se produce en la mayoría de las rocas y hay rastros de él en el aire que todos respiramos. Sin embargo, a altas concentraciones es un peligro para la salud.

Según un informe de 2003 de la *Evaluación de Riesgos de Radón de Radón en Hogares* de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, la EPA, la evidencia epidemiológica muestra un vínculo claro entre el cáncer de pulmón y las altas concentraciones de radón, con 21,000 muertes por cáncer de pulmón en los EE. UU. Ha sido clasificado por la Agencia Internacional de Investigación sobre el cáncer como cancerígeno para los humanos.

### 3.61. Radon 222

El radón 222 se genera en la serie de uranio a partir de la desintegración alfa del radio 226, que tiene una vida media de 1600 años. El radón 222 en sí mismo se descompone alfa en polonio-218 con una vida media de aproximadamente 3.82 días, lo que lo convierte en el isótopo más estable del radón. Su producto de descomposición final es plomo estable 206.

En teoría,  $^{222}\text{Rn}$  es capaz de doble desintegración beta  $^{222}\text{Ra}$ , y dependiendo de la medición de masa, también se puede permitir la desintegración beta simple a  $^{222}\text{Fr}$ .

Todos los isótopos de radón son peligrosos debido a su radiactividad, naturaleza gaseosa, inercia química y radioactividad de sus productos de descomposición. El radón 222 es especialmente peligroso porque su vida media más larga le permite impregnar el suelo y las rocas, se concentra en edificios y minas de uranio. Esto contrasta con los otros isótopos naturales que se descomponen mucho más rápidamente (vidas medias de menos de 1 minuto) y, por lo tanto, no contribuyen significativamente a la exposición a la radiación. A concentraciones más altas, el  $^{222}\text{Rn}$  gaseoso puede inhalarse y descomponerse antes de la exhalación, lo que conduce a una acumulación de sus productos  $^{218}\text{Po}$  y  $^{214}\text{Po}$  en los pulmones, cuya radiación alfa y gamma de alta energía daña las células. Los períodos prolongados de exposición a  $^{222}\text{Rn}$  y su progenie finalmente inducen cáncer de pulmón.

Alternativamente, el radón puede ingresar al cuerpo a través del agua potable contaminada o por la descomposición del radio ingerido, lo que hace que la difusión del radón sea uno de los mayores peligros del radio. Por lo tanto,  $^{222}\text{Rn}$  es un carcinógeno; de hecho, es la segunda causa principal de cáncer de pulmón en los Estados Unidos después del tabaquismo, con más de 20,000 muertes por año atribuidas al cáncer de pulmón inducido por radón.

### 3.7. RADÓN Y EFECTOS SOBRE LA SALUD

El radón es un gas de origen natural incoloro, inodoro e insípido. El radón se produce a partir de la desintegración radiactiva natural del uranio, que está presente de forma en suelos y rocas. El radón también puede encontrarse en el agua.

Es un gas inerte (es decir, no reacciona químicamente con otros elementos) producidos por la desintegración radiactiva del radio-226 (Ra-226) en la serie de decaimiento de uranio-238 (U-238). Como un gas, radón puede difundirse a través de los relaves y hacia la atmósfera donde puede ser transportado por el viento sobre una gran superficie. El radón emana fácilmente del suelo y pasa al aire, donde se desintegra y emite partículas radiactivas; es decir estando en la atmósfera, el radón se descompone en sus productos secundarios sólidos que pueden adherirse a partículas de polvo en el aire y así ser luego inhaladas por humanos. Las concentraciones de radón persisten en los relaves de la molienda porque  $^{222}\text{Rn}$  es un producto de descomposición del  $^{226}\text{Ra}$  de vida más larga (vida media = 1600 años).

Estas partículas de polvo, con los productos secundarios de radón unidos, pueden adherirse al recubrimiento pleural de los pulmones, al inhalarlas y descomponerse con

la liberación de radiación alfa directamente a los pulmones, donde pueden dañar el ADN y provocar cáncer de pulmón. Según la OMS, el radón es la segunda causa más importante de cáncer de pulmón después del tabaco. El estudio "Efectos sobre la salud de la exposición al radón: BEIR VI, Comité de Riesgos para la Salud de la Exposición al Radón (BEIR VI)" del National Research Council respalda totalmente las estimaciones de la EPA de que el radón causa aproximadamente 15,000 muertes por cáncer de pulmón por año. El riesgo de cáncer de pulmón aumenta en un 16% con cada incremento de 100 Bq/m<sup>3</sup> en la concentración media de radón a largo plazo. La relación dosis-respuesta es lineal: por ejemplo, el riesgo de cáncer de pulmón aumenta de manera proporcional al aumento de la exposición al radón.

La radiación gamma 1 también emitida por muchos números de la serie de desintegración U-238, la radiación de Gamma se comporta independientemente de las condiciones atmosféricas y viaja en línea recta hasta que impacta con la materia. La radiación gamma emitida por los relaves proporciona una exposición externa a todo el cuerpo. Los niveles de radiación gamma emitidos por los relaves se vuelven insignificantes más allá de 0.3 millas (0,5 km) del perímetro de los relaves debido a la interacción de los rayos gamma con la materia en el aire.

Cualquier persona que viva o trabaje a menos de 0,3 millas de los relaves está siendo expuesta por la difusión de radón en el aire y exposición directa a los rayos gamma. Actualmente, no existen barreras efectivas para prevenir la dispersión continua y la extracción y el uso no autorizados de los relaves que podrían aumentar la exposición del público en general a los subproductos de radón y la radiación gamma.

Como se dijo, al aire libre, el radón se diluye rápidamente, tiene concentraciones muy bajas y no suele representar ningún problema. En cambio, en espacios cerrados, las concentraciones de radón son más elevadas, en especial en lugares como minas, cuevas y plantas de tratamiento de aguas, donde se registran los niveles más altos. En edificios (como viviendas, escuelas y oficinas), las concentraciones de radón varían de <10 Bq/m<sup>3</sup> hasta más de 10 000 Bq/m<sup>3</sup>.

La concentración de radón en el interior de una vivienda depende de varios parámetros, la OMS considera estos 3 factores:

- 1) Cantidad de uranio que contienen las rocas y el terreno del subsuelo del área en la que se encuentra la vivienda.
- 2) Las vías que el radón encuentra para filtrarse en las viviendas.
- 3) Tasa de intercambio entre el aire interior y exterior, es decir, renovación del aire interior.

El radón se filtra en las casas a través de grietas en los suelos o en la unión del piso con las paredes, espacios alrededor de las tuberías o cables, pequeños poros que presentan las pareces construidas con bloques de hormigón huecos, o por los sumideros y desagües. Por lo general, el radón suele alcanzar concentraciones más elevadas en los sótanos, bodegas y espacios habitables que están en contacto directo con el terreno.

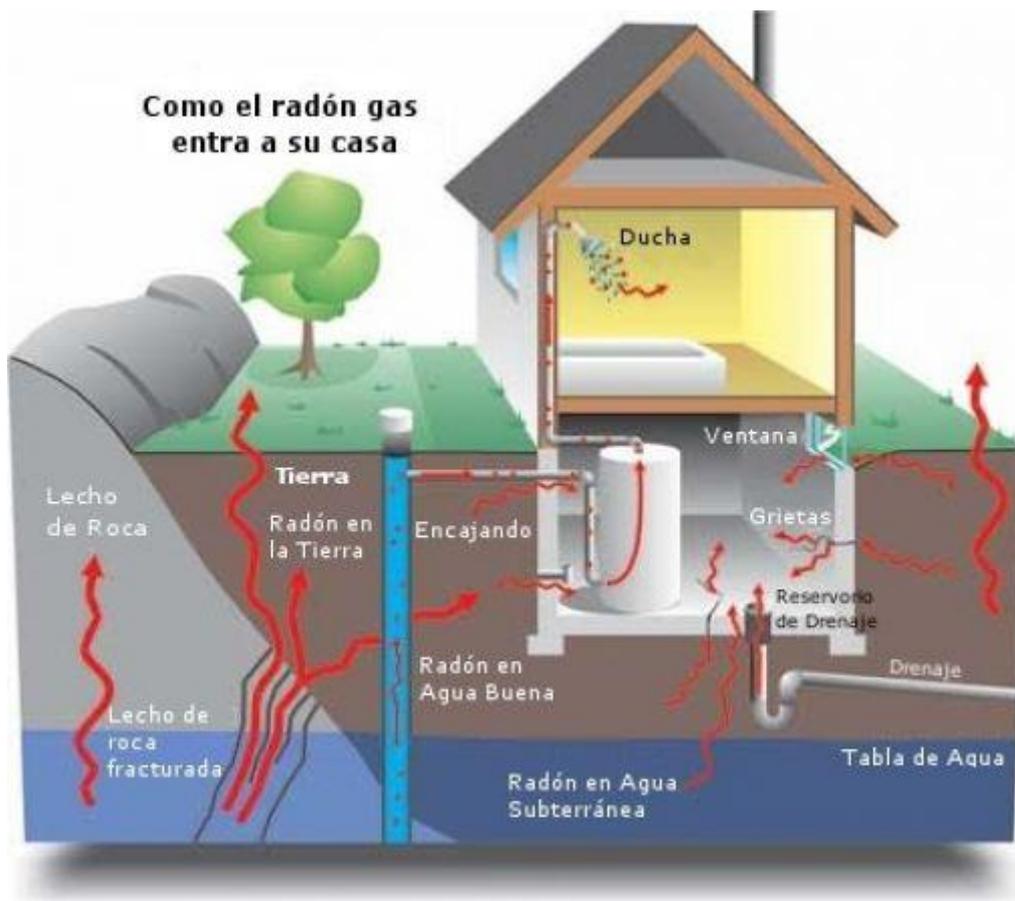


Figura 14: Ingreso del radón al hogar (Recuperado de <https://www.renovablesverdes.com/gas-radon/>)

- 1) emisión de radón permanentemente, quienes viven en dirección donde va el viento van a estar expuestos al radón.
- 2) hay polvo de uranio que salen de las plantas de procesamiento, es muy fino, se deposita en el suelo, las plantas y se sigue descomponiendo en radio 226 y radón 222 que seguirá la cadena trófica contaminando a las personas.
- 3) emisión de rayos gamma
- 4) el polvo lleva radio 226 y arsénico

Nivel de radón	Riesgo para fumadores(1)			Riesgo para no fumadores(2)		
	*	**	QUÉ HACER:	*	**	QUÉ HACER:
<b>20 pCi / L</b>	Cerca de 260 personas podrían contraer cáncer de pulmón	250 veces el riesgo de ahogamiento	Arregla tu casa	Aproximadamente 36 personas podrían contraer cáncer de pulmón	35 veces el riesgo de ahogamiento	Arregla tu casa
<b>10 pCi / L</b>	Alrededor de 150 personas podrían contraer cáncer de pulmón.	200 veces el riesgo de morir en un incendio en el hogar	Arregla tu casa	Alrededor de 18 personas podrían contraer cáncer de pulmón.	20 veces el riesgo de morir en un incendio en el hogar	Arregla tu casa
<b>8 pCi / L</b>	Alrededor de 120 personas podrían contraer cáncer de pulmón.	30 veces el riesgo de morir en una caída	Arregla tu casa	Aproximadamente 15 personas podrían contraer cáncer de pulmón	4 veces el riesgo de morir en una caída	Arregla tu casa
<b>4 pCi / L</b>	Cerca de 62 personas podrían contraer cáncer de pulmón	5 veces el riesgo de morir en un accidente automovilístico	Arregla tu casa	Aproximadamente 7 personas podrían contraer cáncer de pulmón	El riesgo de morir en un accidente automovilístico	Arregla tu casa
<b>2 pCi / L</b>	Cerca de 32 personas podrían contraer cáncer de pulmón	6 veces el riesgo de morir por veneno	Considere fijar entre 2 y 4 pCi / L	Aproximadamente 4 personas podrían contraer cáncer de pulmón	El riesgo de morir por veneno.	Considere fijar entre 2 y 4 pCi / L
<b>1.3 pCi / L</b>	Cerca de 20 personas podrían contraer cáncer de pulmón	(Nivel promedio de radón en interiores)	(Reducir los niveles de radón por debajo de 2 pCi / L es difícil).	Aproximadamente 2 personas podrían contraer cáncer de pulmón	(Nivel promedio de radón en interiores)	(Reducir los niveles de radón por debajo de 2 pCi / L es difícil).
<b>0.4 pCi / L</b>	Aproximadamente 3 personas podrían contraer cáncer de pulmón	(Nivel promedio de radón en interiores)		(Nivel promedio de radón en interiores)		

**Tabla 4: Riesgos del radón para fumadores y no fumadores (Adaptado de <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon>)**

Nota: (1) Si usted es un ex fumador, su riesgo puede ser menor.

(2) Si usted es un ex fumador, su riesgo puede ser mayor.



### 3.8.1 Rutas de exposición

Hay una serie de rutas por las cuales los radionúclidos pueden migrar o ser introducidos en contacto con humanos, incluyendo:

- infiltración de aguas superficiales;
- intrusión de aguas subterráneas;
- posterior migración de agua contaminada (lixiviados);
- intrusión involuntaria;
- escape de gas radiactivo.

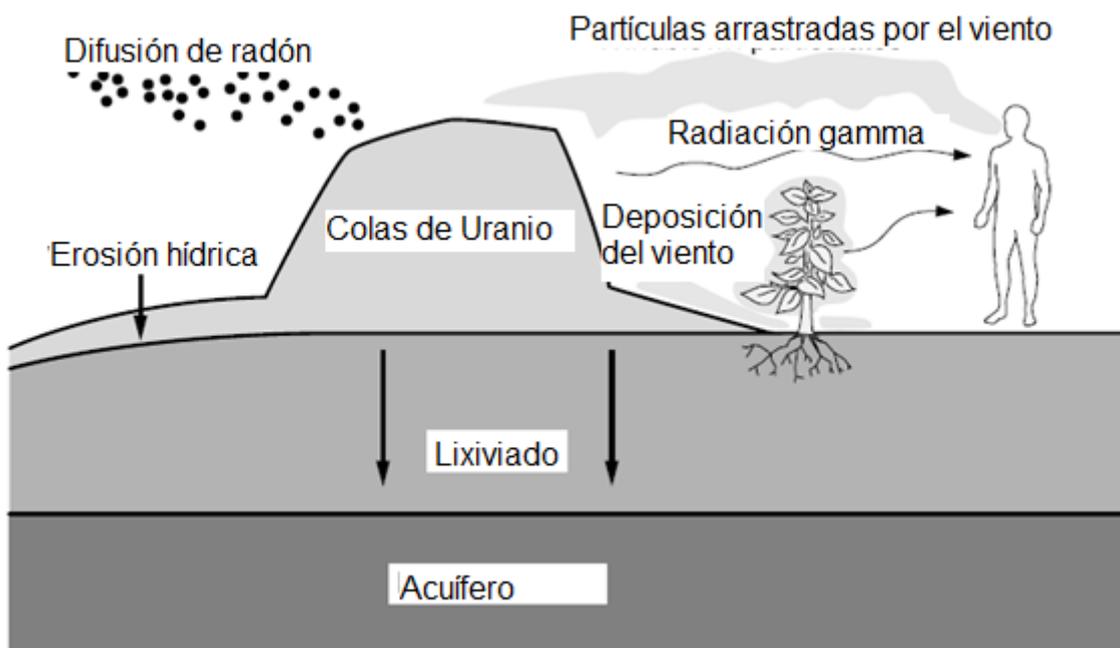


Figura 16: Vías de exposición potencial que se originan en pilas de relaves de uranio. (Eldon D. Enger, 1995)

Las dos rutas principales por las cuales se liberan radionúclidos al medio ambiente son la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas y la contaminación del aire. Se prevé que las vías de exposición más importantes para los recursos ecológicos se produzcan a través del agua superficial debido a su accesibilidad y los numerosos mecanismos de transporte potenciales para contaminantes disueltos y asociados a partículas

Una vez abandonados, los depósitos de colas de uranio sufren erosión, oxidación de sulfuros y lixiviación de metales pesados. Existe, por ejemplo, la posibilidad de que el radón 226 se pueda lixiviar de un almacenamiento de relaves de uranio, pero es probable que el impacto de dicha lixiviación sea significativo solo a escala localizada (por ejemplo, individuos o animales que beben el agua contaminada). Esta es una razón adicional por la cual los depósitos de desechos deben estar contenidos de forma segura. La contaminación del aire puede surgir por la emisión directa de radón a la

atmósfera o por la liberación de material particulado radiactivo (es decir, polvo). Otra vía para la exposición a la radiación es aquella en la que el viento levanta las partículas que contienen radionucleidos de la superficie de la pila de relaves y las transporta a favor del viento, con mezcla, dilución y deposición simultáneas, hasta que alcanzan a las personas dentro o fuera de los edificios

Los desechos radiactivos varían no sólo en cuanto a su contenido radiactivo y a la concentración de la actividad, sino también en lo que respecta a sus propiedades físicas y químicas. Los productos de descomposición del radón, particularmente el plomo 210 y el polonio 210, pueden depositarse en los cultivos y posteriormente ser ingeridos por el hombre o los animales.

El polvo generado por el viento puede provocar contaminación por: Inhalación directa, Contaminación de la vegetación y las superficies del suelo.

El radón migra a través del suelo principalmente por convección inducida por presión o temperatura y por difusión molecular en los poros llenos de aire y agua. La convección por agua en suelo no saturado es usualmente insignificante debido a la muy baja velocidad del flujo de agua. En relaves estabilizados,  $^{222}\text{Rn}$  y otros radionucleidos están confinados por un sistema de múltiples capas, el anteproyecto que se plantea en esta práctica, que evita la dispersión de la radioactividad. Para evitar la migración de radón y la acumulación de agua en los relaves, se coloca una capa especial de tierra arcillosa altamente compacta en los relaves. Los sistemas de cubierta están diseñados para durar 1000 años generalmente.

### **3.8.2. Vías de ingreso**

En el caso de la molienda y el manejo de desechos de uranio, pueden existir vías de exposición a los organismos vivos, incluidas las personas, para materiales químicos y radiológicos por inhalación, ingestión, absorción a través de la piel y exposición a la radiación gamma, que pueden viajar mucho más lejos que las partículas alfa o beta, y pueden penetrar en el cuerpo. La radiación gamma es diferente de los contaminantes químicos porque puede viajar más allá de la fuente y no es necesario el contacto directo para que ocurra la exposición.

. Las cinco vías radiológicas principales son, entonces: (1) Inhalación de radón y sus productos; (2) exposición directa a la radiación gamma emitida; (3) Inhalación e ingestión de partículas radiactivas en el aire; (4) ingestión de agua superficial o subterránea contaminada con materiales radiactivos; y (5) ingestión de alimentos contaminados producidos en áreas contaminadas por relaves.

Las barreras ingenieriles pueden usarse como obstrucciones físicas o químicas para prevenir o retrasar el movimiento (por ejemplo, la migración) de radionúclidos a través de estas vías.

Desde la perspectiva de la salud humana Las exposiciones de mayor importancia desde son las ocupacionales que ocurren dentro de las fábricas, principalmente involucrando inhalación. También pueden ocurrir en las comunidades circundantes si la contaminación se dispersa a través del aire, las aguas superficiales o las aguas subterráneas o escorrentía por lluvia.

En cuanto a los recursos ecológicos, se prevee que las exposiciones de mayor importancia sean a través del agua superficial debido a su accesibilidad y los numerosos mecanismos de transporte potenciales para contaminantes disueltos y asociados a partículas (por ejemplo, descarga de agua de proceso tratada en las corrientes; descarga de aguas subterráneas contaminadas a las corrientes) . Dichas aguas pueden contener productos químicos, metales y radionucleidos superiores a las condiciones de antes de la explotación.

Algunos subproductos radiactivos del radón-222 son retenidos en la región traqueo bronquial de los pulmones, irradiando los fluidos y tejidos y, por lo tanto, aumentando el riesgo de formación de cáncer allí. En cambio, las personas en el exterior que están expuestas a la misma concentración de radón-222 de una pila de relaves cercana pueden recibir una exposición a los pulmones de los productos de descomposición del radón que es apreciablemente menor (por ejemplo, un factor de 10). La inhalación de las partículas conduce a la exposición de varias maneras, pero se cree que la exposición principal es a la región pulmonar.

### **Liberación de U, Th, Ra, Rn y As**

La liberación de U, Th, Ra, Rn y As al medio ambiente está claramente relacionada con la estabilidad física de la instalación de eliminación de relaves, incluidas las cubiertas diseñadas, y la estabilidad química de las fases minerales que controlan las concentraciones elementales en la solución. Los oxihidróxidos de Fe son fases clave que controlan las concentraciones de radionúclidos y elementos peligrosos en solución. La principal preocupación en relaves de molienda desde un punto de vista geoquímico es la oxidación de sulfuros y la generación de aguas ácidas de poro. En aguas de pH bajo, se produce la desorción de radionucleidos y elementos peligrosos, lo que aumenta su concentración. La filtración de tales aguas ácidas, en particular de relaves de fábrica sin revestimiento, puede afectar el medio ambiente circundante, incluidos los suelos, las aguas superficiales y las aguas subterráneas. Por ejemplo, la acidez combinada con sales depositadas y metales pesados puede prevenir el crecimiento de las plantas. En la lixiviación del agua ácida de los relaves, el uranio disuelto y los productos secundarios pueden alcanzar niveles que son una amenaza directa para los ecosistemas cercanos. Recientemente, el esfuerzo se ha centrado en una mejor contención de la radiactividad por medio de estanques de drenaje y retención gestionados (Abdesselam Abdelouas, 2006, p.339)

### **3.9. IMPACTOS EN RECURSOS HÍDRICOS**

Se espera efectos significativos en las condiciones de las aguas superficiales tanto en el sitio como aguas abajo, afectando tanto la cantidad como la calidad por la presencia de sustancias radiactivas y sustancias químicas coexistentes como los metales pesados.

El drenaje ácido es la mayor preocupación en este aspecto. La oxidación de sulfuros, que son componentes comunes en los depósitos de mineral, genera aguas ácidas. La oxidación puede ocurrir en la parte superior de los relaves (Lottermoser y Ashley 2005), pero también en ciertos casos en la parte inferior debido a la infiltración de agua subterránea rica en oxígeno. La oxidación de sulfuro es catalizada por bacterias

autótrofas como *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*. Las aguas de pH bajo pueden disolver grandes cantidades de fases secundarias, incluidos los oxihidróxidos y carbonatos de Fe, que contienen radionucleidos y metales pesados. Además, ciertos radionucleidos y metales peligrosos se desorben en condiciones ácidas. (Abdesselam Abdelouas, 2006, p.340).

Los sitios de eliminación sin una contención efectiva de los relaves están muy extendidos. Además, la contaminación del agua subterránea con desechos de relaves puede ocurrir durante o después de las operaciones de molienda por lixiviación in situ. La restauración de los acuíferos lixiviados con ácidos ha demostrado ser difícil.

### **3.10. IMPACTOS SOBRE LA BIODIVERSIDAD**

El principal problema ambiental a largo plazo asociado con la extracción y la molienda de uranio es el aislamiento efectivo del entorno accesible de los radionucleidos de larga vida que migran fácilmente de los relaves de los molinos de uranio a los sistemas de soporte vital y las cadenas alimentarias y tienen una vida media o residencia biológica significativa

Las exposiciones ecológicamente significativas implican principalmente (1) derrames, lixiviación y escorrentía superficial que alcanzan arroyos y otros ambientes acuáticos; y (2) absorción de químicos disueltos por las raíces de las plantas. Para estas vías, los radionucleidos y productos químicos más importantes son aquellos que son solubles en agua o se adsorben en partículas que pueden ser suspendidas y transportadas por la escorrentía superficial y los flujos de corriente.

La radiación ionizante, específicamente, partículas  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  liberadas a través de la descomposición de los radionucleidos, causa efectos ecológicos a través del daño a los tejidos biológicos en los organismos expuestos.

Se sabe que las concentraciones de metales pesados disminuyen con la distancia y los efectos sobre la biodiversidad tienden a seguir el mismo patrón. Los impactos pueden variar mucho según la movilidad y la biodisponibilidad del contaminante: las moléculas menos móviles permanecerán inertes en el medio ambiente, mientras que las moléculas altamente móviles se moverán fácilmente a otro compartimento o serán absorbidas por organismos. La biomagnificación también juega un papel fundamental.

#### **3.10.1. Toxicidad del Uranio**

Sheppard y col. (2005) revisaron la literatura de toxicidad para uranio y obtuvieron las concentraciones previstas sin efecto (PNEC), que son concentraciones de uranio en el agua o el suelo por debajo de las cuales no se anticipa que ocurran efectos adversos en los organismos expuestos:

Plantas terrestres, 250 mg U / kg (suelo seco)

Otra biota del suelo, 100 mg U / kg (suelo seco)

Plantas de agua dulce, 0.005 mg U / L

Invertebrados de agua dulce, 0.005 mg U / L

Bentos de agua dulce, 100 mg U / kg (sedimento seco)

Peces de agua dulce en aguas muy blandas (dureza de <10 mg CaCO<sub>3</sub> / L), 0.4 mg U / L

Peces de agua dulce en aguas blandas (dureza de 10-100 mg CaCO<sub>3</sub> / L), 2.8 mg U / L

Pez de agua dulce en agua dura (dureza > 100 mg CaCO<sub>3</sub> / L), 26 mg U / L

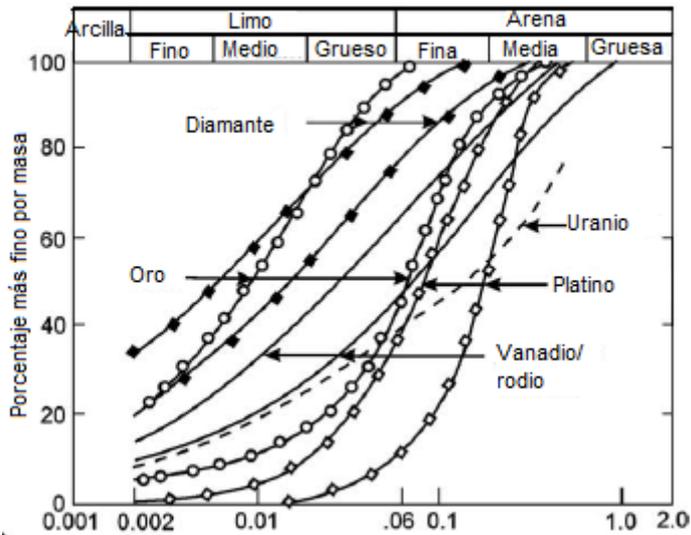
Algunos autores han sugerido que la toxicidad química del uranio suele ser más importante que la toxicidad radiológica, pero Mathews et al. (2009) descubrieron que este no es el caso para todos los escenarios de exposición evaluados. Mathews y col. (2009) recomendaron que las evaluaciones de riesgo ecológico para el uranio consideren tanto la toxicidad química como la toxicidad radiológica, incluida la radiactividad asociada con la descomposición de los productos secundarios de uranio. La toxicidad química de los productos secundarios de uranio no se ha considerado un problema importante

### **3.11. IMPACTOS EN LA CALIDAD DEL AIRE**

Los contaminantes químicos en el aire liberados al medio ambiente incluyen productos de combustión (óxidos de carbono, nitrógeno y azufre) de las calderas de vapor de proceso, vapores de ácido sulfúrico en pequeñas concentraciones de los tanques de lixiviación y reactivos orgánicos vaporizados del sistema de ventilación por extracción de solventes.

La capacidad del viento para recoger y transportar partículas depende del tamaño y la densidad de las partículas y de la velocidad del viento local. Es probable que el viento transporte solo pequeñas cantidades de partículas que contienen torio hasta que la velocidad del viento sea suficiente para transportar las de mayor tamaño. Las partículas se mezclan en la corriente de aire que pasa por las turbulencias locales y son arrastrados por el viento, lo que disminuye continuamente la concentración al mezclar y diluir. Este proceso de dispersión en el aire eventualmente entrega una concentración diluida de radionucleidos a las ubicaciones a favor del viento de las personas que pueden inhalarlos.

Una peculiaridad de las concentraciones de partículas reportadas en el aire cerca de las pilas de relaves de molino inactivas es que muchas muestran concentraciones de uranio comparables a las concentraciones de radio y torio, aunque las operaciones de molienda comúnmente eliminan más del 90 por ciento del uranio



**Figura 17: Análisis de tamaño de partícula para (a) relaves típicos de extracción mineral de varios minerales (Geoffrey Blight, 2009)**

Es poco probable que los átomos de radón ubicados dentro de los granos sólidos puedan liberarse a la atmósfera, debido a sus coeficientes de difusión muy bajos en sólidos. Sin embargo, si están ubicados en el espacio intersticial entre granos, pueden difundirse a la superficie. Por lo tanto, las emisiones de radón de un depósito de residuos a la atmósfera se realizan mediante la siguiente serie de procesos:

- (a) Emanación: los átomos de radón formados por la descomposición del radio escapan de los granos (principalmente debido al retroceso) hacia los intersticios entre los granos.
- (b) Transporte: la difusión y el flujo advectivo provocan el movimiento de los átomos de radón emanados a través del residuo o el perfil del suelo hacia la superficie del suelo.
- (c) Exhalación: átomos de radón que se han transportado a la superficie del suelo y luego exhalado a la atmósfera

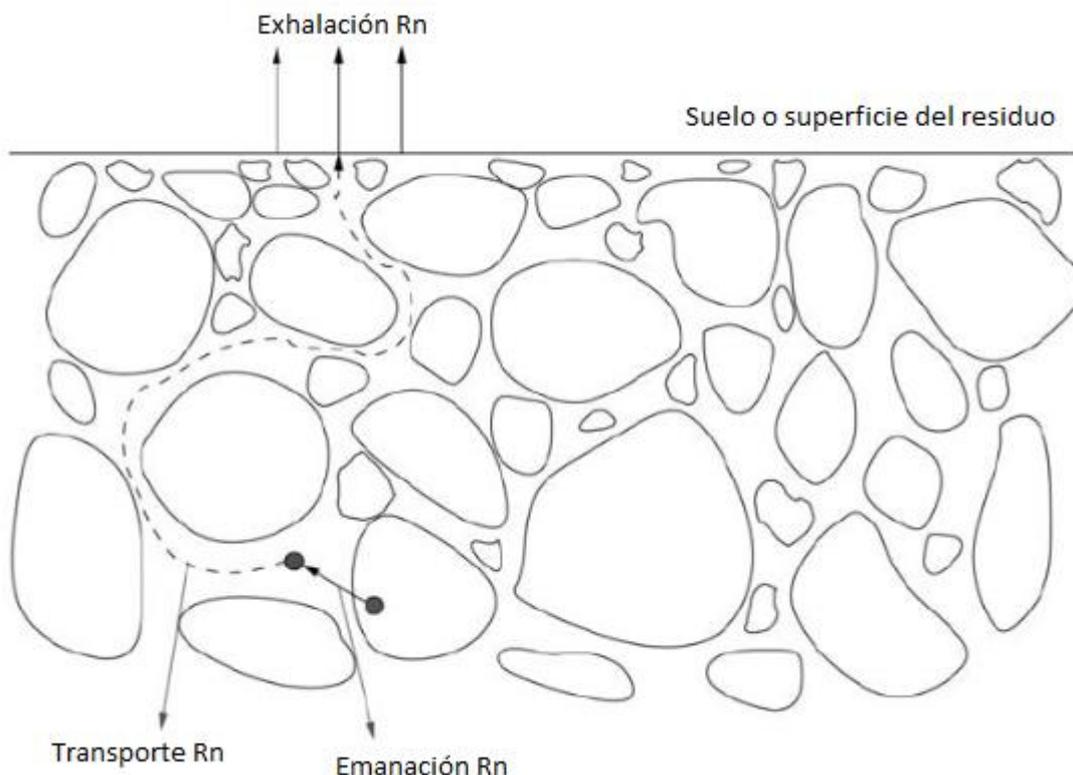


Figura 18: Procesos que conducen a la liberación de radón a la atmósfera. (IAEA, 2013)

### 3.12. CLASIFICACIÓN DE DESECHOS RADIATIVOS

Según el Sistema Internacional de Unidades, el nivel de radioactividad se mide con el Becquerel (Bq). Se define como la actividad de una cantidad de material radiactivo en el que un núcleo se desintegra por segundo, en otras palabras, es el número de desintegración por segundo: 1 Bq = 1 desintegración por segundo.

La clasificación de residuos peligrosos varía ampliamente a nivel internacional: una clasificación convencional de residuos radiactivos sigue siendo un desafío para la Comunidad Internacional y para el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Una clasificación general podría ser la siguiente ([www.word-nuclear.org](http://www.word-nuclear.org)):

- **Los desechos de bajo nivel (LLW)** "se generan en los hospitales y la industria, así como en el ciclo del combustible nuclear. No requiere protección durante la manipulación y el transporte y es adecuado para enterramientos en terrenos poco profundos. Para reducir su volumen, a menudo se compacta o incinera antes de su eliminación. Comprende aproximadamente el 90% del volumen, pero solo el 1% de la radioactividad de todos los desechos radiactivos".
- **Los desechos de nivel intermedio (ILW)** "contienen mayores cantidades de radioactividad y algunos requieren protección. Típicamente comprende resinas, lodos químicos y revestimientos metálicos de combustible, así como materiales contaminados por el desmantelamiento del reactor. Los artículos más pequeños y los no sólidos pueden solidificarse en concreto o betón para su eliminación. Representa alrededor del 7% del volumen y tiene el 4% de la radioactividad de todos los desechos radiactivos".

- **Los desechos de alto nivel (HLW)** “surgen de la 'quema' de combustible de uranio en un reactor nuclear. HLW contiene los productos de fisión y elementos transuránicos generados en el núcleo del reactor. Es altamente radiactivo y caliente, por lo que requiere enfriamiento y protección ”.

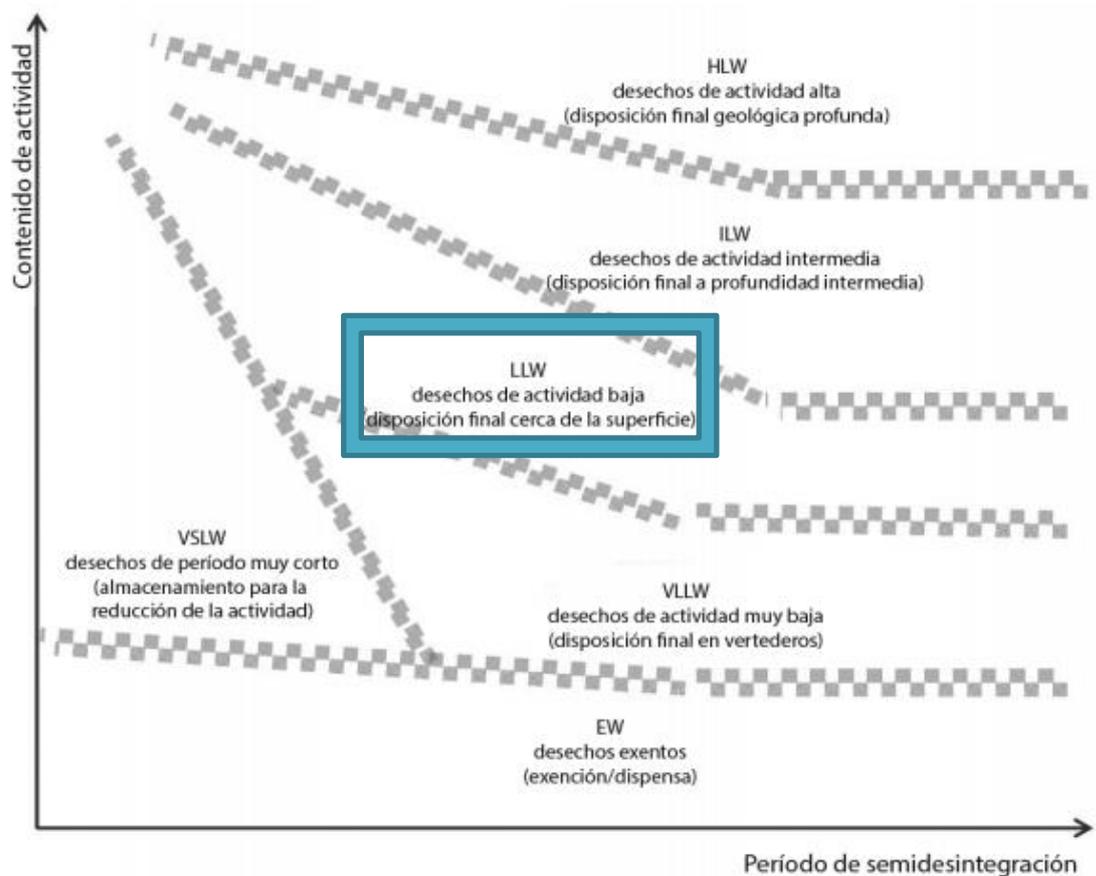


Figura 19: Sistema de clasificación de desechos (OIEA, 2009)

Como parte de su política ambiental la Comisión Nacional de Energía Atómica, a través del Proyecto de Restitución Ambiental de la Minería del Uranio, trabaja en la remediación ambiental de aquellos lugares donde se desarrollaron actividades de la minería del uranio, según lo dicta la Ley N° 25.018 de *Régimen de Gestión de Residuos Radiactivos* (1998), para garantizar la protección del ambiente y de las generaciones presentes y futuras.

## CAPÍTULO 4: REMEDIACIÓN IN SITU DE SUELOS CONTAMINADOS CON RESIDUOS RADIATIVOS

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Los suelos se suelen remediar para: reducir el riesgo potencial para la salud humana o el ecosistema, reducir una fuente de contaminación de las aguas subterráneas o, con menor frecuencia, para las aguas superficiales y para cumplir con las restricciones antes de su eliminación en un relleno sanitario.

La remediación de la contaminación del suelo se puede lograr mediante: la eliminación in situ de contaminantes del sitio contaminado para un tratamiento adicional fuera del sitio de los contaminantes eliminados; remoción ex-situ de contaminantes del suelo contaminado después de que el suelo haya sido excavado en el sitio contaminado; la contención in situ de los contaminantes con la toxicidad de los contaminantes inalterada, pero los contaminantes se aíslan de los contactos humanos durante un período de tiempo predeterminado; excavar el suelo contaminado y transportarlo a un sistema de contención diseñado para aislamiento a largo plazo; transformación in situ de los contaminantes para que la movilidad y/o la toxicidad de los contaminantes sean significativamente reducida para reducir el riesgo de contaminación del suelo para la salud pública y el medio ambiente; y combinación de los mecanismos anteriores

Las tecnologías de remediación sirven para inmovilizar a los contaminantes, separarlos del suelo o destruirlos. Se pueden dividir las técnicas para recuperar en un suelo contaminado en tres, en función del objetivo a alcanzar:

- **De contención:** mediante alguna barrera física aíslan el contaminante pero sin actuar sobre él.
- **De confinamiento:** evitan la migración de los contaminantes actuando sobre las condiciones fisicoquímicas de los mismos.
- **De descontaminación:** para disminuir la concentración de los contaminantes en el suelo.

### 4.2. TECNOLOGÍAS DE CONTENCIÓN

Las tecnologías de contención están diseñadas para aislar materiales contaminados con el fin de evitar la exposición a los humanos y al medio ambiente. Frecuentemente, la reducción de volumen u otras tecnologías de tratamiento se aplican a los desechos radiactivos antes de la contención. Independientemente de las tecnologías aplicadas, generalmente hay una parte del material radiactivo que requiere eliminación a largo plazo. Las excepciones incluyen radionucleidos con vidas medias relativamente cortas (por ejemplo, cobalto-60), en cuyo caso la contención por períodos de tiempo más cortos podría ser apropiada. Debido a que la mayoría de los radionucleidos requieren la eliminación a largo plazo, la remediación para sitios contaminados radiactivamente generalmente emplean tecnologías de contención. Algunas tecnologías de contención están diseñadas para evitar la migración horizontal de contaminantes, algunas para evitar la migración vertical y otras para evitar cualquier forma de migración. Para lograr el nivel de aislamiento necesario, frecuentemente se utilizan diferentes tecnologías de

contención en conjunto. Las siguientes tecnologías de contención utilizadas para aislar los desechos radiactivos que sean alizarán son: cubierta (contención en el lugar); encapsulación de terrenos (excavación y disposición, in situ o ex situ); y barreras verticales (contención in situ).

#### **4.2.1 Cubierta (Capping)**

Se trata de cubrir el medio contaminado con una cubierta con suficiente espesor e impermeabilidad para minimizar la migración de desechos a la superficie y controlar la contaminación arrastrada por el viento. También debe restringir la infiltración de agua superficial en el subsuelo contaminado para reducir la posibilidad de que los contaminantes se filtren desde el sitio. No evita la migración horizontal de contaminantes debido al flujo de agua subterránea, pero puede usarse en combinación con barreras verticales para constituir una estructura completa que pueda rodear por completo la pluma contaminante. Esto conforma un encapsulamiento que se detallará más adelante.

Los materiales de recubrimiento incluyen revestimientos de membrana sintéticos como geomembranas (por ejemplo, polietileno de alta densidad), asfalto, cemento y suelos naturales de baja permeabilidad como la arcilla. Los mismos se encuentran unos encima de otros conformando múltiples capas. A su vez, se puede aplicar una capa de vegetación de cobertura del suelo a la superficie de la cubierta para reducir la erosión. También suele ejecutarse una capa de drenaje debajo de la capa superior del suelo y encima de la geomembrana superior en áreas de mayor precipitación.

Estas deben estar diseñadas para confinar el radón gaseoso hasta que se haya descompuesto esencialmente. Si no se utilizan revestimientos de membrana sintética, la profundidad de cubierta requerida es 22 aproximadamente 150 cm (5 pies) para el radón-222 y 5 cm (2 pulgadas) para el radón-220. Además, se requieren aproximadamente 60 cm (2 pies) de cobertura del suelo para el blindaje contra la radiación gamma (EPA, 1988). Se debe considerar la durabilidad a largo plazo de los materiales de la cubierta para aislar efectivamente los desechos radiactivos. Por ejemplo, el polietileno de alta densidad es susceptible a la degradación de la luz solar, así como a la degradación química y biológica. Sin embargo, estos mecanismos de degradación generalmente se eliminan mediante el entierro de la membrana en sistemas de cobertura que tienen una profundidad de tres metros (10 pies), lo que aumenta la longevidad de la geomembrana (Frobel, 1997). Debido a que los medios contaminados no se eliminan ni se tratan, existe un riesgo residual de exposición a largo plazo debido a la alteración de la cubierta y la posible migración horizontal en el agua subterránea. Durante la construcción de la cubierta, las comunidades vecinas y los trabajadores del sitio pueden estar expuestos a emisiones fugitivas de polvo y gases. La limitación es una tecnología madura y conocida que es relativamente fácil de implementar (ORNL, 1993). Las evaluaciones de los sistemas de protección existentes han demostrado que la protección es un sistema de contención eficaz si se diseña e instala adecuadamente (EPA, 1998). Las condiciones específicas del sitio, como el clima, deben considerarse al determinar un diseño de cubierta apropiado. Son posibles muchas alternativas, dependiendo de la necesidad de controlar el agua en el sitio. Se han desarrollado programas de software como la evaluación hidrológica del

modelo de desempeño de los vertederos para ayudar a los administradores de sitios en el diseño y desempeño de barreras (EPA, 1994).

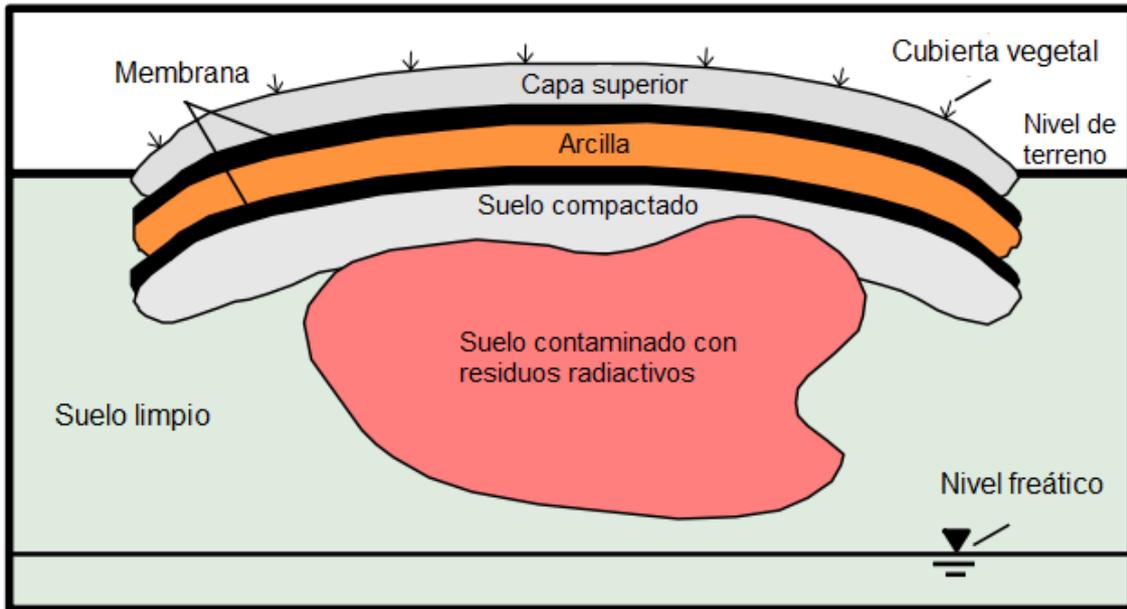


Figura 20: Cubierta (USEPA, 2009)

#### 4.2.2. Barreras verticales

Las barreras verticales se instalan rodeando la zona contaminada para confinar los desechos radiactivos y también la porción de agua subterránea que pudiera fluir desde esa región delimitada. También sirven para desviar el flujo de la parte que no ha sido contaminada, preservándolo de esa forma. Como se mencionó en la sección anterior, suelen usarse en combinación con las cubiertas para una contención total. También es común combinarlas con un sistema de bombeo, para invertir el gradiente de flujo, generando un flujo muy lento, que disminuye las deficiencias que pudieran presentarse en el diseño, la instalación o anomalías en el acuitardo. Para su efectividad, las barreras deben llegar hasta a una barrera horizontal impermeable para impedir el flujo del agua subterránea. Por ejemplo, una zona de arcilla

La tecnología a menudo se usa cuando la masa de desechos es demasiado grande para tratarla prácticamente y donde los componentes solubles y móviles representan una amenaza inminente para una fuente de agua potable.

Tipos de barreras verticales: Slurry Walls, Grouted Barrier Walls, Soil Mixing Walls, Sheet Pile Walls

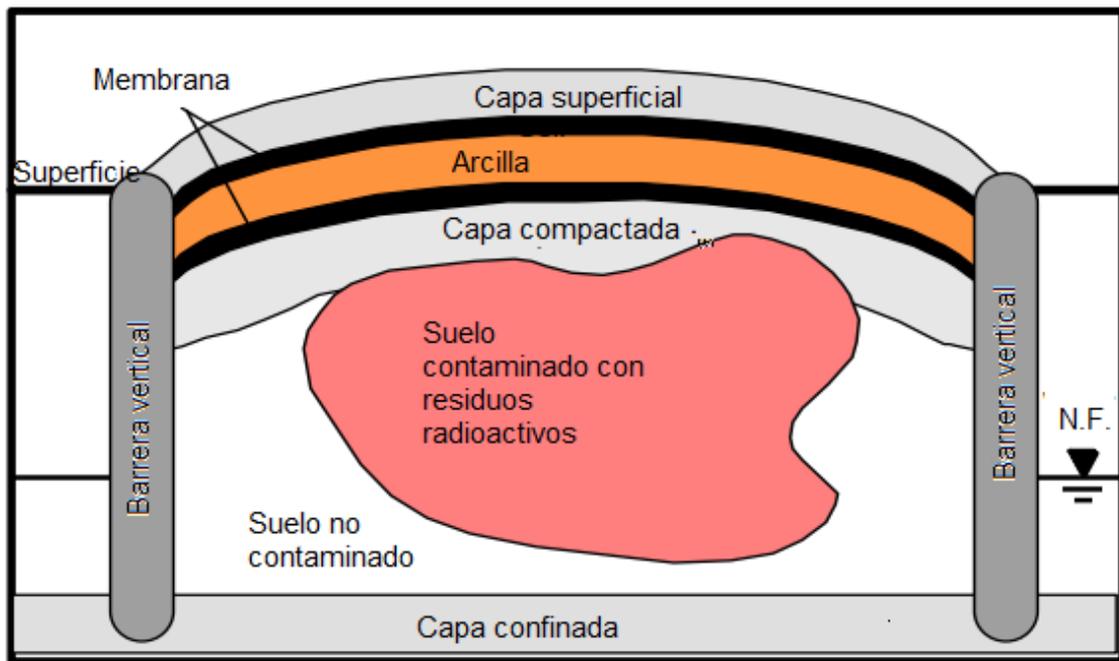


Figura 21: Barrera vertical (USEPA, 2009)

#### 4.2.3. Encapsulado

Se utilizan otras tecnologías para reducir el volumen de los residuos radiactivos, después de lo cual se utiliza la encapsulación de la tierra para eliminar eficazmente los residuos tratados. La encapsulación del terreno en el sitio implica excavar el área de disposición e instalar un revestimiento u otro material impermeable en el área excavada. Los desechos radiactivos que requieren eliminación se transportan y se vuelven a llenar en el área excavada y revestida y se aplica una cubierta (capping) adecuada. Como ya se anticipó, la combinación de un revestimiento debajo y en los laterales de los desechos más la cubierta forman un sistema completo de contención. Las barreras verticales son sólo aplicables cuando los residuos están necesariamente por encima del nivel freático (como los LNAPL). El diseño de la instalación minimiza el contacto del agua con los residuos encapsulados.

**Diseño:** Las pautas de diseño de las instalaciones desarrolladas por la Comisión de Regulación Nuclear y la EPA para instalaciones comerciales y mixtas de eliminación de desechos de bajo nivel incluyen dos o más revestimientos compuestos (por ejemplo, geomembrana superior y capa de suelo compactada) y un sistema de recolección de lixiviados ubicado arriba y entre los revestimientos.

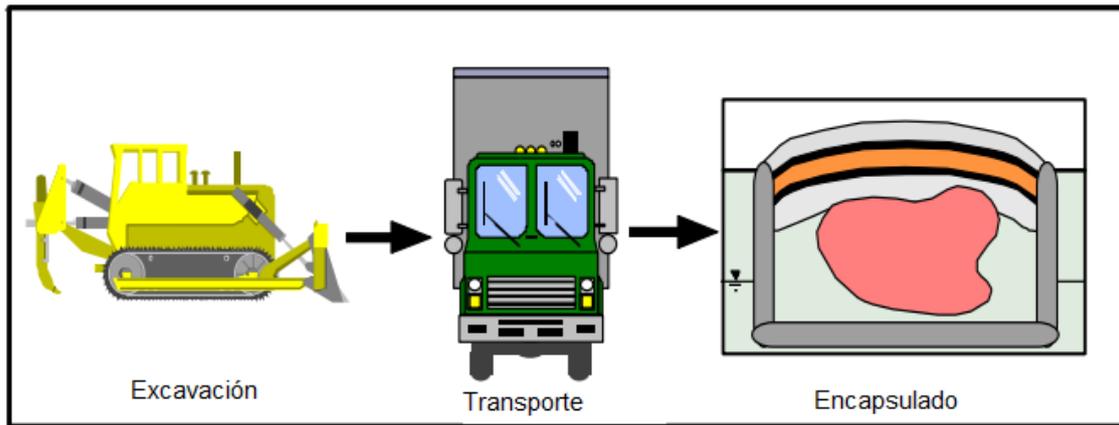


Figura 22: Encapsulado Ex Situ (USEPA, 2009)

#### 4.2.4. Comparación entre alternativas

### 4.3. SOLIDIFICACIÓN Y ESTABILIZACIÓN

Las tecnologías de solidificación y estabilización reducen la movilidad de residuos peligrosos y radiactivos en el medio ambiente a través de procesos físicos y químicos. La **estabilización** busca atrapar contaminantes dentro del medio en el que están insertos, es decir, dentro del suelo o materiales de construcción, al inducir reacciones químicas entre el agente estabilizante y los contaminantes, reduciendo así su movilidad. La **solidificación** encapsula los desechos en un sólido monolítico de alta integridad estructural. Esta, a diferencia de la estabilización, no implica interacción química o enlaces químicos entre los contaminantes y los agentes de solidificación. Se trata de un proceso mecánico.

Generalmente, ambas técnicas se emplean en conjunto, para limitar la propagación de material radiactivo y atrapar y contener radionucleidos dentro del sólido monolítico.

Estas técnicas, si bien no eliminan los contaminantes, no cambian o mejoran sus características físicas, ni disminuyen su radioactividad, sí reducen o suprimen su *movilidad*; reduciendo el área de superficie efectiva disponible para la difusión, o ambas

Se intenta transformar los residuos en una forma física duradera y adecuada que sea más compatible con el almacenamiento, el relleno o la reutilización. Por lo que La forma final de los desechos estabilizados / solidificados debe ser estable, compatible con el medio ambiente y, si es posible, de uso comercial.

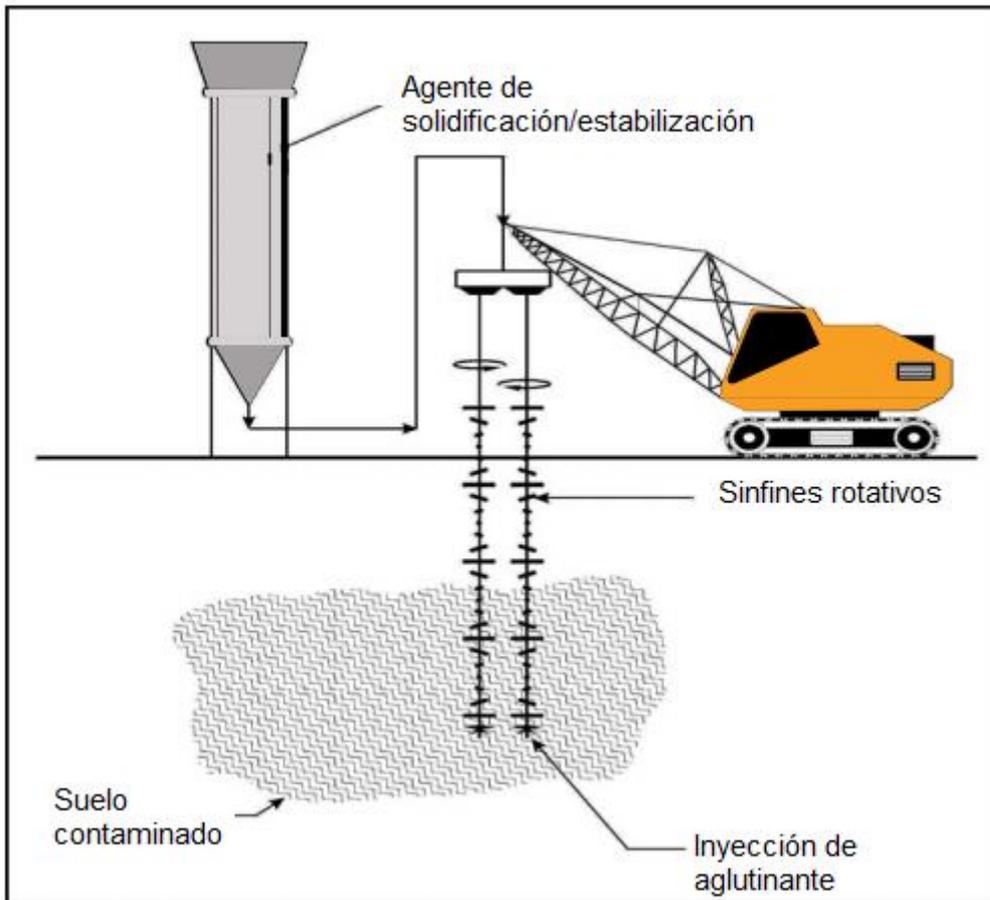


Figura 23: Solidificación y estabilización (USEPA, 2009)

#### 4.3.1. Cementación

Implican la adición de cemento o una mezcla a base de cemento que limita la solubilidad o movilidad de los constituyentes de los desechos. Lo que se trata es limitar la lixiviación del desecho radiactivo y atrapar y contener radionucleidos dentro de una masa densificada y endurecida de suelo. Esto se logra in situ inyectando un agente a base de cemento en los materiales contaminados. Una vez solidificados los residuos, se requiere un sistema de cobertura con suficiente espesor para absorber la radiación gamma, al enterrarlos.

Se realiza con fresado o sistemas de inyección de lechada para introducir los agentes cementantes. Con fresado el agente cementante se aplica a través de boquillas en la parte inferior de los sinfines a medida que giran. La inyección de lechada implica forzar el agente cementante en el suelo o en los desechos utilizando tuberías de inyección de lechada de alta presión conducidas al subsuelo

Varias características del suelo influyen en si la inyección de lechada in situ inmovilizará los desechos de manera efectiva. Estas características incluyen el volumen vacío, que determina la cantidad de lechada que se puede inyectar el sitio; tamaño de poro del suelo, que determina el tamaño de las partículas de cemento que pueden inyectarse; y permeabilidad de los materiales del subsuelo que rodean la masa tratada, lo que determina si el agua fluirá preferentemente alrededor de la masa solidificada (EPA, 1993b)

Los agentes de solidificación y estabilización incluyen cemento Portland, yeso y materiales a base de puzolánica, como cenizas volantes, escoria de alto horno, polvo de horno y piedra pómez (hidráulicos). Así, se puede mejorar la resistencia y durabilidad de la masa solidificada. A su vez, también eleva el pH de la mezcla con los desechos y puede ayudar a precipitar e inmovilizar algunos de los radionucleidos y otros contaminantes de metales.

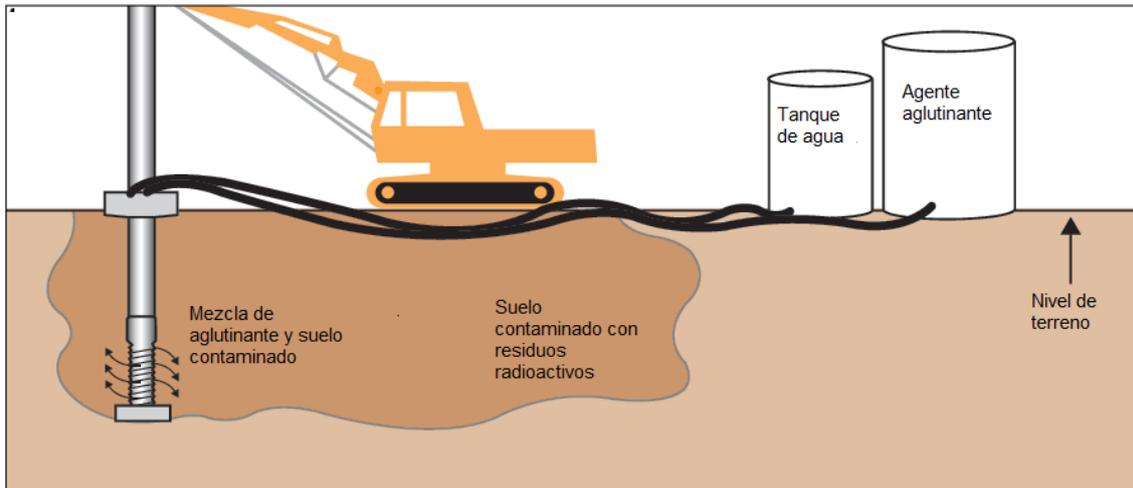


Figura 24: Solidificación/estabilización in situ de suelo contaminado (USEPA, 2009)

#### 4.3.2. Solidificación y estabilización química

Al igual que la solidificación / estabilización del cemento, el objetivo del proceso de solidificación / estabilización química es limitar la propagación del material radiactivo por lixiviación y atrapar y contener radionucleidos dentro de una masa de suelo densificada y endurecida. Los agentes químicos de solidificación / estabilización incluyen polímeros termoplásticos (betún asfáltico, parafina, polietileno, polipropileno, cemento de azufre modificado), polímeros termoendurecibles (monómeros de éster de vinilo, formaldehído de urea, polímeros epoxi) y otros aditivos patentados. Los polímeros termoplásticos son materiales que se funden repetidamente a un estado fluido cuando se calientan y luego se endurecen a un sólido cuando se enfrían. Los polímeros termoendurecibles se forman a partir de la combinación de varios ingredientes líquidos que polimerizan y se endurecen en un sólido y que no pueden revertirse a un estado fluido sin destruir las características originales. Antes de mezclar los desechos con el polímero, los desechos tendrían que secarse. Las resinas termoendurecibles generalmente tienen bajas viscosidades que las hacen fácilmente adaptables para la solidificación in situ (EPA, 1997a). Al igual que las aplicaciones de solidificación / estabilización a base de cemento, los métodos a base de químicos pueden aumentar el volumen de la masa solidificada / estabilizada resultante, aunque son eficiente en el llenado de espacios vacíos, generando un diferencial de volumen menor al de la cementación.

#### 4.4. VITRIFICACIÓN

La vitrificación implica calentar los medios contaminados a temperaturas extremadamente altas, luego enfriarlos para formar una masa sólida. Al enfriarse,

queda una masa densa de vidrio, atrapando contaminantes radiactivos. El proceso puede aplicarse a suelos contaminados, lodos, sedimentos, relaves, desechos enterrados y combustibles metálicos. Se pueden ejecutar por plasma o con hornos de arco eléctrico. Se podría requerir un sistema de descarga de gas para las emisiones durante la vitrificación porque es probable que algunos contaminantes orgánicos se destruyan y algunos inorgánicos, incluidos los radionucleidos de bajo punto de fusión, se volatilicen por las altas temperaturas. La *EPA ha designado la vitrificación como la mejor tecnología disponible demostrada para residuos radiactivos de alta actividad.*

La vitrificación in situ utiliza una corriente eléctrica para derretir el suelo u otros medios a temperaturas extremadamente altas (1,600 a 2,000 ° C). Los radionúclidos y otros contaminantes se inmovilizan dentro de la masa vitrificada, en un material duradero y químicamente estable, resistente a la lixiviación, similar a la obsidiana o la roca basáltica. La vitrificación in situ volatiliza y destruye la mayoría de los contaminantes orgánicos por pirólisis, descomponiendo los orgánicos en sus componentes elementales. Por lo general, se coloca una campana de vacío sobre el área tratada para recoger los gases de escape. Debido a la alta temperatura de la masa fundida, no queda contaminación orgánica residual en el monolito de vidrio. Al enfriar hay una reducción de volumen neto del material tratado.

La vitrificación in situ tradicional utiliza una matriz cuadrada de cuatro electrodos de grafito que permite un ancho de fusión de aproximadamente 6,1 a 12,2 m y una profundidad de tratamiento potencial de hasta 6,1 m. Se pueden usar múltiples configuraciones, para remediar un área contaminada más grande. La energía eléctrica se suministra a los electrodos a través de conductores flexibles. Inicialmente, los electrodos se insertan de 0.3 a 1.2 m debajo de la superficie del suelo, y se coloca un conductor entre ellos. Se aplica un potencial eléctrico a los electrodos para establecer una corriente eléctrica y hace que el suelo circundante se funda. Una vez que el suelo se funde, también *se vuelve eléctricamente conductor*. A medida que se aplica la potencia, la fusión continúa hacia abajo y hacia afuera a una velocidad promedio de 2.5 a 5.1 cm por hora. La matriz de electrodos se baja progresivamente, a medida que crece la masa fundida, hasta la profundidad de tratamiento deseada. Cuando se completa, la masa de una sola masa fundida puede superar las 1000 toneladas (EPA, 1994a; EPA, 1995a).

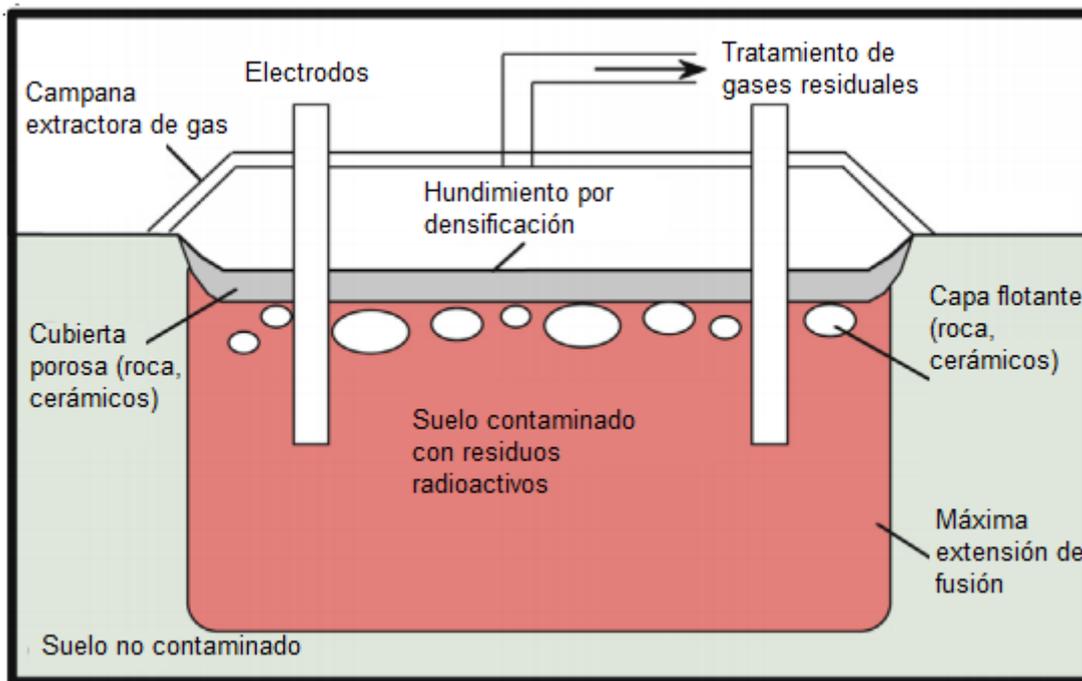


Figura 25: Vitrificación in situ de suelo contaminado (USEPA, 2009)

#### 4.5. COMPARACIÓN ENTRE ALTERNATIVAS

Se comparan las tecnologías propuestas haciendo hincapié en las características relevantes para realizar evaluaciones de criterios y comparaciones con las otras, descripciones de procedimientos operativos, resultados de procesos, grupos de contaminantes que cada una trata, características del sitio que puede afectar la viabilidad o implementación de ellas, residuos que se pueden generar durante y después del proceso, eficiencias de remoción, emisiones potenciales al aire, confiabilidad de tecnología, tiempos de proceso, medios aplicables, pretratamiento o requisitos del sitio, instalación, efectividad de la tecnología para eliminar, contener o estabilizar radionucleidos en los medios tratados, etc.

#### Tecnologías de contención:

Aspectos de su aplicabilidad	Cubierta multicapa	Encapsulado	Barreras verticales
<b>Contaminantes</b>	Aplicable para todas las clases de desecho radioactivo	Aplicable a residuos radiactivos de bajo nivel, mixtos y comerciales.	Aplicable a residuos radiactivos de bajo nivel, mixtos y comerciales.
<b>Emisiones</b>	Potencial de emisiones de polvo y gas durante su construcción. El polvo puede	Potencial de emisiones de gas y polvo de la construcción de la instalación del	Potencial de emisiones durante la excavación de zanjas de lodos y equipos de mezcla.

	<p>controlarse con encapsulado.</p> <p>medidas como la nebulización o la pulverización de superficies secas.</p> <p>Pueden requerirse sistemas de recolección y tratamiento de gas radón si se acumulan una vez instalada la cubierta.</p>		
<b>Características del sitio</b>	Suelo, relaves mineros, sedimentos, residuos	Suelo, relaves de vertederos, sedimentos, residuos	Suelo, sedimentos, lixiviados, residuos a granel y aguas subterráneas.
<b>Confiabilidad</b>	Con una inspección y mantenimiento adecuados, la vida efectiva de un sistema de cubierta puede ser de más de 30 años. Confiable si se hace el mantenimiento adecuado y no se ve afectado por otras actividades disruptivas en el sitio.	Muy seguro durante 100 a 1000 años (EPA, 1990). Con procedimientos de diseño y mitigación se puede mejorar la confiabilidad.	Fiable en la implementación, sin embargo, las barreras verticales pueden deteriorarse con el tiempo. La eficacia de las barreras verticales se puede mejorar mediante el uso de materiales tales como membranas de HDPE y lechadas de polímeros, que tienen una mayor resistencia química y una menor conductividad hidráulica.
<b>Tiempo</b>	Los objetivos se cumplen tan pronto como se construye la cubierta	Tiempo dedicado a la excavación y transporte del material y de construcción.	el tiempo depende del grosor, la longitud y la profundidad de la pared de barrera. Generalmente varía de 1 a 2 meses.
<b>Medios de aplicación</b>	Suelo, relaves, sedimentos, desechos	Suelo, lixiviados de vertederos, sedimentos, residuos a granel	Suelo, sedimentos, lixiviados, residuos a granel y aguas subterráneas.

<b>Pretratamiento y requerimientos del sitio</b>	<p>Es posible que los desechos deban consolidarse antes de su construcción.</p> <p>Los mismos deben estar completamente por encima del nivel freático.</p>	<p>Los desechos primero deben excavarse antes de ser transportados a una instalación de encapsulación fuera del sitio o deben excavarse y almacenarse de forma segura mientras se construye una instalación in situ.</p>	<p>Conocimiento detallado de las características del suelo y la geología del sitio, incluida la posible actividad tectónica. Caracterización de desechos y lixiviados del sitio; Pruebas de compatibilidad de material de barrera</p>
<b>Requerimientos de instalación</b>	<p>La barrera de arcilla y las otras capas de suelo deben compactarse a densidades apropiadas para funcionar correctamente. Las geomembranas necesitan una instalación adecuada y deben ser soldadas continuamente. Se debe ejecutar un programa para disminuir las necesidades de reparaciones.</p>	<p>Para la encapsulación ex situ, generalmente depende de las instalaciones de disposición autorizadas.</p>	<p>El equipo que se necesita es de grandes retroexcavadoras, excavadoras de cubierta o equipos de perforación de varios ejes para la excavación de zanjas; niveladoras para la colocación de relleno; mezcladores por lotes, estanques de hidratación, bombas y mangueras para preparación de lechada (EPA, 1992).</p>
<b>Condiciones post-tratamiento</b>	<p>Se necesitan inspecciones periódicas para verificar erosión, hundimiento de la superficie. Deben instalarse pozos de monitoreo.</p>	<p>Se aplican los procedimientos de cumplimiento normativo (monitoreo y mitigación)</p>	<p>Procedimientos de cumplimiento normativo (monitoreo y mitigación). Controles institucionales (escrita, acceso al sitio y restricciones de uso de la tierra)</p>

<b>Facilidad de monitoreo</b>	Las emisiones de gas radón del subsuelo, la integridad de la cubierta y los efectos de la contaminación en las aguas subterráneas pueden monitorearse fácilmente.	Se puede monitorear mediante sistemas de recolección de lixiviados y pozos de monitoreo de aguas subterráneas.	Mediciones del nivel de contaminación y oscilación del nivel freático dentro y fuera de la barrera vertical para controlar la integridad. También pueden colocarse sensores dentro y adyacentes a las barreras para detectar cambios significativos en el contenido de humedad.
<b>Costo (dólares)</b>	<p>RCRA Subtítulo C \$131.72 / yd2</p> <p>RCRA Subtítulo D \$42.98 / yd2</p> <p>Cubierta de revestimiento de arcilla geosintética \$75.24 / yd2</p> <p>Cubierta de barrera capilar \$77.56 / yd2</p> <p>Cubierta de barrera anisotrópica \$62.92 / yd2</p> <p>Cubierta de evapotranspiración \$61.78 / yd2</p>	\$131/m3	En 1991, el costo varió de \$ 5 a \$ 7 / pie 2 , sin embargo, estos costos no incluyen el costo necesario para análisis químicos, factibilidad o pruebas de compatibilidad. Por lo tanto, el costo varía según las condiciones del sitio, el tipo de lodo / relleno, la profundidad, entre otros.

Tecnologías de Solidificación y Estabilización:

<b>Aspectos de su aplicabilidad</b>	<b>Vitrificación</b>	<b>Solidificación y estabilización química</b>	<b>y Cementación</b>
<b>Contaminantes</b>	La vitrificación in situ podría aplicarse a una amplia gama de compuestos orgánicos e inorgánicos, incluidos los	Aplicable para todo tipo de residuos radiactivos. Implementado adecuadamente, la solidificación /	Aplicable para todas las clases de desecho radioactivo. Implementado

contaminantes radiactivos. La vitrificación reduce el volumen y la movilidad de los materiales contaminados, pero no afecta su radiactividad. La vitrificación in situ generalmente no debe usarse en residuos o suelos contaminados con contenidos orgánicos superiores al 10 por ciento en peso o en materiales altamente reactivos (EPA, 1997a). Sin embargo, la vitrificación in situ planar desarrollada más recientemente debería tolerar contenidos orgánicos mucho más altos (GeoMelt, 2005). Los desechos mixtos que contienen compuestos halogenados no son buenos candidatos para la vitrificación porque el producto de vidrio resultante es poroso y menos duradero (ACOE, 1997). La mayoría de los metales se capturan en la masa fundida y no se volatilizan significativamente. La excepción es el mercurio, que está esencialmente completamente volatilizado. El plomo y el cadmio también se volatilizan en alto grado durante la vitrificación in situ. Por lo tanto, desechos mezclados con altos niveles de mercurio, plomo y / o el cadmio generalmente no son buenos candidatos

estabilización química puede aplicarse a muchos contaminantes, incluyendo todas las clases de desechos radiactivos, inorgánicos, metales pesados y desechos mixtos

adecuadamente, la solidificación / estabilización del cemento puede aplicarse a muchos contaminantes, incluidos

Todas las clases de residuos radiactivos, inorgánicos, metales pesados y residuos mixtos. Esta tecnología,

sin embargo, podría tener una efectividad limitada contra contaminantes orgánicos (FRTR, 2002a).

En general, la solidificación / estabilización de cemento in situ puede considerarse en cualquier sitio desde el cual

Los desechos radiactivos no se pueden eliminar. La lechada a base de cemento Portland tipo I se usa comúnmente para

solidifica los desechos más peligrosos, mientras que se usan lechadas a base de cemento Portland Tipo II y Tipo V

para residuos que contienen sulfatos o sulfitos (ACOE, 1997).

	para la vitrificación (EPA, 1992).		
<b>Emisiones</b>	<p>Los radionucleidos volátiles (cesio 137, estroncio 90, tritio y otros) pueden liberarse durante vitrificación y debe ser capturado por un sistema de descarga de gas. Residuos de este sistema de descarga de gas, incluidos</p> <p>La solución de lavado y los filtros usados deberán tratarse y / o eliminarse. requiere un sistema de recolección de emisiones al aire debido a contaminantes volatilizados. El cesio 137, Sr 90, tritio y otros radionucleidos pueden volatilizarse bajo ciertas condiciones. también se pueden producir gases combustibles en algunos casos, si no se caracteriza adecuadamente los compuestos orgánicos, pudiendo exceder la capacidad del sistema de descarga.</p>	<p>Se puede generar polvo durante el proceso, y se deben usar sistemas de recolección o supresión de polvo. Si hay compuestos orgánicos volátiles, el proceso de mezcla puede generar emisiones a la atmósfera, y pueden ser necesarios sistemas de captura y tratamiento de gases residuales. Si los iones de amonio están presentes en los desechos, las reacciones con cemento químico pueden producir gas amoniaco (ACOE, 1997). Para el cemento de azufre, las emisiones limitadas de dióxido de azufre y sulfuro de hidrógeno generalmente estarán por debajo de los valores umbral permitidos (FRTR, 2002a).</p>	<p>Se puede generar polvo durante el proceso, y se deben usar sistemas de recolección o supresión de polvo. Si hay compuestos orgánicos volátiles presentes, el proceso de mezcla puede generar emisiones a la atmósfera y podrían ser necesarios sistemas de captura y tratamiento de gases residuales. Si los iones de amonio están presentes en los desechos, las reacciones con cemento producirán gas de amoniaco (ACOE, 1997).</p>
<b>Características del sitio</b>	<p>El alto contenido de humedad y sal en el suelo puede aumentar las necesidades eléctricas y el costo. El tratamiento de vitrificación in situ en suelos o desechos con</p>	<p>puede usarse en una variedad de entornos físicos, es más adecuado para suelos de grano fino con poros pequeños. Se requiere un sitio que pueda soportar físicamente y proporcionar una</p>	<p>La solidificación / estabilización del cemento podría considerarse para una variedad de situaciones, pero es la más adecuada para Residuos radiactivos</p>

un contenido de humedad de más del 25 por ciento podría no ser rentable y podría ser necesario realizar el desagüe antes del tratamiento (EPA, 1992). Para inmovilizar eficazmente los radionucleidos y los metales pesados, los suelos deben tener más del 30 por ciento de materiales formadores de vidrio (SiO<sub>2</sub>) (EPA, 1997b). Aunque la vitrificación in situ ha procesado con éxito suelos con concentraciones de metales elementales de hasta el 37 por ciento, grandes cantidades de metal pueden ser un problema debido al cortocircuito (EPA, 1997a). Los suelos y desechos que contienen más del 55 por ciento de desechos inorgánicos y / o escombros son difíciles de tratar con vitrificación in situ (EPA, 1997c)

cantidad suficiente de área para la construcción y operación del equipo pesado requerido para la excavación o inyección in situ y mezcla. Varias características del suelo influyen en si la inyección de lechada química in situ inmovilizará los desechos

efectivamente. Estas características incluyen el volumen vacío, que determina la cantidad de lechada puede ser

inyectado en el sitio; tamaño de poro del suelo, que determina el tamaño de las partículas de cemento químico que

puede ser inyectado y permeabilidad de los materiales subsuperficiales que rodean la masa tratada, que

determina si el agua fluirá preferentemente alrededor de la masa solidificada (EPA, 1993b).

El método in situ podría no ser adecuado para sitios residenciales porque la radiación gamma podría no ser suficientemente reducida. El método in situ también podría no ser adecuado si las masas de desechos

de bajo nivel, altamente porosos, de grano grueso, en matrices permeables. Esta tecnología

podría no ser aplicable en sitios con altas concentraciones de algunos contaminantes que podrían interferir con la fijación de los agentes cementantes y con la durabilidad de la masa solidificada final. Estas incluyen muchos compuestos orgánicos volátiles, compuestos orgánicos semivolátiles y algunos compuestos inorgánicos químicos como ácidos inorgánicos y sales de sodio y sulfuro (EPA, 1993a; ACOE, 1997).

Los compuestos orgánicos volátiles y otros compuestos orgánicos que están presentes en los desechos son

generalmente no está inmovilizado y puede continuar migrando desde la masa de desechos solidificados / estabilizados

(NAVFAC, 2004b; FRTR, 2002a). El clima y la estación también deben tenerse en cuenta al evaluar el uso de esta tecnología ya

	<p>son delgadas, discontinuas y / o en la superficie o cerca de ella.</p> <p>También se debe considerar cualquier residuo enterrado como barriles, chatarra, madera y rocas que pueden interferir con el proceso de perforación y / o solidificación.</p>	<p>que las reacciones de hidratación del cemento durante la colocación y el curado.</p> <p>El uso de la solidificación / estabilización requiere un sitio que pueda soportar físicamente y proporcionar un Cantidad suficiente de área para la construcción y operación del equipo pesado requerido para excavación o inyección in situ y mezcla (EPA, 1993a). Debido al aumento de volumen asociado con esta tecnología, el uso de solidificación / estabilización a base de cemento en sitios con grandes volúmenes de desechos que requieren tratamiento podrían ser menos rentables que otros tratamientos (OIEA, 1999).</p>
<p><b>Eficiencias de destrucción y remoción</b></p>	<p>Este proceso reduce el volumen y la movilidad de los contaminantes pero no afecta su radiactividad.</p> <p>Resultados de los procedimientos de lixiviación, incluidos TCLP y el Prueba de consistencia del producto, muestra que</p>	<p>los efectos a largo plazo de la meteorización, la infiltración de aguas subterráneas y las perturbaciones físicas no se pueden predecir con precisión. Los procesos de mezcla de suelos e inyección de lechada</p>

	<p>la vitrificación reduce la movilización de contaminantes significativamente (Coel-Roback, et al., 2003; ORNL, 1997). La eficiencia de retención de radionucleidos dentro de la masa vitrificada es superior al 99% (EPA, 1993; OIEA, 1999).</p>	<p>solidificantes.</p>	<p>han demostrado la capacidad de reducir la movilidad de los desechos contaminados en más del 95 por ciento. Los efectos, a largo plazo, de la intemperie, la infiltración de aguas subterráneas y las perturbaciones físicas asociadas con el uso futuro descontrolado de la tierra pueden afectar significativamente la integridad de la masa estabilizada y la movilidad contaminante de formas que no pueden predecirse mediante pruebas de laboratorio (FRTR, 2002b).</p>
<p><b>Confiabilidad</b></p>	<p>Los materiales radiactivos permanecen inmobilizados en la masa de materiales vitrificados / contaminados, evitando la migración de estos contaminantes. El modelado termodinámico predice que el vidrio vitrificado podría inmobilizar contaminantes durante 1000 a 1 millón de años (EPA, 1993).</p>	<p>La fiabilidad a largo plazo de la mayoría de los agentes estabilizadores químicos aún no se ha determinado por completo. El betún es insoluble en agua y los desechos solidificados resultantes tienen menos potencial de lixiviación que los producidos por el tratamiento a base de cemento; sin embargo, el betún puede dañarse por la radiación.</p>	<p>La técnica de mezcla de suelo poco profunda (profundidad inferior a 40 pies (12 m)) para aplicaciones in situ procesa 40 - 80 toneladas por hora en promedio, y la técnica de mezcla de suelo profundo promedia 20 - 50 toneladas por hora (FRTR, 2002b). Las duraciones de los tratamientos in situ generalmente varían de 3 a 6 meses (NAVFAC, 2004a).</p>

<b>Tiempo</b>	Velocidad de fusión de cuatro a seis toneladas por hora con un tiempo de fusión de 10 días. El tiempo para mover la campana y conectar los electrodos en una nueva configuración es de aproximadamente dos días.	Para profundidades de menos de 12 m procesa 40 - 80 toneladas por hora.	La técnica de mezclado de suelos poco profundos (profundidad de menos de 12 m) para aplicaciones in situ procesa 40 - 80 toneladas por hora en promedio, y la técnica de mezclado de suelos profundos promedia 20 - 50 toneladas por hora (FRTR, 2002b).
<b>Medios de aplicación</b>	Suelo, lodos, sedimentos, relaves mineros, algunos desechos enterrados, incinerador de cenizas	Suelos, sedimentos, lodos, residuos	Para diseñar una mezcla óptima de agentes cementantes, se necesita entender las características del suelo y de los desechos tanto para el tratamiento ex situ como in situ. Cualquier residuo y material de gran tamaño debe separarse de los desechos antes del procesamiento.
<b>Pretratamiento y requerimientos del sitio</b>	Requiere un sistema de distribución eléctrica en el sitio. No se requiere excavación, pero se deben evaluar los parámetros del suelo. Se necesita caracterizar las características del subsuelo, los desechos, los contenedores y las interferencias. También se requiere la construcción de un	Una caracterización exhaustiva de los residuos, incluidos los tipos y concentraciones de contaminantes, componentes químicos, humedad. el contenido y el tamaño de partícula son necesarios para permitir la selección adecuada de un sistema de estabilización / solidificación de polímeros. La prueba también	El sitio debe estar preparado para la instalación de equipos de proceso, tanques, áreas de almacenamiento y áreas de descontaminación. El proceso de tratamiento necesita ser monitoreado para la mezcla completa de agentes cementantes y desechos y para cambios en las

	<p>sistema de recolección y tratamiento de gases residuales.</p>	<p>debe realizarse para evaluar la efectividad de la mezcla química con el contaminante.</p>	<p>características de los desechos (EPA, 1997a). Los residuos solidificados deben permanecer por encima del nivel freático. La terminación debe incluir una barrera superior para controlar la escorrentía.</p>
<p><b>Requerimientos de instalación</b></p>	<p>Se requiere un sistema de distribución eléctrica, un sistema de tratamiento de gases residuales y un sistema de control de procesos para la implementación.</p>	<p>por hora (FRTR, 2002b). Las duraciones de los tratamientos in situ generalmente varían de 3 a 6 meses (NAVFAC, 2004a).</p>	<p>El sitio debe estar preparado para la configuración del equipo de proceso, tanques, áreas de almacenamiento y áreas de descontaminación. El proceso de tratamiento necesita ser monitoreado de cerca para la mezcla completa de agentes cementantes y desechos</p>
<p><b>Condiciones post-tratamiento</b></p>	<p>El hundimiento ocurre debido a la reducción de volumen del 25% al 50% (GeoMelt, 2005). El área disminuida podría necesitar un relleno para restaurar el grado original del área de tratamiento.</p>	<p>Suelos, sedimentos, lodos, basuras</p>	<p>Se necesitan controles en la ingeniería e institucionales.</p>
<p><b>Facilidad de monitoreo</b></p>	<p>El muestreo de agua subterránea alrededor del perímetro de la masa vitrificada puede evaluar la movilidad de los radionúclidos. Las concentraciones de radionucleidos volátiles se pueden</p>	<p>Es necesaria una caracterización exhaustiva de los residuos, incluidos los tipos y concentraciones de contaminantes, constituyentes químicos, contenido</p>	<p>El rendimiento del sistema se mide. por la cantidad de componentes que se pueden lixiviar del material estabilizado. Caracterización de</p>

	<p>controlar durante el proceso de vitrificación. Los niveles de radiación se pueden controlar en el sitio después de la vitrificación.</p>	<p>de humedad y tamaño de partícula. También se deben realizar pruebas para evaluar la efectividad de la mezcla química con el contaminante.</p>	<p>lixiviabilidad para toxicidad</p> <p>los metales se miden con el TCLP (EPA, 1997b). Para residuos radiactivos, la capacidad de lixiviación es medida por el estadounidense</p> <p>National Standards Institute / American Nuclear Society Standard</p>
<b>Costo (dólares)</b>	<p>E tratamiento del suelo contaminado con radionúclidos generalmente oscila entre \$ 300 y \$ 650 por tonelada. Para mixto</p> <p>Residuos, los costos de tratamiento generalmente varían de \$ 520 a \$ 770 por tonelada (FRTR, 2002; ACOE, 1997; LANL, 1996).</p>	\$52 a \$78 por m3.	\$53 a \$78 por m3.

#### 4.6. METODOLOGÍA ADOPTADA. ALTERNATIVA 1. ENCAPSULAMIENTO.

Los rellenos se construyen para contener desechos recién generados o para convertir las unidades de gestión de desechos existentes en una instalación de eliminación permanente. Como en nuestro caso, el residuo corresponde a un tipo de residuo peligroso, se ejecutará un relleno de seguridad o especial. Los rellenos se construyen utilizando revestimientos y cubiertas para minimizar la exposición del contenido del relleno al medio ambiente.

El diseño del depósito de seguridad no es tan diferente del Relleno sanitario, básicamente las diferencias están en el sistema de drenajes y número de capas de geomembranas aplicadas de grosor regulado( 0.76-1,53 mm) y soldadas con termo pistolas.

El diseño del depósito establece que una parte de este sea semienterrada y una parte sea conformada por taludes, idealmente el total de la altura debe ser de unos 15 m, de los cuales 7 m son en talud de unos 20-30° de inclinación, idealmente con una relación de catetos opuestos de 1:3.

Se considera en el diseño la aplicación de un doble sistema de drenaje entre capas de geomembranas protegidas por geotextiles de malla 400 por ambos lados. Asimismo se considera en el diseño del drenaje, tuberías de HEDP perforadas insertadas en material drenante situada longitudinalmente respecto del perímetro del vaso con cámara de registro al exterior. El suelo primario de asentamiento debe ser arcilla geosintética, arcilla natural o membranas GCL (bentonita). Los pozos de captación deben estar situados al costado del eje longitudinal y conectados a piscinas de lixiviación. El ingreso de residuos al depósito ha de ser de tal modo que impida la acumulación excesiva de estos y permita el desarrollo del frente de trabajo de las maquinarias pesadas

#### **4.6.1. Barreras**

El revestimiento previene la contaminación del suelo y las aguas subterráneas, facilita la recolección y eliminación de lixiviados producidos por el residuo. Este consiste en múltiples capas de materiales naturales o sintéticos. Un ejemplo de un revestimiento natural maternal es la arcilla compactada; Los revestimientos sintéticos incluyen polietileno de alta densidad (HDPE), arcilla geosintética (GCL) y cloruro de polivinilo (PVC).

La selección del material del revestimiento debe basarse en el tipo de residuo y el método de operación del relleno. El lixiviado no debe tener ningún efecto adverso en el material del revestimiento. Tradicionalmente los revestimientos estaban hechos de arcilla, la cual no reduce la permeabilidad por completo. Sin embargo, la permeabilidad en los revestimientos de arcilla disminuye con el tiempo, posiblemente debido a la obstrucción de los espacios de poros por el contaminante del relleno. Una ventaja de los revestimientos de arcilla es que no se dañan fácilmente durante la instalación o el servicio.

Los revestimientos geosintéticos pueden limitar las fugas de manera más eficiente, pero son susceptibles de dañarse durante la instalación. Si se espera que la compactación se haga con equipo pesado, el grosor de la capa de drenaje debe aumentarse para proteger la capa de geosintética. Las geomembranas de polietileno de alta densidad (HDPE) se recomiendan para su uso en vertederos debido a su resistencia a la mayoría de los químicos.

Un ejemplo de un revestimiento típico del relleno sanitario de la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA) incluye dos revestimientos y un sistema de detección y recolección de lixiviados en la parte inferior de la unidad de gestión de residuos.

Un sistema de revestimiento doble consta de los siguientes componentes de arriba a abajo:

- \* sistema de recolección de lixiviados (arena o grava, o ambos).
- \* Geomembrana
- \* Capa secundaria de recolección de lixiviados o capa detección de fugas construida de arena o grava.

\* Geosintético secundario.

\* Revestimiento de arcilla compactada de baja permeabilidad.

El monitoreo de la capa de drenaje entre los revestimientos confirma la integridad del revestimiento superior.

Los revestimientos de arcilla se instalan para elevar la permeabilidad con el contenido de humedad y la densidad apropiados para proporcionar la resistencia y la permeabilidad necesarias para el revestimiento.

Las barreras sintéticas, como el HDPE, se desenrollan de los carretes y se instalan como láminas largas. Suelen estar soldadas por fusión térmica en las costuras. El PVC, que también se puede usar como material de revestimiento, se instala como láminas y generalmente se une mediante métodos de fusión química o térmica.

A medida que se instala el sistema de revestimiento, se instalan sistemas de recolección de lixiviados para recolectar y tratar los lixiviados generados por los desechos del vertedero. El lixiviado a menudo se trata en procesos biológicos simples u otros procesos de tratamiento en el sitio o fuera de él.

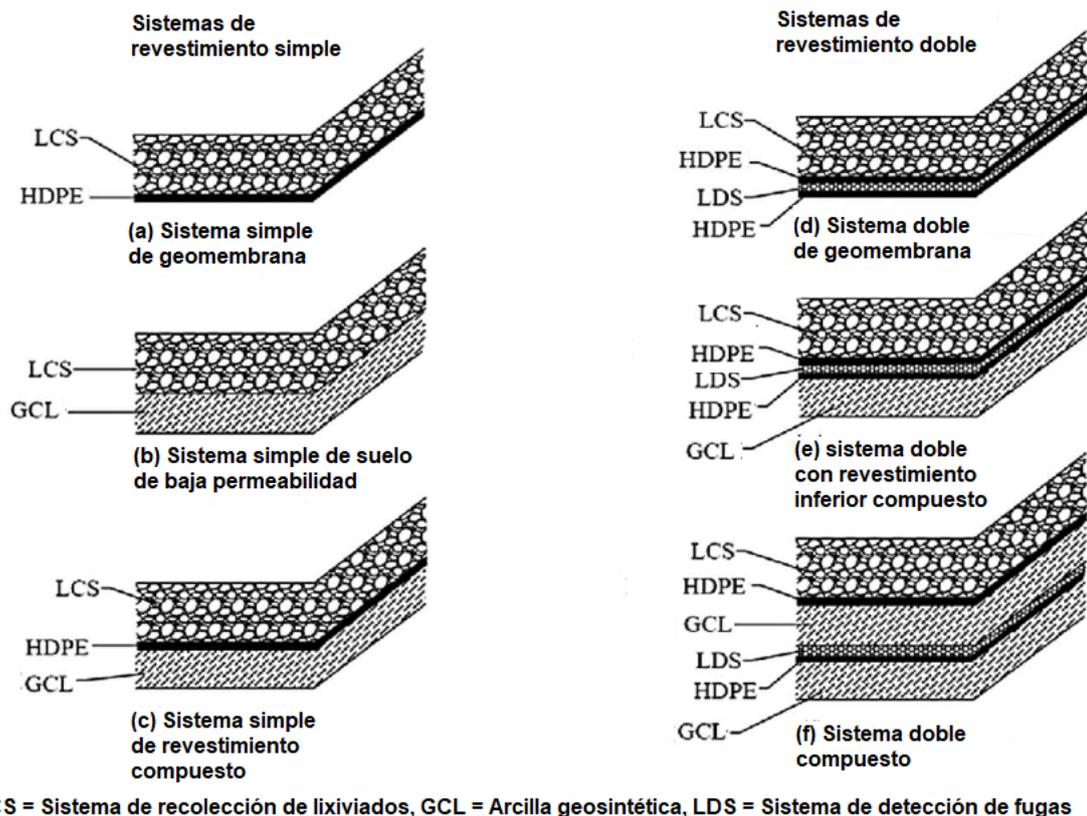


Figura 26: Sistemas de revestimiento (Vesilind et al., 2002)

El espesor de un revestimiento siempre depende del tipo de material seleccionado. Con los sintéticos, las principales preocupaciones son la resistencia a la perforación durante la instalación y la degradación debida a los rayos ultravioleta. En general, se utilizan geo-membranas de 1.5–2.0 mm de espesor para el revestimiento de rellenos

sanitarios (Bagchi 2004). Los espesores del revestimiento de arcilla se rigen por los problemas relacionados con la construcción y la degradación por congelación y descongelación. Por razones teóricas, se recomienda una capa de arcilla de 15 a 30 cm de espesor como mínimo. Sin embargo, se utilizan capas más gruesas para manejar mejor las cuestiones relacionadas con la construcción.

#### **4.6.2. Cubiertas**

Una vez que el relleno sanitario está lleno, se ejecuta la cubierta. Su propósito es evitar que el agua se infiltre hacia el relleno y genere lixiviados que podrían liberarse del vertedero, y tener una cubierta vegetal protectora en la parte superior del vertedero para asegurar los materiales en su lugar; también ayuda a prevenir la interacción entre los residuos y el aire, reduciendo los olores y permitiendo un soporte firme sobre el cual los vehículos pueden operar. Una cubierta de ingeniería puede consistir en materiales naturales o sintéticos, o una combinación de los dos. Básicamente se usan tres capas funcionales: inferior o de baja permeabilidad, media o de drenaje, y superior o control de erosión. La elección de los materiales utilizados en cada una de estas capas funcionales depende de la disponibilidad local y el precio de los materiales alternativos.

El sistema de cubierta consta de los siguientes componentes de abajo hacia arriba:

- \* una barrera hidráulica de revestimiento de baja permeabilidad para evitar la infiltración de agua.
- \* Arena o geored para proporcionar una capa de drenaje.
- \* Capa de protección
- \* Capa superior de suelo, de soporte
- \* Cubierta vegetal.
  - Primero, se debe acondicionar el terreno para favorecer el escurrimiento.
- \* El revestimiento de baja permeabilidad se instala encima de los materiales de desecho. la construcción de una cubierta comienza con la clasificación y la compactación de los residuos o el suelo a cubrir. Este paso proporciona una base estructural para la carga de la cubierta.
- \* Luego se coloca una capa de arena gruesa o una capa de drenaje de geored sobre el revestimiento para recoger y transportar el agua fuera de la cubierta del relleno.
- \* Se agrega una capa protectora del suelo para proteger los componentes subyacentes de la cubierta y apoyar el crecimiento vegetativo
- \* A medida que se instala la cubierta del relleno sanitario, se instalan sistemas de recolección y ventilación de gases para administrar el gas (metano, sulfuro de hidrógeno, etc.) que suelen producirse en los rellenos. Se puede colocar una capa de material poroso de grano grueso entre el residuo y la capa de baja permeabilidad para llevar el gas a los respiraderos.

Si no se recoge el gas, puede causar presión y dañar la cubierta, cambiar los patrones de drenaje o puede escapar del relleno de seguridad y migrar a instalaciones cercanas donde puede ser tóxico, explosivo o asfixiante. El tratamiento más común es la ventilación simple, ya sea pasiva (por la presión de gas generada en el vertedero) o activa (por asistencia de soplador de vacío para extraer el gas del vertedero).

\* Pueden agregarse Geotextiles para reforzar y / o separar otros materiales de cubierta.

N°	Capa	Funciones primarias típicas	Materiales
1	Superficial o control de erosión	Separar la capa subyacente de la superficie del suelo; resistir la erosión; Reducir la temperatura y la humedad extremas en las capas subyacentes.	Capa superficial del suelo; control de la erosión geosintética estera; enguillado; material de pavimentación
2	De protección	Almacenar el agua de infiltración antes de la eliminación; separar los desechos de los humanos, los animales y la vegetación; protege las capas subyacentes de la humedad y el secado, y la congelación y descongelación	Suelo; material de desecho reciclado o reutilizado; enguillado
3	Drenaje	Reducir la altura de agua en la capa de barrera; reducir la presión de agua de levantamiento en capas superpuestas; período de reducción capas superpuestas se saturan después de la lluvia	Arena o grava geored o geocompuesto
4	Filtración	Impedir la filtración del agua a través de la barrera; restringir el movimiento hacia afuera de los gases de los residuos	Arcilla compactada; geomembrana; revestimiento de arcilla geosintética; Material de desecho; asfalto

5	Recolección de gas	Recoger y eliminar gases.	Arena o grava suelo; geored o geotextil; material de desecho reciclado o reutilizado
6	Fundación	Fundación para la cubierta, especialmente durante la construcción.	Arena o grava suelo; residuos reciclados o reutilizados

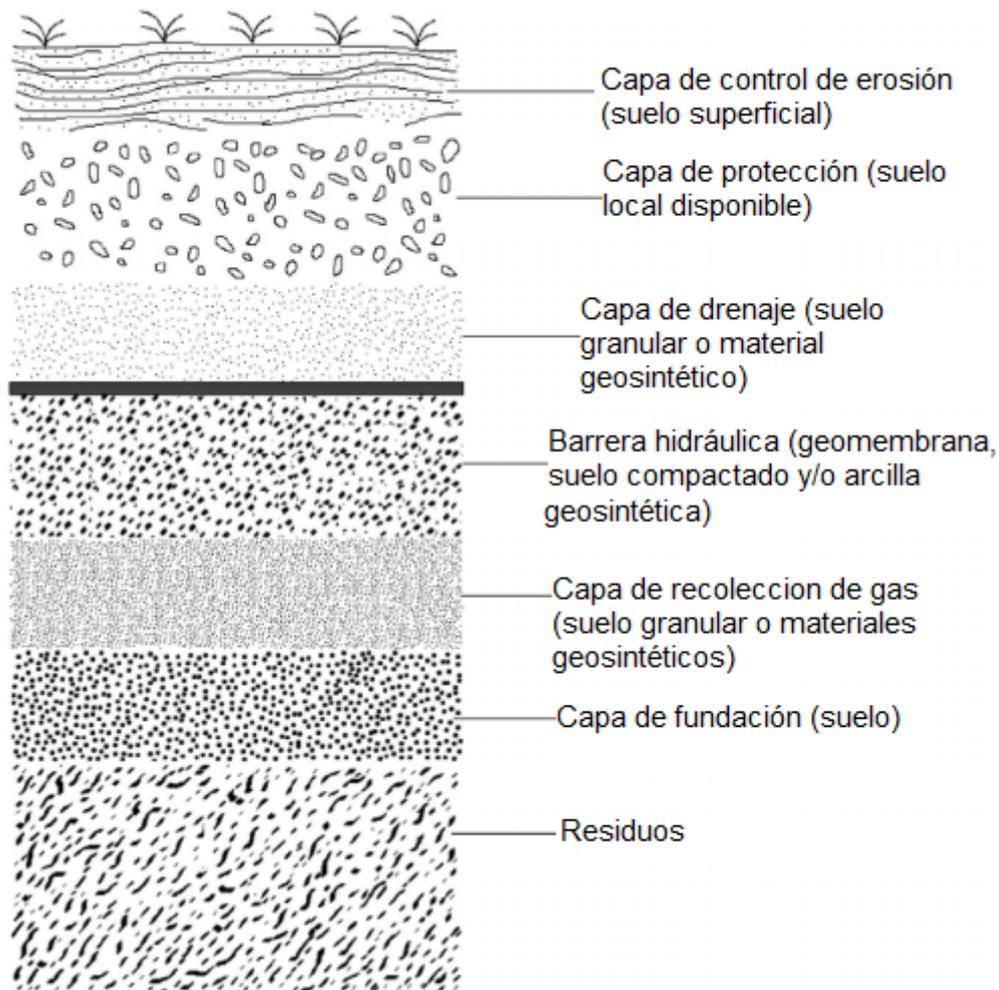


Figura 27: Sección transversal cubierta superior (Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/307436757\\_Landfill\\_Design\\_and\\_Operation](https://www.researchgate.net/publication/307436757_Landfill_Design_and_Operation))

#### **4.6.3. Requisitos mínimos según DR 831/93**

Según los Requisitos mínimos – Rellenos Especiales del. Decreto Reglamentario 831/93 de la Ley 24.051 sobre Régimen de Desechos Peligrosos.

Se deberá mantener permanentemente cubierto el frente de avance del relleno. La cobertura deberá impedir totalmente la infiltración de aguas pluviales, para lo cual constará como mínimo de las siguientes capas (desde arriba hacia abajo): ▫

- a) Una capa de suelo vegetal que permita el crecimiento de vegetación. ▫
- b) Una capa filtro. ▫
- c) Una capa drenante. ▫
- d) Dos capas de materiales de baja permeabilidad. ▫
- e) Una capa de suelo para corrección y emparejamiento de la superficie de los residuos.

#### **II) Impermeabilización de base y taludes; drenajes. Un Relleno de Seguridad debe poseer:**

- A) Barreras de material de muy baja permeabilidad recubriendo el fondo y taludes laterales (Suelos compactados de baja permeabilidad, Geomembranas (HDPE, LDPE, PVC, CSPE).
- B) Capas drenantes a fin de coleccionar y conducir flujos no deseados (suelos de alta permeabilidad, materiales sintéticos para drenaje, y tuberías).
- - Sistemas de impermeabilización dobles y compuestos.
- Un sistema doble de impermeabilización es aquel compuesto por dos revestimientos de materiales de baja permeabilidad y que cuente con un sistema de colección y remoción entre ambos revestimientos. Un sistema compuesto no constituye un sistema doble dado que no cuenta con un sistema intermedio de colección y remoción de líquidos entre ambos componentes.
- Los revestimientos superior e inferior, junto con el sistema de colección y remoción (SCR) arriba del revestimiento superior, y el sistema de detección, colección y remoción (SDCR) ubicado entre ambos revestimientos, actúan de manera integrada

#### **III) Requerimiento de diseño.**

- Los "requerimientos tecnológicos mínimos" especificados por la U.S. EPA para nuevos rellenos de seguridad y embalses superficiales, requieren un sistema doble de impermeabilización con un sistema de colección y extracción de líquidos y un sistema de detección, colección y remoción entre ambas capas. La guía de requerimientos de tecnología mínima identifica dos sistemas dobles de impermeabilización aceptables:

- a) Dos revestimientos de geomembranas (Fig. 1) con un espesor mínimo de 0,76 mm para cada una. Si la geomembrana se halla expuesta y no es cubierta durante la etapa constructiva en un plazo inferior a tres meses, el espesor debe ser igual o mayor a 1,15 mm. La guía indica que espesores de 1,52 a 2,54 mm podrían ser exigidos para resistir diferentes condiciones. • La compatibilidad química de los materiales geosintéticos con los residuos a depositar, debería ser probada empleando el EPA Method 9090.

- b) El revestimiento inferior, que sustituye a la segunda membrana, puede estar conformado por suelo de baja permeabilidad. El espesor del suelo no debería ser inferior a 36 inch (90 cm) con un KF menor o igual a  $10^{-7}$  cm/seg. • La membrana superior tiene que cumplir las mismas recomendaciones mínimas

#### IV) Cobertura superior

La cobertura superior es el componente final en la construcción de un relleno de seguridad. Constituye la cubierta protectora final de los residuos depositados una vez que el relleno ha sido completado. La cobertura debe ser diseñada para minimizar la infiltración de aguas pluviales, por tanto minimizar la migración de líquidos y la formación de lixiviados. En general este sistema debe incluir (desde arriba hacia abajo):

- Una capa de suelo vegetal para permitir el crecimiento de vegetación, favoreciendo la evapotranspiración y evitando la erosión.
- Una capa filtro para evitar la obstrucción con material de la capa drenante subyacente.
- Una capa drenante.
- Una capa compuesta por dos materiales de baja permeabilidad, por ejemplo: una geomembrana (de espesor no inferior a 0,51 mm) más una capa de suelo de baja k.
- Una capa de suelo para corrección y emparejamiento de la superficie de los residuos.
- Esto se completa con pendientes adecuadas

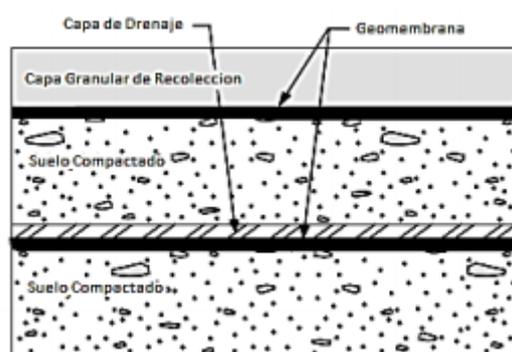


Figura 28 : Sistemas de barrera inferior Barrera doble (Hauser, 2009).

La barrera debe tener una geomembrana (mínimo de 30 mil FML; al menos 60 mil de polietileno de alta densidad (HDPE)) y un componente inferior de un material de suelo compactado mínimo de 2 pies de espesor con un valor de conductividad hidráulica (k) menor o igual a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s.

#### **4.6.4. Requisitos mínimos según Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) – EPA Subtítulo C**

##### **I) Barrera de fondo o revestimiento de fondo**

De acuerdo con el programa RCRA Subtítulo C (40 CFR 264), un relleno de seguridad debe tener dos o más revestimientos y un sistema de recolección y remoción de lixiviados entre dichos revestimientos.

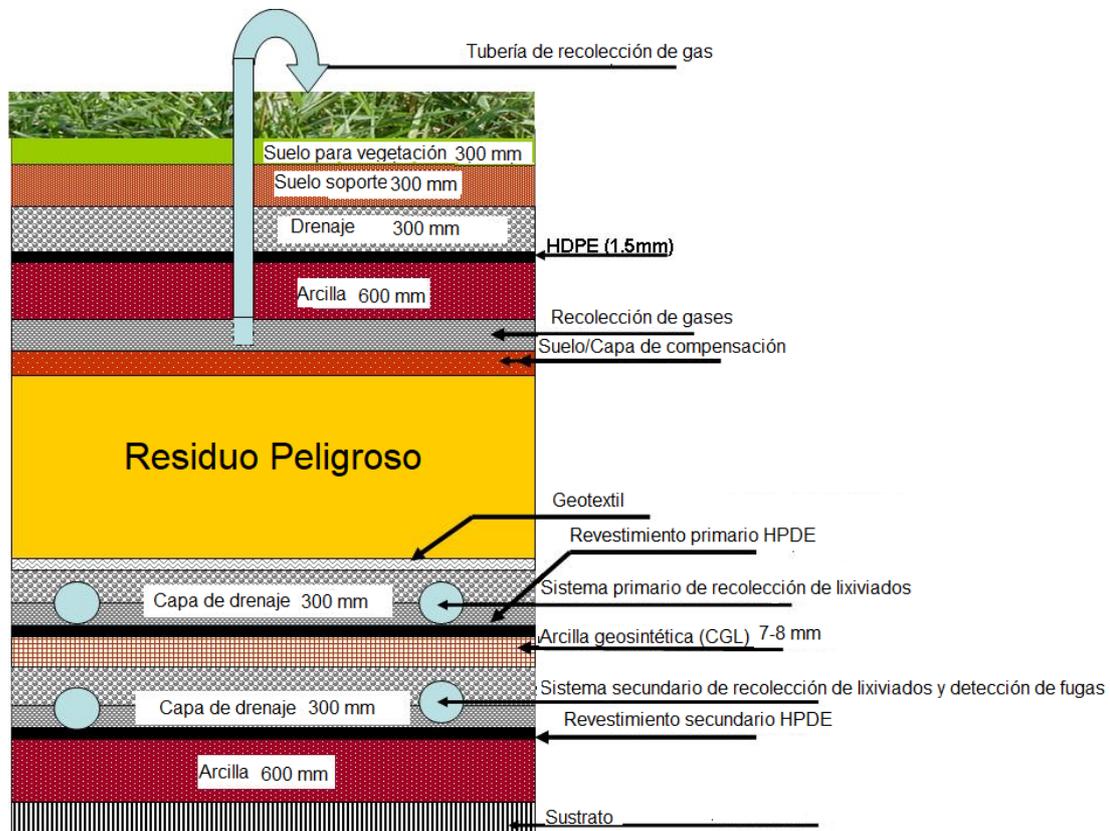
El sistema debe tener un revestimiento superior (p. Ej., Una geomembrana) y un revestimiento inferior compuesto (p. Ej., Una geomembrana sobre suelo compactado). La barrera superior y el compuesto por encima de la barrera compuesta deben estar diseñados y fabricados con materiales para **evitar la migración de componentes peligrosos** a dicho revestimiento durante la vida activa y el período posterior al cierre. El componente inferior debe estar diseñado y construido con materiales para minimizar la migración de componentes peligrosos. Este requisito de minimizar la migración de componentes peligrosos se especifica de modo que si se estropeara la geomembrana, el componente inferior actuaría como una segunda línea de defensa. El componente inferior del revestimiento compuesto debe estar construido con al menos 3 pies (91 cm) de material de suelo compactado con una conductividad hidráulica (k) de no más de  $1 \times 10^{-7}$  cm/s. Los requisitos mínimos de tecnología de USEPA también recomiendan que la geomembrana superior o primaria tenga un espesor de 30 mil (0,76 mm) donde esté cubierta por una capa protectora de tierra y/o geotextil. Este espesor debe ser de al menos 40 mils (1.14 mm) si la geomembrana está descubierta o expuesta directamente a los elementos peligrosos. Algunas geomembranas pueden requerir mayor espesor para evitar fallas o para la costura. Para geomembranas de HDPE, generalmente se recomienda un espesor de 60 a 100 mils (1.52 a 2.54 mm).

Se coloca un sistema de detección, recolección y extracción de fugas (LDCRS) entre los dos revestimientos (es decir, debajo la geomembrana primaria y por encima de la geomembrana secundaria). Como su nombre lo indica, el objetivo de este sistema es detectar, recolectar y eliminar fugas de componentes peligrosos lo antes posible durante la vida activa y el cuidado posterior al cierre. El sistema debe construirse con un pendiente inferior del 1% o más. Si se construye con material granular, debe tener un espesor de 12 pulg. (30.5 cm) más y una conductividad hidráulica de 1 cm/s. Si el sistema está construido con material de drenaje sintético, su transmisividad debería ser  $3 \times 10^{-5}$  m/s más (USEPA, 1991). Los materiales de drenaje granulares o sintéticos deben ser resistentes a los componentes químicos de los desechos y deben diseñarse y utilizarse para minimizar las obstrucciones que conducen a la vida activa y al período de cuidado posterior a la seguridad. El sistema debe tener sumideros y bombas de tamaño suficiente para recoger y eliminar líquidos.

##### **II) Sistema de cobertura**

El sistema de cobertura final del relleno sanitario de desecho (Subtítulo C), tal como lo describe la USEPA, es de arriba a abajo.

- Una capa de suelo vegetal con un mínimo de 2 pies de espesor (la capa debe clasificarse en una pendiente entre 3 y 5%).
- Una capa de filtro de suelo o geosintético (p. Ej., Geotextil) para evitar que el suelo o un sistema de raíces obstruyan la capa de drenaje subyacente.
- Una capa de drenaje que consiste en un material granular mínimo de 1-pie de espesor con una conductividad hidráulica mínima  $1 \times 10^{-2}$  cm/s o un material de drenaje geosintético equivalente, como un geocompuesto. Un revestimiento de geomembrana mínimo de 20 mil
- Una capa de suelo de baja permeabilidad mínima de 24 pulgadas de espesor con una conductividad hidráulica máxima de  $1 \times 10^{-7}$  cm/s



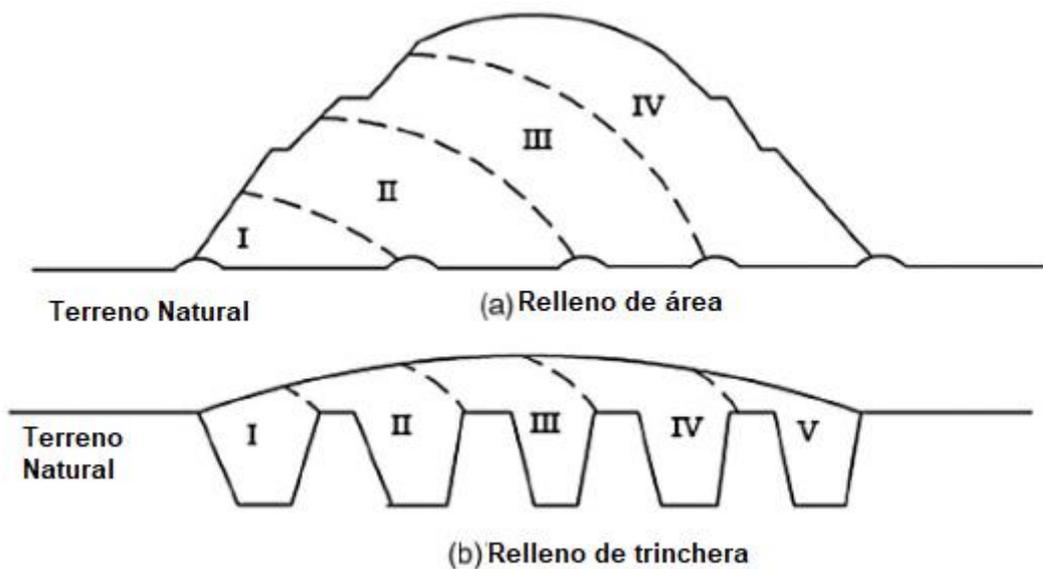
**Figura 29: Rellenos de doble revestimiento compuesto con recolección de lixiviados siguiendo el requisito de RCRA Subtítulo C para rellenos sanitarios (Recuperado de [www.cleanindiajournal.com](http://www.cleanindiajournal.com))**

#### 4.6.5. Configuraciones de un relleno de seguridad

Existen dos métodos básicos para la operación del relleno sanitario: el relleno del área y el relleno de la zanja. En muchos casos, los rellenos sanitarios se operan como una combinación de ambos.

El relleno de área implica la construcción de celdas de desechos sucesivas que se compactan contra un talud. Sus ventajas son que no requiere excavación, es útil en áreas donde el terreno puede ser inadecuado para operaciones de zanjas, se pueden cargar grandes volúmenes ya que no está limitada por el tamaño de una excavación. Entre sus desventajas, se puede mencionar que existe potencial para mayores problemas de basura, necesita mayor cantidad de área de relleno utilizada por volumen de residuos depositados lo que puede resultar en costos más altos, el control topográfico no es tan sencillo como para la operación de zanjas

En una operación de llenado de zanjas, los desechos sólidos se extienden y compactan en una excavación. Las operaciones de relleno de zanjas generalmente se usan en terrenos relativamente planos, pero pueden adaptarse a una amplia variedad de condiciones topográficas. Sus ventajas son que hay un menor frente de trabajo expuesto, se puede diseñar para un drenaje óptimo durante las operaciones de llenado, puede proporcionar un mejor control de la basura, un inferior relación área/volumen que puede resultar en un menor potencial de producción de lixiviados. Sus inconvenientes son que no es adecuado en áreas geológicas con altos costos de excavación o con un nivel freático elevado, la recolección de lixiviados en C puede ser más difícil o costosa, las profundidades de la zanja C y las pendientes laterales dependen del tipo de suelo y la estabilidad, y el tamaño de la zanja puede ser insuficiente para manejar grandes volúmenes de tráfico.



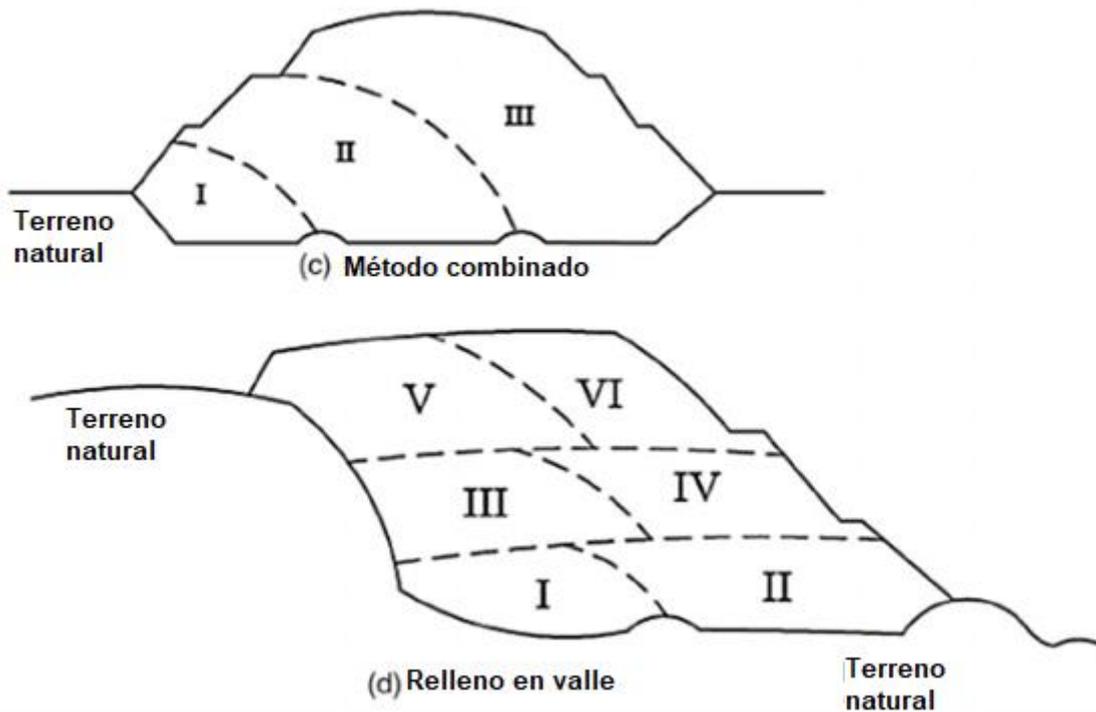


Figura 30: Distintas configuraciones de rellenos sanitarios (Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/307436757\\_Landfill\\_Design\\_and\\_Operation](https://www.researchgate.net/publication/307436757_Landfill_Design_and_Operation))

Descripción de las imágenes:

(a) es un relleno de área (sobre el suelo) que no requiere excavación. Es la más adecuada para terrenos planos con elevaciones de aguas subterráneas poco profundas.

(b) es un relleno de Zanja, y ambas están combinadas en las opciones por encima y por debajo del suelo

(c) por encima y debajo del relleno de tierra

(d) es un relleno de valle utilizado en terrenos montañosos.

#### 4.6.6. Resumen de partes de un relleno de seguridad y sus funciones

Forma contención	y Función	Materiales	Parámetros clave
Forma contención	<ul style="list-style-type: none"> <li>- fuerza mecánica</li> <li>- limitar la entrada de agua</li> <li>- retener radionúclidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lechada de cemento</li> <li>- betún</li> <li>- polímeros</li> <li>- contenedor de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- resistencia (compresiva)</li> <li>- permeabilidad</li> <li>- tasa de lixiviación</li> </ul>

		hormigón	- tiempo de falla
		- contenedor metálico	
<b>Relleno</b>	- relleno de vacíos	- arcilla (natural o importada)	- capacidad de absorción
	- limitar la infiltración de agua	- cemento y arcilla	- permeabilidad
	- sorción de radionucleidos	- lechada de cemento	- porosidad
	- precipitación de radionucleidos	- mezclas de arcilla (con cementos, suelos, rocas etc.)	- propiedades mecánicas;
	- control de gas		
	- permitir la recuperación	- rellenos de baja resistencia	
<b>Material y revestimientos</b>	- estabilidad física	- hormigón	- permeabilidad
	- barrera de contención	- hormigón reforzado	- fuerza compresiva
		- arcilla	- resistencia al corte
		- asfáltico o membranas orgánicas	- espesor
		- chapa de acero	- tiempo de falla
<b>Drenes</b>	- controlar el lixiviado	- grava / arena	- permeabilidad
	- permitir el monitoreo	- cerámica y cemento	- tasa de bloqueo
<b>Cubierta</b>	- limitar la infiltración de agua	- arcillas	- permeabilidad
	- control de liberación de gas	- asfalto o polimérico	- escurrimiento de agua
	- barrera de intrusión	- membranas	- plasticidad
	- barrera	- arena / suelo	- tiempo hasta falla

de erosión

- grava / adoquines
- geotextiles
- losas de hormigón
- grava / adoquines
- vegetación



Figura 31: Relleno de seguridad (Recuperado de <https://www.freep.com/story/news/local/michigan/2014/09/07/landfill-taking-radioactive-waste-has-history-of-violations-leaks-fires/15210857/>)

#### 4.6.7. Parámetros de diseño

Datos para la aplicabilidad de esta tecnología:

- identificar los receptores potenciales y vías de exposición completas.
- volumen del material de desecho.
- Mapeo del área para determinar si hay suficiente área disponible en una ubicación con una pendiente mínima.
- Considerar las condiciones geológicas que pueden prohibir la construcción, como fallas activas, trabajos subterráneos cerca de la superficie, topografía kárstica que está sujeta a hundimiento, etc.
- Disponibilidad de material en el sitio.

- La determinación de los parámetros físicos del material prestado disponible y los desechos debe incluir el tamaño del grano, el contenido de humedad, la permeabilidad, los límites de Atterberg y la densidad. Deben realizarse pruebas Proctor (ya sea ASTM D 698 o D 1557) para determinar la densidad seca máxima con un contenido de humedad óptimo. Es posible que se requieran análisis de corte para determinar si los residuos son estables en la ubicación actual. La naturaleza de los materiales de desecho a estabilizar tiene un efecto significativo en la geometría del área de estabilización.
- precipitación anual en la zona.
- profundidad y la dirección del flujo de agua subterránea en el área para evaluar la idoneidad y para identificar las ubicaciones potenciales de los pozos de monitoreo de agua subterránea.
- Determinación de la extensión de la llanura de inundación de 100 años y delimitación de humedales.
- Evaluación de cualquier área con importancia cultural o histórica.
- Evaluación de cualquier hábitat en el sitio para, o presencia de, especies amenazadas y en peligro de extinción.
- Se debe considerar el uso actual y futuro del suelo para determinar si la ubicación es susceptible de mantener los residuos en el sitio.
- Debe haber espacio suficiente para construir un límite donde no se vea afectado negativamente por el flujo de agua de la superficie de mejoramiento o la propia barrera no afectará negativamente los recursos de agua de superficie o agua subterránea. Los controles del agua superficial, como los canales de actualización o las estructuras de desvío , pueden reducir los impactos de la escorrentía del agua superficial.
- Una fuente cercana de material para la construcción del relleno debe estar disponible. Los materiales limitados en las cercanías del sitio pueden aumentar los costos (sin embargo, este tratamiento suele ser mucho más económico que las alternativas de tratamiento o eliminación fuera del sitio).
- La excavación del material de cobertura, ya sea dentro o fuera del sitio, puede tener impactos ambientales adversos y requerir medidas de mitigaciones temporales y permanentes. Otras consideraciones de espacio incluyen aquellas para áreas de almacenamiento de material y almacenamiento de equipos.
- Las condiciones del sitio, como el tipo y la capacidad de lixiviación de la contaminación, los tipos y profundidades del suelo, la profundidad al agua subterránea, el volumen de precipitación anual, los posibles receptores de degradación y la distancia a los cuerpos de agua superficiales degradados, pueden requerir la necesidad de una barrera impermeable para formar parte de

la Diseño del relleno para evitar la migración de la contaminación de los residuos sólidos de minería y molienda. La gestión a largo plazo de un límite incluye la operación y el mantenimiento del límite, y también requiere controles administrativos o de ingeniería para que la integridad del límite no se vea comprometida.

#### 4.6.8. Ventajas y limitaciones

La principal ventaja es que se trata de una remediación permanente y se elimina o reduce la exposición a la contaminación, por lo que se abordan los riesgos agudos y crónicos para los receptores humanos y ecológicos. Cuando los desechos sólidos minerales están confinados, hay una ruptura inmediata en la ruta de exposición; es decir, no hay un período de tiempo requerido para que la tecnología trate o descomponga la contaminación. Evita que la fuente lixivie o migre contaminante a aguas superficiales o subterráneas en un nivel inferior. Otra ventaja de limitar o cubrir dentro o fuera del sitio es la reutilización beneficiosa del suelo.

La principal limitación de la tecnología de tapas y cubiertas, especialmente si se usa como remediación final, es que requiere una operación y mantenimiento a largo plazo y un monitoreo para garantizar que la barrera permanezca efectiva y protectora. También se pueden requerir controles administrativos o de ingeniería, junto con una fuente continua de fondos para el sitio y el seguro de que los usos futuros del suelo.

#### 4.6.9 Verificaciones

**Control hidrológico interno:** proporcione contención y recolección de lixiviados dentro del relleno para evitar que los lixiviados entren al medio ambiente;

**Control hidrológico externo:** proporciona resistencia a los impactos hidrológicos externos, incluida la infiltración a través del sistema de cobertura y el daño por escorrentía y escorrentía de las aguas superficiales

**Estabilidad geotécnica:** proporciona una pendiente adecuada y estabilidad de la cimentación durante la construcción, el llenado, el cierre y el postcierre, incluida las condiciones asociadas con posibles eventos sísmicos de largos intervalos de recurrencia;

**Estabilidad a la erosión:** proporciona resistencia a la erosión de las capas de suelo para lograr impactos de erosión mínimos durante todo el período de rendimiento; y resistencia a la biointrusión: proporcionan resistencia a la intrusión OSDf por las raíces de las plantas y los animales excavadores.

## CAPÍTULO 5: PROPUESTA DE REMEDIACIÓN

### 5.1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El principal riesgo potencial asociado con la pila de relaves resulta de la exposición del radón, un gas radiactivo, producto de la desintegración radiactiva del radio contenido dentro de los relaves. El radón puede migrar hacia la atmósfera a través de los relaves y contaminar el aire. El aumento de la exposición al radón y sus productos de descomposición aumentará la posibilidad de afectaciones la salud (como patologías cancerígenas) en personas que viven y trabajan cerca de los relaves. La exposición a la radiación, la inhalación e ingestión de partículas radiactivas en el aire, la ingestión de agua superficial o subterránea contaminada por la radiación, y la ingestión de alimentos contaminados producidos en el área alrededor de los relaves también presentan riesgos potenciales. Si los relaves y los materiales contaminados asociados no se estabilizan adecuadamente, los procesos naturales como la erosión del agua y el viento o la eliminación del material por el hombre podrían propagar la contaminación y aumentar los riesgos para la salud pública.

La Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA) determinó "que el objetivo principal para el control de los relaves debe ser el aislamiento y la estabilización para evitar su manipuleo inadecuado por parte del hombre y la dispersión por efectos naturales" y que "un objetivo secundario debe ser reducir las emisiones de radón de las pilas". Un tercer objetivo debería ser "la eliminación de una exposición significativa a la radiación gamma de las pilas de relaves".

La salud pública y las preocupaciones ambientales de la extracción de uranio se han asociado con varios aspectos de las operaciones históricas y la eliminación de relaves. La Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA) ha identificado cuatro rutas de exposición a la salud de los relaves de uranio:

1. Mayor riesgo de cáncer de pulmón por la difusión de gas radón en el interior de las viviendas, si se usa material de relaves como material de construcción,
2. Inhalación de gas radón o ingestión de pequeñas partículas directamente emitidas por las pilas del molino a la atmósfera,
3. Exposición a la radiación gamma producida por productos de desintegración radiactiva dentro de los relaves, y
4. Movilización de componentes radiactivos y otros componentes hacia las aguas superficiales y subterráneas por erosión del viento y el agua.

Los mecanismos físicos y geoquímicos pueden liberar metales residuales y radionucleidos dentro de los relaves en aguas subterráneas o superficiales. Los riesgos asociados con la liberación de diversos componentes radiológicos y no radiológicos de los relaves de uranio pueden persistir durante cientos o miles de años.

## 5.2. TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL A ADOPTAR:

La geometría y distribución de instalaciones de un sitio de enterramiento se decide en base al análisis muchos factores. Si se trata de un sitio destinado a enterrar un determinado volumen que no va a cambiar con el tiempo (que no va a recibir aportes futuros), el tamaño puede ser definido en base a ese volumen conocido. Pero si va a servir para continuar enterrando más cantidad de residuos generada en el tiempo, el volumen dependerá de la proyección que se haga de generación anual durante la vida útil prevista. En nuestro caso, determinaremos el tamaño del relleno sanitario en función del volumen calculado de acuerdo a la extensión del área en que se depositaron las colas de uranio y el estudio de suelos realizado por el Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales). Se considera necesario remediar todo el predio, ya que no existen registros confiables sobre el área en que los residuos fueron vertidos y se estima que el efecto de los fenómenos naturales (lluvia y viento) pudo haber extendido la contaminación en toda el área.

Es preferible elegir un sitio que no tenga un nivel freático elevado, porque de esa manera no solo no hay restricción para la profundidad, sino que permite extraer más material de excavación que se dejará acopiado para que sirva de capa de cubierta cuando se van cerrando sectores o celdas. Sin embargo, teniendo en cuenta las tecnologías de aislamiento actuales y los diferente materiales disponibles en el mercado para ejecutar ese aislamiento, la profundidad del vaso de acopio puede o no estar condicionada por el nivel freático del sitio, ya que además se cuenta con tecnología para deprimir ese nivel mientras se construye el vaso si fuera necesario. En Alta Córdoba la napa se encuentra muy profunda, por lo que esto no genera inconvenientes para llevar a cabo la remediación in situ.

Teniendo en cuenta estas premisas, La profundidad se determinó según las observaciones obtenidas del informe de “ESTUDIOS DE ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DEL SUELO DE FUNDACIÓN EN EL LARGO PLAZO, Y SU RELACION CON UNA GESTION IN SITU DEL SITIO CORDOBA.” Realizado por Laboratorio de Geotecnia, Facultad de Ciencias Exactas Fisicas y Naturales en el cual los cortes resistivos de los perfiles obtenidos muestran claramente cambios estratigráficos en la superficie, con valores de resistividad aparente de entre 40  $\Omega$ m y 70  $\Omega$ m, valores de resistividad aparente correspondiente a suelo limoso y arenoso. Esta capa se extiende hasta unos 3 m aproximadamente donde la resistividad comienza a disminuir.

Este estrato se correlaciona con los depósitos y la tapada de limos del residuo.

Respecto a esta profundidad, se propone sobreexcavará 1 m adicional para ejecutar el vaso de acopio de residuos. Teniendo en cuenta esto y sumando los espesores de la cubierta y barrera capa de aislación de fondo, la profundidad total a excavar será de 5 m.

Método a utilizar: se adoptará el encapsulamiento y se va a excavar periódicamente fajas, con el apoyo de una retroexcavadora. La tierra que se extrae, se coloca a un lado de las fajas para utilizarla como material de cobertura, los desechos de dióxido de

uranio se depositan y acomodan dentro de la trinchera para luego compactarlos y cubrirlos con la tierra diariamente.

La pendiente de taludes de la excavación depende de las características del suelo, para asegurar que estos taludes sean estables y no se derrumben o deslicen por inestabilidad cuando se haga la excavación. La Pendiente de talud del relleno por encima del nivel del suelo dependerá del tipo de residuo y su estabilidad al ser colocado en elevación. Generalmente es una pendiente más suave o extendida que la de la excavación

La pendiente de taludes de la excavación depende de las características del suelo, para asegurar que estos taludes sean estables y no se derrumben o deslicen por inestabilidad cuando se haga la excavación. Con el propósito de maximizar el volumen de enterramiento disponible se procura que esta pendiente sea lo más pronunciada posible dentro de las condiciones de estabilidad que permite el terreno.

La pendiente de talud del relleno por encima del nivel del suelo dependerá del tipo de residuo y su estabilidad al ser colocado en elevación. Generalmente es una pendiente más suave o extendida que la de la excavación.

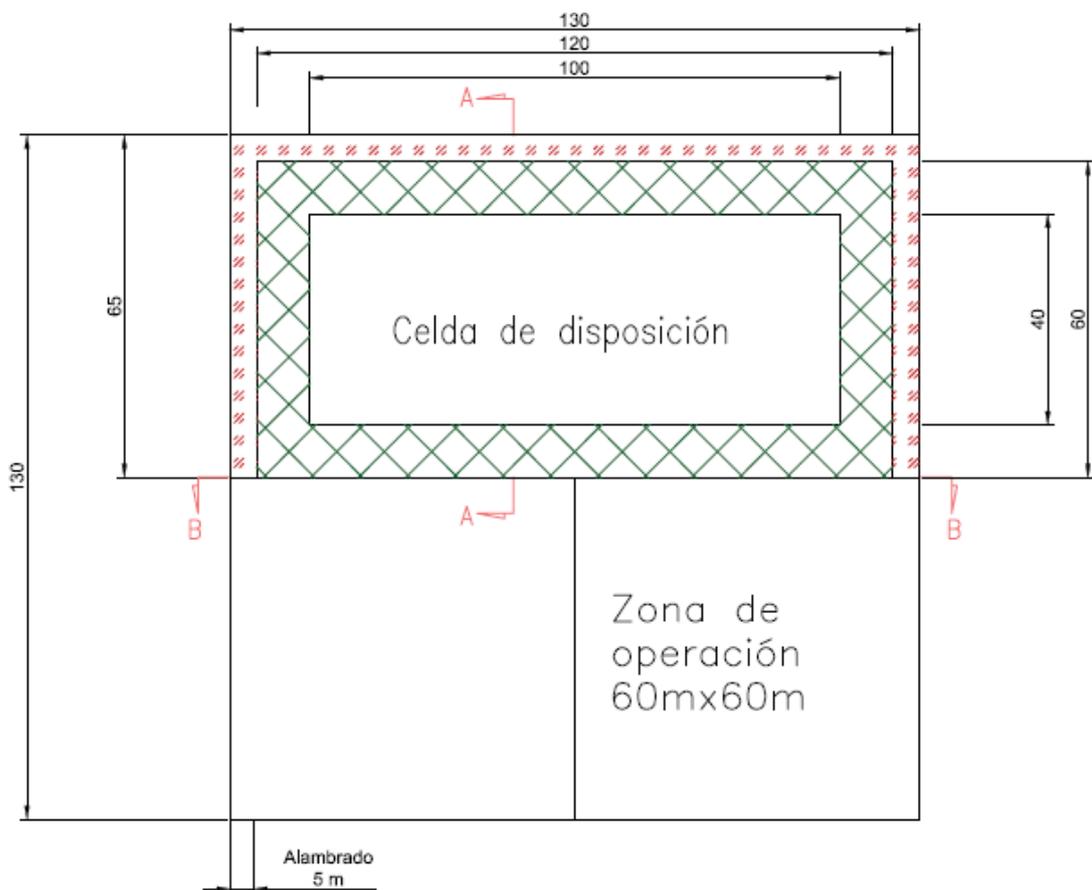


Figura 32: Área a ocupar por el encapsulado (Elaboración propia)

## Corte A-A

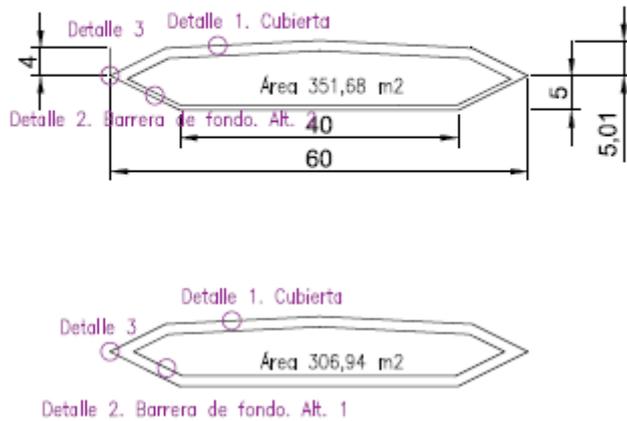


Figura 33: Corte A-A de Alternativa 2 y 1 (Elaboración propia)

## Corte B-B

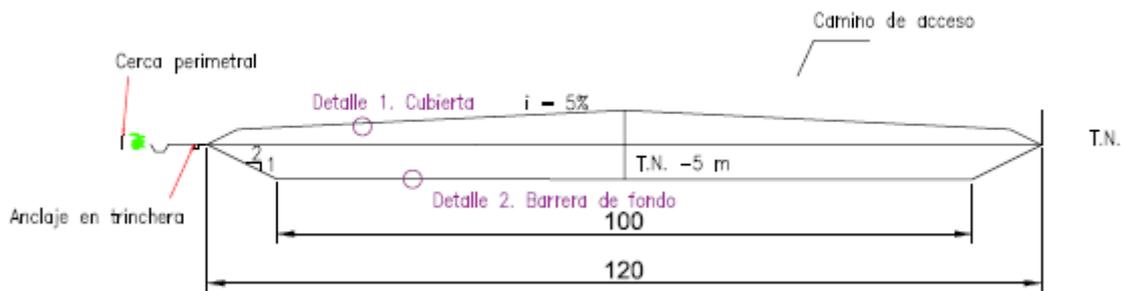


Figura 34: Corte B-B (Elaboración propia)

### 5.3. CONFIGURACIÓN DE LA CUBIERTA

La cubierta será diseñada para mitigar la liberación de gas radón a la superficie y minimizar la infiltración de agua en el residuo. Deberá preverse en un futuro una capa de tierra vegetal con vegetación que puede almacenar precipitaciones y permitir la evaporación y transpiración a través de la vegetación. Esta capa superior se superpondrá a una capa de arena gruesa que actúa como una barrera capilar y está destinada a drenar cualquier agua infiltrada lateralmente por encima de una geomembrana de polietileno de alta densidad. Debajo de la geomembrana hay una capa de arcilla compactada que sirve como barrera para el transporte de gas radón y la infiltración de agua. La capa de arcilla estará directamente sobre los relaves.

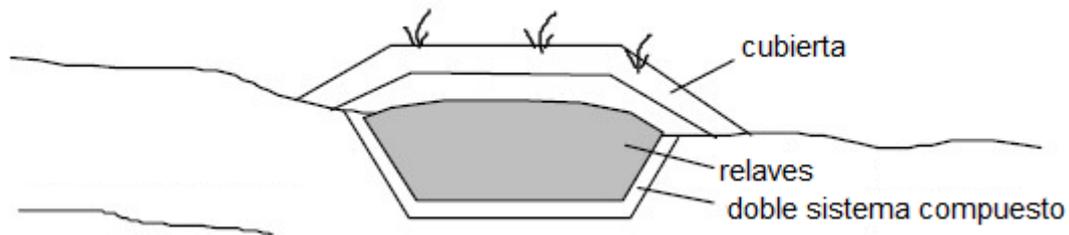


Figura 35: Croquis del diseño (elaboración propia)

Se adopta una cubierta multicapa en el que cada capa tiene un material y un propósito respectivos.

Capa funcional	Material	Espesor	Funciones
Vegetación	Suelo apto para implantar vegetación	0,3 m	Prevenir erosión, paisajística
Drenante	Grava	0,6 m	drenar el agua de lluvia penetrada lateralmente
Baja permeabilidad	Arcilla	0,6	reducir la infiltración del agua hacia abajo por los materiales de baja permeabilidad
De transición de suelo local		0,6 m	Dar forma y aislar las capas del residuo

reducir la emanación de radón y radiación gamma, minimizar la infiltración de las precipitaciones, prevenir la desecación de la capa de arcilla y proveer una barrera contra el intemperismo a largo plazo.

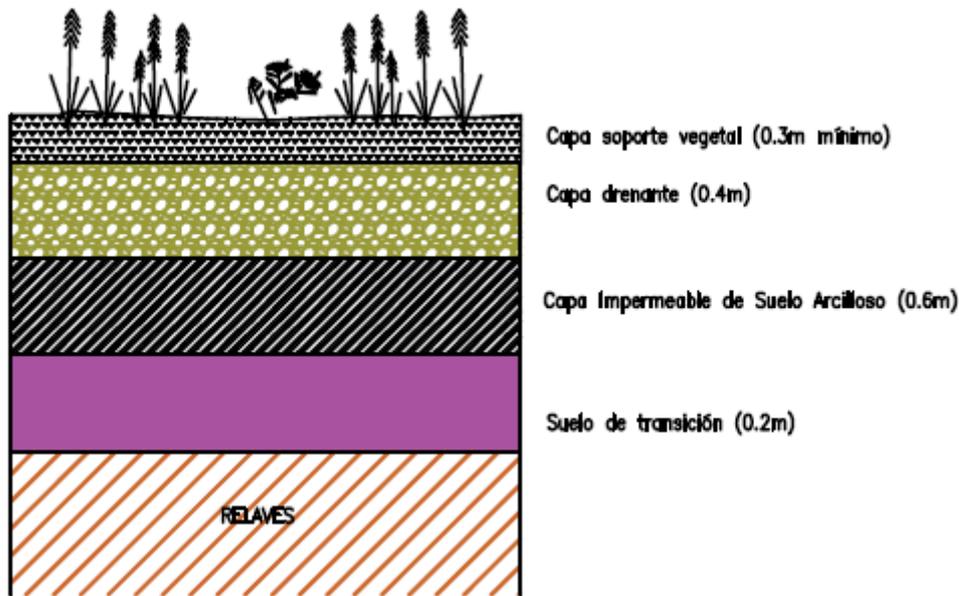


Figura 36: Detalle del sistema de cubierta (elaboración propia)

#### 5.4. CONFIGURACIÓN DE LA BARRERA DE FONDO

Se describe a continuación una configuración de capa de aislación inferior sugerida, y una más simplificada pero con las recomendaciones mínimas para una contención y encapsulamiento del contaminante. Ambas alternativas cuentan con capas funcionales que tienen la función de aislar al residuo según su potencial contaminante y según las rutas y vías de exposición que se describen con mayor detalle en el Capítulo 3.

Los estándares de diseño para los vertederos de residuos peligrosos según especificaciones de EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) resultan absolutamente necesarios para otros desechos peligrosos. Los materiales radioactivos tienen un tratamiento diferenciado porque no generan lixiviados.

En cuanto a los espesores mínimos de estas barreras, se recomienda:

LDCRS:  $e = 30 \text{ cm}$

CGL:  $e = 8 \text{ mm}$

Arcilla compactada:  $e = 90 \text{ cm}$

Hay que tener en cuenta que la arcilla resulta de muy complicado manipuleo y colocación. Genera excesivo agrietamiento por contracción

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente pero adaptado a las características de este residuo con radiactividad de baja actividad, se procederá al diseño de la celda.

El revestimiento inferior consistirá en suelo de baja permeabilidad, en sustitución de la segunda membrana.

El espesor del suelo (que actúa como segunda capa impermeable) depende del sitio y de condiciones específicas de diseño, sin embargo no deberá ser inferior a 90 cm 36 (inch) con un coeficiente de permeabilidad (KF) menor o igual a  $1 \times 10^{-7}$  cm/seg.

En cuanto a las capas drenantes (SDCR y SCR) deben estar construidas por materiales granulares o geosintéticos como geocompuestos drenantes prefabricados formados por un núcleo de drenaje (Geomalla) rodeado por un geotextil que actúa como filtro.

En resumen, para el diseño de la barrera inferior, se plantean 2 alternativas. S que se describen a continuación, desde arriba para abajo.

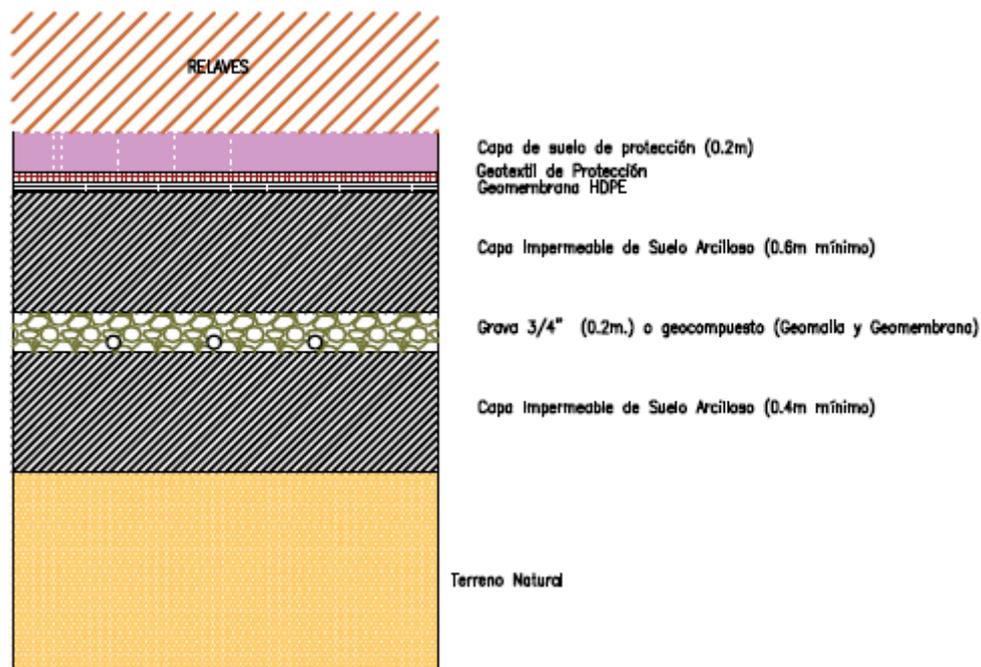
Alternativa 1:

- 1) Capa de suelo de protección
- 2) Geomembrana
- 3) Capa de arcilla compactada
- 4) Capa de drenaje: hecha con arena o grava
- 5) Capa de arcilla compactada

Capa funcional	Material	Espesor	Funciones
<b>Capa de suelo de protección</b>	Suelo local	0,2 m	Doble función: protección y drenaje
<b>Capa de baja permeabilidad: Doble compuesta</b>	Suelo arcilloso y geomembrana HDPE (y de ser necesario geotextil de protección)	Mayor o igual a 0,6 m la capa de arcilla y la geomembrana 0,76 mm.	minimizar la posibilidad de contaminación de los suelos de fundación y el agua de la napa freática, por efecto de la percolación del agua contenida en los residuos. Esta capa también debe imposibilitar la filtración de agua desde la napa freática hacia los residuos. El pasaje del líquido contenido en los

poros de las colas a la napa freática, se verá minimizado dada la baja permeabilidad de la capa de arcilla. El geotextil de protección provee protección geomembrana primaria del punzonado

<b>Capa drenante</b>	Grava $\frac{3}{4}$ " o 0,2 m geocompuesto (geomalla y geomembrana)	Garantizar la recogida de todos los lixiviados acumulados sobre el sistema de impermeabilización. Esta capa si bien se recomienda por la normativa nacional e internacional no se considera indispensable para este tipo de residuos que prácticamente no lixivian.
<b>Segunda capa de baja permeabilidad</b>	Suelo arcilloso o geomembrana	Reforzar la función de la capa de arcilla.

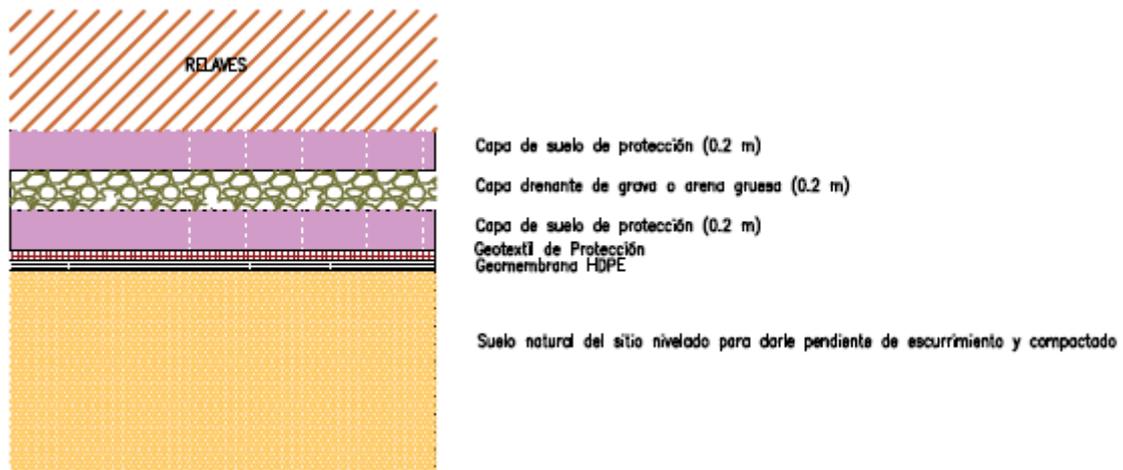


**Figura 37: Configuración del revestimiento inferior de la Alternativa 1 (elaboración propia)**

Se presenta a continuación otra alternativa de capas aislantes, que también cumplen las exigencias mínimas para evitar la dispersión y migración del residuo según sus características contaminantes y de degradación. Para ello se ha tenido en cuenta que en su estado actual el material a enterrar no genera lixiviados y que con la cubierta de aislación superior se elimina el ingreso y egreso de agua. De arriba hacia abajo:

Capa de suelo de protección (20cm)	Reemplazables por geocompuesto drenante.
Geotextil tejido para separación	
Capa drenante de gravilla o arena gruesa	
Geotextil tejido para separación	
Capa de suelo natural de protección, con tamaño máximo de 3/8" (20cm)	
Geomembrana de HDPE de 60mil	
Geotextil de amortiguamiento y protección (cushion)	
Suelo natural del sitio nivelado para darle pendiente de escurrimiento y compactado	

El geocompuesto drenante consiste en una geomalla y una geomembrana

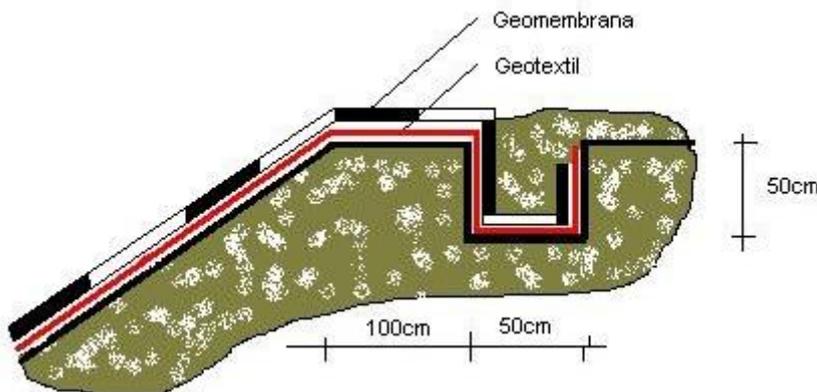


**Figura 38: Configuración del revestimiento inferior de la Alternativa 1 (elaboración propia)**

Según el diseño propuesto para la cubierta superior, esta no permitirá el ingreso de humedad de los residuos, aislando a los mismos de las variaciones del medio externo (humedad, temperatura, viento, precipitación), y el material poroso y la capa de arcilla inferiores los aislará de la napa freática, lo que posibilitará que los residuos de deslave mantengan una condición de humedad invariable y muy baja.

En el borde se ejecutará un anclaje para la geomembrana , uniendo la de la cubierta y de la barrera de fondo.

El anclaje de los bordes de las membranas de la excavación y cubierta consistirá en una zanja cuadrada con dimensiones mínimas de 50 cm de profundidad y ancho, excavada a lo largo del perímetro de la celda. Este tipo de anclaje es característico de las obras de impermeabilización o de refuerzo de taludes. Se recomienda que la excavación esté separada a una distancia de al menos 1m desde el pie del talud de relleno. Los bordes de las 2 membranas se deben soldar y colocar siguiendo el contorno dela zanja, que se llena posteriormente de suelo compactado. Posteriormente se coloca una cuneta perimetral en el lado externo, para captación del agua que escurre por el talud de relleno. Se debe tener en cuenta que debido a la pendiente del talud del relleno, el agua puede tender a erosionar la cubierta de suelo superior, por lo que se recomienda aplicar un tratamiento anti erosión a estos taludes.



**Figura 39: Detalle de anclaje en zanja (Recuperado de <https://www.igc.com.pe/conoce-metodos-de-anclaje-para-geomembranas-hdpe/>)**

Cabe destacar que la barrera de protección superior, no permitirá la alteración de las condiciones de humedad de los residuos, aislando a los mismos de las variaciones del medio externo (humedad, temperatura, viento, precipitación), y el material poroso y la capa de arcilla inferiores los aislará de la napa freática, garantizándose la constancia de la capacidad de retención de agua de los mismos.

## **5.5. ASPECTOS OPERATIVOS Y RECOMENDACIONES**

Para la ejecución del proyecto se requerirá contar con el siguiente equipo de trabajo:

- Excavadora 320, que siempre estará excavando; 2 tatu de 20m<sup>3</sup>, pala cargadora de la serie 600 con balde de 2 m<sup>3</sup>, compactador estático de tipo pata de cabra de 20 tn, compactador dinámico de tipo rodillo liso, cargadora frontal.
- En la etapa 3 se requerirá otra excavadora y 2 tatu y un compactador. Serán necesarios los 2 equipos de compactación.

### **5.5.1. Estrategia operacional recomendada para ejecutar el proyecto**

Se sugiere avanzar cavando por fajas sucesivas, de 12 m x 60 m, que al final se integran en un solo volumen. La excavación se llevará a cabo con taludes 2:1.

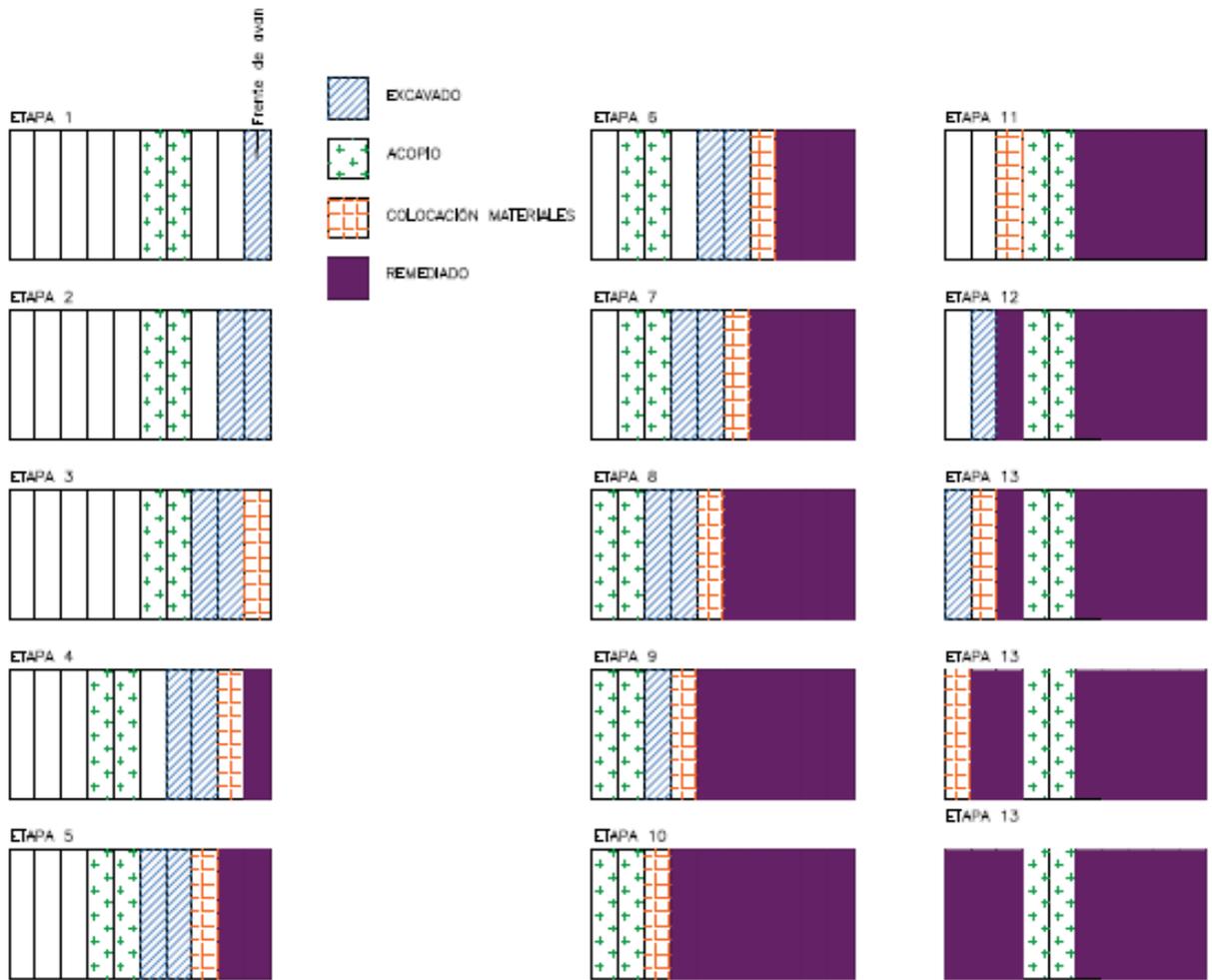
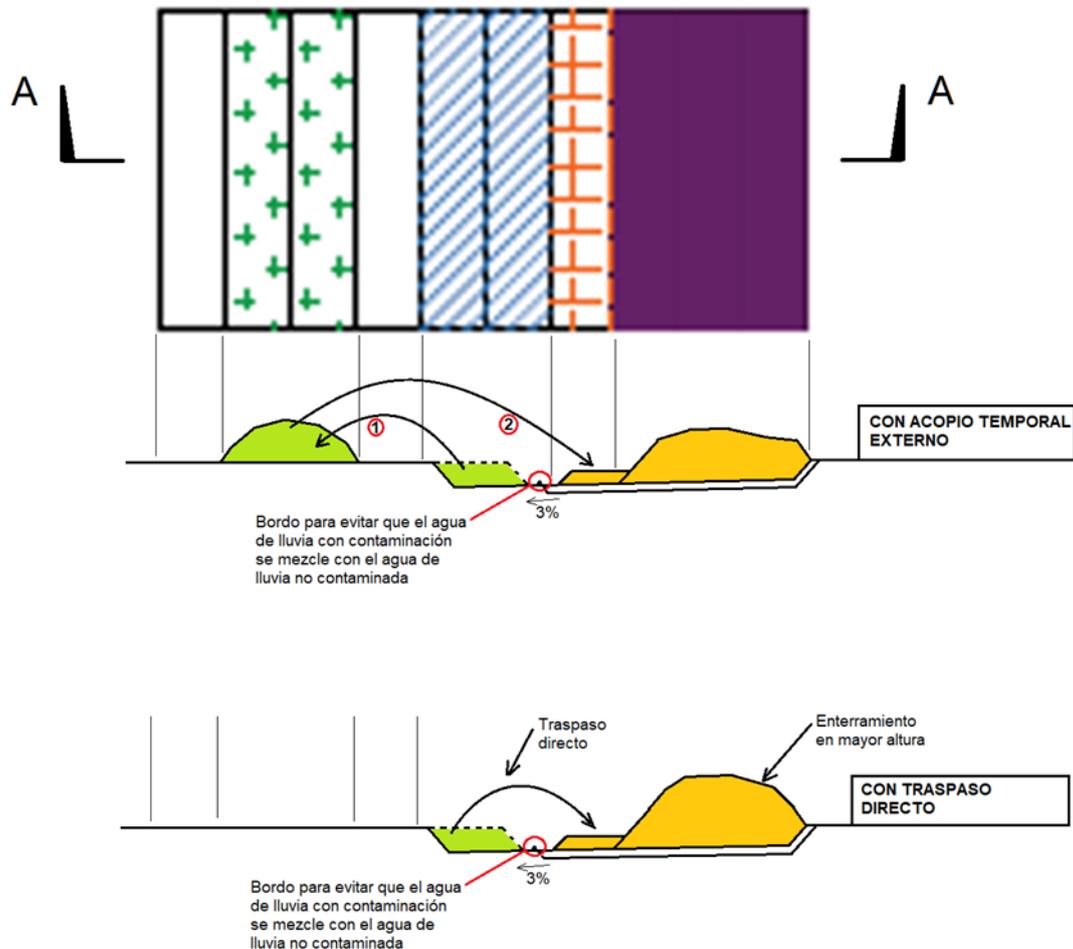


Figura 40: Etapas de la excavación (elaboración propia)



**Figura 41: Detalle de borde (elaboración propia)**

A medida que se avanza en la excavación, cuando se va rellenando con material contaminado, se puede materializar un borde de 30 cm para evitar que el agua de contaminación se mezcle con el agua no contaminada, es decir que el agua que caiga del lado de contaminación quede ahí.

Para el acopio temporal

También se puede utilizar lonas TARPS para tapar los camiones y acopios.

### 5.5.2. Instalaciones Accesorias

**Alambrado Perimetral:** Con el propósito de evitar el acceso al sitio de personas no autorizadas

En caso de que la inversión inicial del proyecto deba ser reducida, se puede instalar una cerca que encierre solo las instalaciones iniciales del proyecto, dejando por fuera terreno que será utilizado en ampliaciones futuras.

**Pantalla Vegetal:** Se preverá la instalación de una cortina vegetal compuesta por especies de árboles de crecimiento rápido y follaje cerrado para controlar la acción del

viento sobre el sitio. Para minimizar el volado de polvo contaminado durante la excavación y para limitar la visual desde el exterior

Resistencia del fondo de excavación: Deberá garantizarse que el substrato geológico es suficientemente estable para evitar asentamientos que puedan causar daños a la barrera natural o artificial.

- Aislación de la cobertura superior: La cobertura superficial final del relleno sanitario estará constituida por una capa de suelo compactado de 0.70 m de espesor. La topografía y las pendientes de la cobertura final en cualquier punto del encapsulado, deberán ser diseñadas de modo de lograr el escurrimiento de las aguas pluviales alejándolas del módulo y evitar la acumulación de agua en la superficie.
- Accesos y circulación interna: El acceso al relleno y la red de caminos internos deberá garantizar el tránsito permanente de vehículos y equipos de obra al centro de disposición final y a la zona de operaciones, independientemente de las condiciones meteorológicas.
- Retranqueo en la vecindad de calles y casas.

#### **5.6. VERIFICACIÓN DE ESTABILIDAD PARA TALUDES 2:1 PARA SUELOS CON $\Phi > 0$**

Como la superficie del terreno no es horizontal, una componente de la gravedad ocasionará que el suelo se mueva hacia abajo. Si esa componente, es lo suficientemente grande, ocurre la falla y la masa de suelo se desliza hacia abajo. La fuerza actuante vence a la fuerza resistente en ese caso. Para el análisis hace falta comparar ambas fuerzas a lo largo de la superficie más probable de falla.

La mayoría de análisis convencionales por estabilidad se hacen suponiendo que la curva de deslizamiento potencial es un arco de círculo. Los procedimientos se dividen en procedimiento por masa y por dovelas.

La estabilidad de taludes se define mediante el valor del factor de seguridad. Para cada circunferencia de falla se tiene un factor de seguridad y el objetivo es obtener el mínimo factor de seguridad, para éste compararlo con el factor de seguridad de la norma. Si  $FS < 1$ , el talud es estable Si  $FS \geq 1$ , el talud es estable y seguro

Ensayo de Compresión Triaxial - Consolidado Drenado								
Pozo	Salto	Profundidad (m)	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$e_o$	$w_{Nat}$ (%)	Parámetros Resistentes		Observaciones
						$\phi'$	c (Kpa)	
1	1	1,00	1,34	1,001	19,92	20°	11	
	2	1,00	1,37	0,964	18,55			
	3	1,00	1,30	1,062	18,82			
4	1	3,20	1,28	1,107	14,78	28°	0	
	2	3,20	1,33	1,024	-----			
	3	3,20	1,37	0,954	-----			

**Tabla 5: Resultados Obtenidos de Ensayo de Compresión Triaxial en condiciones drenadas sobre muestras inalteradas ensayadas en condición de saturación (Informe final, 2009)**

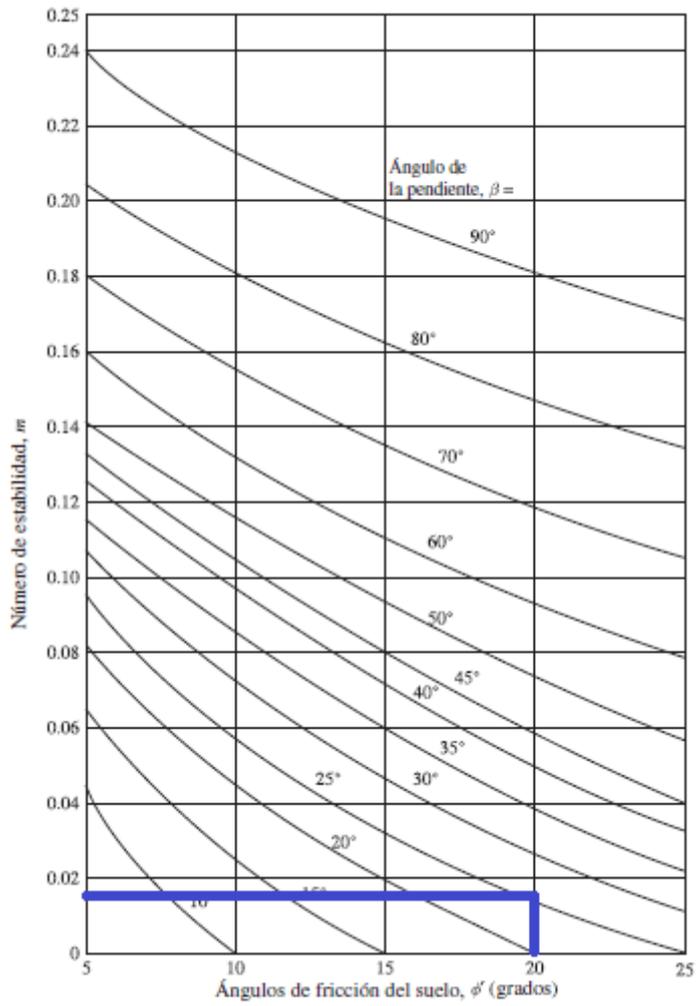
Tenemos, en el pozo 1:

- ángulo de fricción interna =  $\Phi = 20^\circ$
- Ángulo de pendiente =  $\beta = 26,56^\circ$
- cohesión= 11 kN/m<sup>2</sup>

peso unitario del suelo seco  $\gamma_d = 1,34 \text{ gr/cm}^3 = 13,14 \text{ kN/m}^3$

altura de excavación = H = 5 m

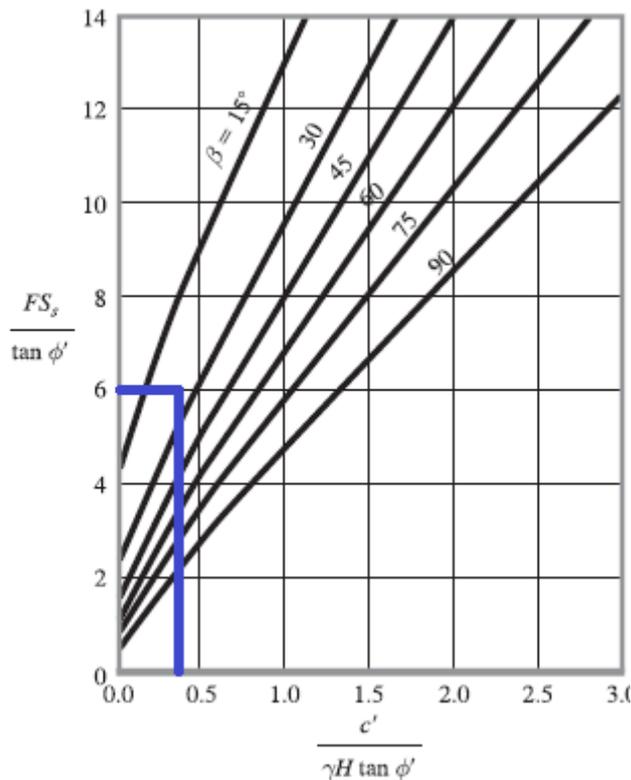
Ingresando a la gráfica "Número de estabilidad de Taylor " con  $\beta$  y  $\Phi$



Se obtiene  $m = 0,018 = cd/\gamma H$

Por tanto  $H_{cr} = c/\gamma m = 11/(13,14 \cdot 0,018) = 46,5 \text{ m VERIFICA}$

$c/\gamma H \text{ tg } \Phi = 11/(16)(5)(\text{tg } 20^\circ) = 0,37$



Resulta  $FS / \tan \Phi = 6$  por tanto  $FS = 6 \cdot \tan 20^\circ = 2,18$  **VERIFICA**

Respecto al pozo 2:

Para suelos granulares, con cohesión nula,  $c = 0$ , y el factor de seguridad,  $FS_s$ , se hace igual a  $(\tan \Phi) / (\tan \beta)$ . Esto indica que, en talud infinito en la arena, el valor de  $FS_s$  es independiente de la altura  $H$ , y el talud es estable, siempre y cuando  $\beta < \Phi$ . En nuestro caso  $\beta = 26,56$  y  $\Phi = 28^\circ$  siendo el talud 2:1 seguro para llevar a cabo la excavación.

## 5.7. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PROYECTO.

Todo sitio requiere contar con una zona administrativa para operar. Como parte del proceso tienes que se liberará una zona excavando el suelo contaminado que pudiera haber y rellenando con suelo limpio y nivelando para tener un sector de operaciones, tal como se indica en la figura. Se remedia la totalidad del sitio, pero se concentrará en un área que ocupará la mitad del predio.

El encapsulado se ejecutara en un primer módulo que ocupa la mitad del predio y sus dimensiones son 120 m x 120 m y un segundo módulo que se ejecutará en el cuarto restante de dimensiones 60 m x 40 m. La profundidad para excavar teniendo en cuenta lo que se estima hasta donde llegó la contaminación y los espesores del revestimiento inferior y cubierta serán 5 m. La cubierta tendrá un espesor total de 1,5 m y se plantean 2 alternativas de barrera de fondo; una de 1,5 m y otra que ocupa un espesor de unos 0,7 m.

Luego, hay que tener en cuenta que el nivel del suelo no puede quedar al nivel de terreno natural, sino debe quedar con una superficie convexa y con una sobre elevación que permita el drenaje positivo. Tiene quedar convexo y con

sobreelevación. Además de favorecer el escurrimiento al aumentar volumen en altura se reducen las cantidades de aislación y cubierta, y se aumenta la altura del enterramiento.

Al quedar el residuo confinado en una menor área, se va a tener un volumen adicional para ir colocándolo ahí sin necesidad de acopiar, reduciendo el manipuleo y la exposición al contaminante.

Se adopta una cubierta como la que se muestra en la figura, teniendo una altura en cúspide de 4,5 m

Es decir, la altura en la que se contendrá el residuo será de  $4,5 \text{ m} + 5 \text{ m} - 3 \text{ m}$  (espesores de cubierta y revestimiento inferior) = 6,5 m

Si habrá una espera larga entre una etapa y la otra en la ejecución de los módulos, habrá que cerrar la primera etapa completa con cubierta, vegetación y zanja perimetral. Pero al comenzar la segunda etapa se puede continuar enterrando contra el costado de la primera etapa y al final emparejar la altura de las dos. Te quedará un poco de cubierta de la primera enterrado por el residuo de la segunda etapa, pero eso no es problema. Eso sí, a la membrana superior de la segunda etapa tienes que soldarla a la membrana de la primera etapa allá arriba, excavando la cubierta de la primera y descubriendo la membrana que está enterrada.

Lo importante en estos casos es que el diseño cubra ambas etapas (no se debe hacer dos diseños por separado), para que todo quede establecido desde el inicio y la unión se haga bien. Y para que elementos como el camino de acceso hacia arriba sea uno solo al final.

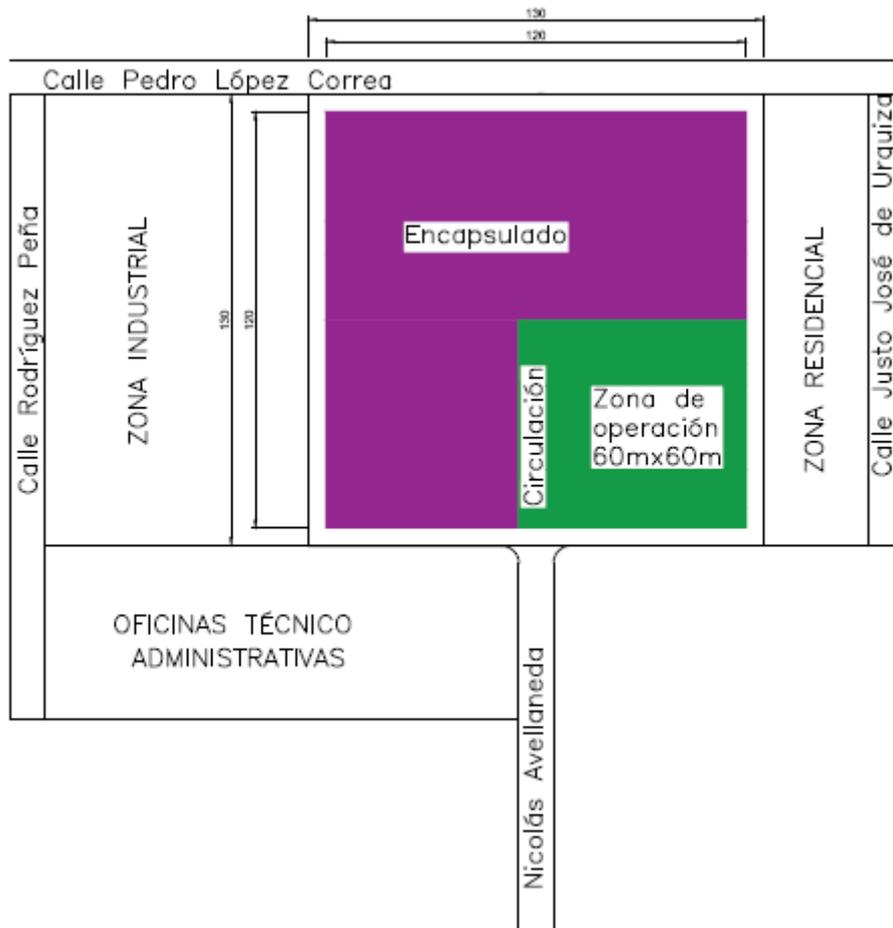
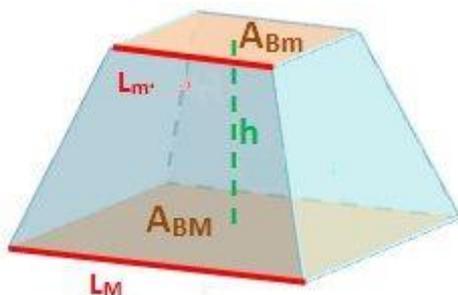


Figura 42: Detalle en planta del predio (Elaboración propia)

Cálculo del volumen de suelo contaminado

El relleno sanitario será en trinchera, con un talud 2:1 (H:V). y una profundidad total de 5 m. Una vez obtenido el volumen total a disponer, se utiliza la ecuación de la pirámide truncada para calcular las longitudes de cada lado del relleno.



$$Volumen = \frac{h}{3} (A_{BM} + A_{Bm} + \sqrt{A_{BM} \cdot A_{Bm}})$$

La superficie en la que se ejecutará el relleno de seguridad es de 120 m x 120 m = 14400 m<sup>2</sup> Estas dimensiones corresponden al área mayor.

En cuanto al área menor, ya que se adoptan taludes interiores de 2:1 y siendo la profundidad de excavación de 4 m:

$$\text{Lado mayor} = 120 \text{ m} - 2 \times 8 \text{ m} = 104 \text{ m}$$

$$\text{Lado menor} = 120 \text{ m} - 2 \times 8 \text{ m} = 104 \text{ m}$$

Es decir, el área menor es de 104 m x 104 m = 10826 m<sup>2</sup>

Por tanto, el volumen a remediar, en una primera aproximación es:

*Volumen de suelo a remediar*

$$\begin{aligned} &= \frac{4 \text{ m}}{3} (14400 \text{ m}^2 + 10826 \text{ m}^2 + \sqrt{14400 \text{ m}^2 + 10816 \text{ m}^2}) \\ &= 33846,4 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Suponiendo que se adopta la barrera con espesor 1,5 m y cubierta 1,5 m, el área unitaria en el que cabe el residuo es:

Volumen / Área = 33846,6 m<sup>3</sup>/306,94 m<sup>2</sup> =110,27 m lineales se necesitan para cubrir el suelo contaminado

$$\text{Volumen} / \text{Área} = 33846,6 \text{ m}^3/351,68\text{m}^2=96,24 \text{ m}$$

## 5.8. CÓMPUTO MÉTRICO

Todo sitio requiere contar con una zona administrativa para operar. Como parte del proceso tienes que se liberará una zona excavando el suelo contaminado que pudiera haber y rellenando con suelo limpio para tener un sector de operación

El área de revestimiento de fondos y taludes es:

$$\text{Área de fondo} = 40 \text{ m} \times 100 \text{ m} = \mathbf{4000 \text{ m}^2}$$

**Área de taludes:**

$$\text{Perímetro mayor} = 120 \text{ m} \times 2 + 60 \text{ m} \times 2 = 360 \text{ m}$$

$$\text{Perímetro menor} = 100 \text{ m} \times 2 + 40 \text{ m} \times 2 = 280 \text{ m}$$

$$\text{Área de taludes} = [(280 \text{ m} + 360 \text{ m})/2] \times 5\text{m} = \mathbf{1600 \text{ m}^2}$$

Para la cubierta:

$$\text{Longitud de la cubierta: } L_c = 2$$

$$\text{Longitud lineal: } L_l = 60 \text{ m}$$

Calculo un "factor de curvatura":  $L_c/L_I = 1,03$

Área de cubierta =  $(120m \times 60m) = 7200 \text{ m}^2$

Multiplicando por el factor:  $7200 \text{ m}^2 * 1,03 = 7416 \text{ m}^2$

### 5.9. PRESUPUESTO DE AMBAS ALTERNATIVAS

El total de obra con IVA incluido:

OBRA: REMEDIACIÓN DE "EL CHICHÓN"						
1	ENCAPSULADO					
1.1	Excavación del vaso de acopio	m3	105.60	\$ 261.38	\$ 27,601.73	
1.2	Provisión y colocación de materiales de revestimiento inferior (Alternativa 1)	m2	7,200.00	\$ 3,902.43	\$ 28,097,496.00	
1.3	Colocación de los desechos de dióxido de uranio en el relleno	m3	160.00	\$ 228.93	\$ 36,628.80	
1.4	Provisión y colocación de materiales de cubierta	m3	7,416.00	\$ 1,996.22	\$ 14,803,967.52	
<b>TOTAL ENCAPSULADO ALTERNATIVA 1</b>						<b>\$ 42,965,694.05</b>
1.1	Excavación del vaso de acopio	m3	105.60	\$ 261.38	\$ 27,601.73	
2.1.3	Provisión y colocación de materiales de revestimiento inferior (Alternativa 2)	m2	7,200.00	\$ 2,777.19	\$ 19,995,768.00	
1.3	Colocación de los desechos de dióxido de uranio en el relleno	m3	160.00	\$ 228.93	\$ 36,628.80	
1.4	Provisión y colocación de materiales de cubierta	m3	7,416.00	\$ 1,996.22	\$ 14,803,967.52	
<b>TOTAL ENCAPSULADO ALTERNATIVA 2</b>						<b>\$ 34,863,966.05</b>

**Tabla 6: Presupuesto de Alternativa 1 y 2**

Se plantean dos alternativas, una que se adapta más a los requerimientos especificados por la EPA de residuos peligrosos, teniendo en cuenta las características propias de un residuo de baja radiactividad; y otra, más económica, pero que cumple con los requerimientos mínimos para evitar la dispersión de este contaminante en el ambiente.

## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES

Esta práctica se realizó para los desechos provenientes de una planta química que extrae uranio del mineral (que normalmente se obtiene de una mina subterránea o a cielo abierto). El mineral se tritura y el uranio se separa del lixivante para convertirse en torta amarilla, un óxido de uranio ( $U_3O_8$ ) en forma líquida o en polvo; luego se coloca en barriles y se envía a plantas de conversión y enriquecimiento donde se fabrica como combustible para reactores nucleares. Los desechos sólidos y líquidos producidos durante este proceso se denominan material derivado de uranio o relaves. El subproducto de uranio material o relaves contiene uranio residual, radio y metales pesados. El radón-222 es generado por la desintegración radiactiva del radio-226.

La actividad industrial que involucra al Uranio produce una gran cantidad de desechos radiactivos que deben ser gestionados y permanecer seguros. Si bien los relaves contienen un 85% del mineral original, pero después de la descomposición de algunos radionúclidos de vida media corta, esa radiactividad asciende a un 70% de los valores iniciales. Aun así se trata de radiactividad de baja actividad; pero, el peligro radiológico persistirá por largos períodos de tiempo, siendo necesario tomar medidas para cerrar adecuadamente instalaciones después de finalizar las operaciones, garantizando condiciones seguras y estables, y que las emisiones de radiactivos u otros contaminantes se mantengan por debajo de los límites reglamentarios y tan bajas como sea posible.

El proceso de molienda de uranio extrae aproximadamente el 90 por ciento del uranio del mineral, dejando aproximadamente el 10 por ciento en los relaves. Debido a que el proceso de molienda extrae sólo el uranio del mineral, los relaves también contienen concentraciones originales de otros radionucleidos en la cadena de descomposición del uranio, como el torio 230, el radio 226 y el radón 222 y sus productos de descomposición. Otros contaminantes no radiactivos incluyen metales (como molibdeno, arsénico y selenio), que también suelen encontrarse contenidos en el mineral de uranio. A su vez, se utilizaron productos químicos (como el ácido nítrico y el ácido sulfúrico) en el proceso de lixiviación de uranio, introduciendo así una fuente adicional de contaminación no radiológica. Por lo que es necesario remediar el sitio del caso práctico, como así también las ex minerías como la de Los Gigantes. Esa cantidad de relaves que fueron abandonados en estructuras que seguramente se han erosionado con el tiempo y han permitido que los desechos radiactivos se filtren en el ecosistema circundante exponiendo a comunidades a niveles peligrosos de radiactividad

Por otro lado, durante la desintegración radiactiva, se liberan rayos gamma junto con radiación alfa y beta. Los rayos gamma emiten fotones. Son similares a la luz visible, pero tienen una energía mucho mayor. En comparación con los rayos X, los rayos gamma generalmente son más energéticos. Los mismos no tienen masa y pueden viajar largas distancias y penetrar la piel y los órganos internos del cuerpo. Dependiendo de su energía, los rayos gamma también pueden penetrar materiales sólidos como el hormigón o el acero. A diferencia de la radiación alfa y beta, que liberan energía en forma de partículas, la radiación gamma es energía electromagnética. Por esto, es

importante ejecutar un plan de monitoreo para la radiación gamma dentro y fuera del sitio una vez ejecutada la remediación.

El presente anteproyecto fue realizado con objetivo de proponer una solución para restaurar el medio ambiente, tanto como sea posible, dentro de los términos de razonabilidad económica y técnica coherentes a los medios con los que contamos en nuestro país y provincia. Teniendo en cuenta, para ello, los estudios y análisis necesarios para identificar los impactos que se estima que ya se produjeron o potenciales, sabiendo las vías y rutas de exposición típicas de este contaminante y cómo afecta a los distintos medios. Una vía ambiental generalmente implica el movimiento o transporte de contaminantes a través de medios ambientales (a una población receptora o un individuo después de que el contaminante se libera al medio ambiente. Para que ocurra el transporte desde la fuente al receptor, el radionúclido debe ser transportado por un fluido, ya sea aire o agua. En ambos casos, el radionúclido puede existir en solución o asociado con partículas sólidas. En el agua, la división de un elemento entre formas disueltas y adsorbidas es una función tanto de las características de la solución como de las superficies adsorbentes. Las vías contaminantes hacia los humanos pueden ser muy complejas. Tanto los contaminantes radiactivos como los químicos pueden transportarse a través de las mismas vías. La forma y la composición química de los contaminantes influyen en su dispersión en el medio ambiente.

En el capítulo 4 de este informe se pretendió presentar, en base a la información disponible, cuáles son las tecnologías demostradas como efectivas para el tratamiento de medios sólidos (suelos, sedimentos, lodos y desechos sólidos) contaminados radiactivamente. Esto se debe a que, a diferencia de los desechos peligrosos no radiactivos, que contiene productos químicos modificables por procesos físicos, químicos o biológicos que pueden reducir o destruir su peligrosidad, los desechos radiactivos no pueden ser alterados de manera similar. Mientras el isótopo puede tener ciertas características químicas que controlarán su concentración en solución, la forma y la tasa de descomposición de un radioisótopo suele ser más significativa que su concentración. El riesgo para la salud va a tener que ver con velocidad a la que se desintegra un radioisótopo dado y el tipo de transformación a la que se somete. Los radioisótopos pueden tener efectos sobre los organismos vivos que son directamente o indirectamente relacionados con la emisión de radiación ionizante. Por otra parte, podría decirse que el decaimiento radiactivo es más simple que la descomposición de un compuesto orgánico, por ejemplo, ya que ocurre independientemente de condiciones ambientales o la concentración de cualquier otra especie química. Con respecto a la potencia biológica de estos materiales, la EPA clasifica todos los radionucleidos como carcinógenos del Grupo A ya que existe evidencia suficiente proporcionada por estudios epidemiológicos de cánceres inducidos por radiación en humanos (Tablas Sumarias de Evaluación de Efectos de Salud de la EPA, 1991). Esta clasificación se basa en su propiedad de emitir dicha radiación ionizante y en el amplio peso de la evidencia. También son una preocupación potencial debido a sus efectos no cancerígenos sobre la salud.

El tipo de remediación que se desarrolló fue el de encapsulado, el más común de los métodos de disposición, planteando dos alternativas posibles: una que se ajusta más a los requerimientos para residuos peligrosos, teniendo en cuenta las características del

contaminante; y otra, que si bien es más simplificada, con objetivo de generar una opción más económica, es funcional. Este es en muchos casos el método más conveniente, económico y mejor entendido para la eliminación de desechos. Entre las desventajas del mismo pueden mencionarse como almacenamiento de material de desecho a muy largo plazo. Los contaminantes depositados en vertederos generalmente no se destruyen ni disminuyen su toxicidad. A la vez, que los requisitos impuestos por las reglamentaciones RCRA y el DR aumentan significativamente el costo de los vertederos debido a los requisitos para una seguridad más estricta del sitio. A ello deben sumarse los costos de monitoreo, operación y gestión a largo plazo que no se contemplaron en el cómputo y presupuesto. Por otra parte, es bastante probable que se presente resistencia pública local a la ubicación de los vertederos en un área muy poblada como lo es Alta Córdoba. Sin embargo, sigue siendo un método de eliminación viable y rentable, además que se puede pensar en algún otro post-clausura en el que se pueda reaprovechar el terreno.

Para el diseño era imprescindible Instalar revestimientos adecuados de muy baja permeabilidad (material sintético o de arcilla) para minimizar la infiltración y evitar la acumulación de agua. Se analizaron ambos materiales, y para cumplir dicha función sería más adecuado trabajar con una Geomembrana de HPDE de 0,76mm, ya que la arcilla presenta límite de contracción muy alto, es difícil de manejar en épocas de lluvia y tiene un margen de trabajabilidad muy reducido y debe ser transportada en camiones. El HDPE es de bajo costo, comercialmente, muy estable químicamente, mecánicamente resistentes y flexibles. Aunque se requiere mano de obra calificada para operar equipos de moldeo y fusión.

Como otra conclusión importante, se recomienda profundizar en el estudio de una solución basada en la inmovilización o fijación química in situ para poder producir sólidos químicamente estables con características mejoradas de contención y manejo de contaminantes. La solidificación de desechos es el término utilizado para describir el proceso de sorber un desecho líquido o semilíquido en un medio sólido, como cenizas volantes, cemento, polvo de horno o arcilla, o incorporar los desechos en una matriz sólida. La solidificación puede implicar la adición de agentes cementantes para que el material sólido (con el líquido sorbido) se pueda formar en un monolito impermeable independiente. Esta parte del proceso de tratamiento de residuos reduce la superficie a través de la cual puede ocurrir la transferencia o pérdida de contaminantes. La estabilización de los desechos se refiere a la alteración química de los desechos para reducir el potencial de escape de contaminantes o disminuir la toxicidad de componentes de desechos específicos. Tanto la solidificación como la estabilización química dan como resultado la transformación de desechos líquidos o semisólidos a una forma ambientalmente más segura.

De los ligantes inorgánicos se recomienda el cemento Portland que presenta una enorme diversidad de aplicaciones sobre un rango amplio de residuos peligrosos, y que es un material muy común en la construcción y resulta accesible y económicamente conveniente en comparación a otros. Se procede en su ejecución de la siguiente manera: se usa retroexcavadora, se inyecta mortero de agua y cemento, se hinca, se los mezcla y de esta forma se genera un lodo rico en cemento; se empieza a mezclar y va trabajando en "cuadros".

Lo que se conseguiría con esta solución, respecto al encapsulado planteado, es que no se necesitaría acopio, no generaría polvo; logrando una menor manipulación y exposición, mejor protección y reducción de tiempo; también cumpliendo con el objetivo de reducir la liberación de radón y la radiactividad asociada sin necesidad de excavar. Aunque si bien la solidificación puede funcionar, inicialmente, se desconoce su efectividad a largo plazo y otro inconveniente a tener en cuenta es que el volumen de residuos aumenta debido a la adición del aglomerante; los aditivos, y particularmente el cemento, agregan considerablemente peso al lodo; si resulta una mezcla de baja resistencia, puede ser vulnerable a la lixiviación de contaminantes; la presencia de sales de Mn, Sn, Cu y Pb puede aumentar el tiempo de sedimentación y reducir la resistencia física de la matriz de cemento; y materias orgánicas como el limo y la arcilla dificultarán el proceso de asentamiento. Y también resulta conveniente tener referencia de experiencias previas que hayan aplicado con éxito esta remediación. Pero podría resultar una técnica barata y eficiente en la que se recomienda profundizar. Se deberían llevar a cabo pruebas de resistencia mecánica, siguiendo las normas ASTM C-109, C-305 y C-2309. También sería necesario determinar las características tóxicas de lixiviación del material en cuestión, mediante el método Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

En tanto se profundice con la estabilización y solidificación, con los análisis y ensayos necesarios; el encapsulado propuesto cumple con los objetivos ambientales, y se recomienda llevarlo a cabo dado que los riesgos (exposición a radiación gamma, la inhalación e ingestión de partículas radiactivas en el aire, la ingestión de agua superficial o subterránea contaminada por los relaves, y la ingestión de alimentos que pudieran haber sido contaminados) asociados a estos residuos son conocidos y que se ha tratado de dar una explicación en esta práctica; y no existen obstáculos tecnológicos para dar una solución a ellos, protegiendo así la salud de las personas y el medio ambiente.

## BIBLIOGRAFÍA

Abdelouas, A (2006) "*Uranium Mill Tailings: Geochemistry, Mineralogy, and Environmental Impact*" Pp. 335-342

Bligh, G. (2009). "*Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities*"

Bernad I., Sanz García J., Dorado Valiño M., Villar Fernández S. (2007) "*Técnicas de recuperación de suelos contaminados*"

Comisión Nacional de Energía Atómica "*Etapas de la producción del combustible nuclear*" Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/cnea/aplicaciones/ciclo-del-combustible-nuclear/etapas>

Comisión Nacional de Energía Atómica (2005) "*Proyecto de Restitución Ambiental de la Minería del Uranio (PRAMU): Evaluación ambiental - Documento marco*" Pp. 48-55

Comision Nacional de Energia Atomica "*Uranium mining environmental restoration Project*"

Das Braja M. (2001) "*Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*".

Energy Information Administration (2019) "*Nuclear explained: The nuclear fuel cycle*" Recuperado de: <https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/the-nuclear-fuel-cycle.php>

Enger E, Smith B. (1995) "*A Study of Interrelationships*"

International Atomic Energy Agency "*Environmental Contamination from Uranium Production Facilities and their Remediation*" Pp. 5-6

International Atomic Energy Agency (2004). "*The long term stabilization of uranium mill tailings*" Pp. 59-60

International Atomic Energy Agency (2013) "*Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues*" Technical Reports Series No 474

International Atomic Energy Agency (2001)" *Performance of engineered barrier materials in near surface disposal facilities for radioactive waste*"

Laboratorio de Geotecnia (2009) "*Estudios de estabilidad estructural del suelo de fundación en el largo plazo, y su relación con una gestión in situ del Sitio Cordoba.*" Informe final, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba,

Ley N° 24.051., Decreto 831/93 para Residuos Peligrosos, del 24 de abril de 1993. Recuperado de: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/10000-14999/12830/norma.htm>

Meegoda J., Hettiarachchi H., Hettiaratchi J. (2016) "*Landfill Design and Operation*". Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/307436757\\_Landfill\\_Design\\_and\\_Operation](https://www.researchgate.net/publication/307436757_Landfill_Design_and_Operation)

Nuclear Energy Agency Organisation For Economic Co-Operation And Development (2014) "*Managing Environmental and Health Impacts of Uranium Mining*"

Sellers K. (1998) "*Fundamentals of Hazardous Waste Site Remediation*"

Sharma H.D. y Reddy K.R. (2004) "*Geoenviromental Engineering: Site remediation, waste containment and Emerging Waste Management Technologies*"

Smith G., Weston R., Inc (1999) "*Evolution Of Disposal Cell Cover Design Used For Uranium Mill Tailings Long-Term Containment*"

U.S. Army Corps of Engineers (1994) "*Technical Guidelines for Hazardous and Toxic Waste Treatment and Cleanup Activities*"

U.S. Department of Energy (1996) "*Uranium Mill Tailings Remedial Action Project 1995 Environmental Report*"

United States Environmental Protection Agency (1989) "*Technical Guidance Document: Final Covers on Hazardous Waste Landfills and Surface Impoundments*"

United States Environmental Protection Agency (1993) "*Technical Support For Amending Standards for Management Of Uranium Byproducts Material*"

United States Environmental Protection Agency (2007) "*Revisions to National Emission Standards for Radon Emissions From Operating Mill Tailings*"

United States Environmental Protection Agency (2009) "*Health Risk of Radon*". Recuperado de: <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon>

United States Environmental Protection Agency (2009) "*Technology Reference Guide for Radioactively Contaminated Media de United States*"

Renovables verdes "*El gas radón y los problemas que causa en nuestra salud*". Recuperado de: <https://www.renovablesverdes.com/gas-radon/>

Solis J. (2011) "*Desarrollo de un Sistema Económico para Monitorear Radón en Instalaciones Industriales y de Vivienda*". Recuperado de [https://www.researchgate.net/figure/Diagrama-de-porcentaje-de-radiacion-natural-y-artificial-que-esta-expuesta-la-poblacion\\_fig1\\_316441925](https://www.researchgate.net/figure/Diagrama-de-porcentaje-de-radiacion-natural-y-artificial-que-esta-expuesta-la-poblacion_fig1_316441925)

Vesilind et al., (2002) "*Landfill Design and Operation*" Recuperado de: [https://www.researchgate.net/figure/Example-liner-systems-Source-Adapted-from-Vesilind-et-al-2002\\_fig3\\_307436757](https://www.researchgate.net/figure/Example-liner-systems-Source-Adapted-from-Vesilind-et-al-2002_fig3_307436757)

Yeung A. (2010) "*Remediation Technologies for Contaminated Sites*"

# ANEXOS

## CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE RESUMEN

DESCRIPCIÓN		%	COEF.
COSTO DE LA OBRA	1		1.00
GASTOS GENERALES (...% de 1 )	2	30.00%	0.30
BENEFICIO (...% de 1 )	3	10.00%	0.10
<b>SUBTOTAL 1 + 2 + 3</b>	<b>4</b>		<b>1.40</b>
COSTO FINANCIERO (...% de 4 )	5	3.00%	0.04
<b>TOTAL 4 + 5</b>	<b>6</b>		<b>1.44</b>
IVA ( ...% de 6 )	7	21.00%	<b>0.30</b>
OTROS IMPUESTOS ( ...% de 6 )	8	2.72%	<b>0.04</b>

<b>Precio del ítem: 6 + 7 + 8</b>	<b>1.784</b>
-----------------------------------	--------------

<b>COEFICIENTE RESUMEN ADOPTADO - NO INCLUYE I.B.</b>	<b>1.784</b>
---	--------------

COD	RUBRO	SUB-RUBRO	ITEM	UN	PRECIO \$
M613	ÁRIDOS		Geotextil de protección	m2	\$ 289.26
M614	ÁRIDOS		Geomembrana HDPE	m2	\$ 319.36
M615	ÁRIDOS		Suelo arcilloso	m3	\$ 315.52
M616	ÁRIDOS		Canto rodado 6-19 mm	m3	\$ 2,892.56

PLANILLA DE MANO DE OBRA									
MES	COD	CATEGORIA	SALARIO	PRESENTISMO	JORNAL DIRECTO	BENEFICIOS SOCIALES	SEGURO OBREROS	OTROS	JORNAL TOTAL
			(\$/ hora)	20.00%	(2) + (3)	67.28%	9.17%	30.00%	(\$/ hora)
		1	2	3	4	5	6	7	8
VIGENTE DESDE 1 DE AGOSTO DE 2019	MO1	Oficial Especializado	\$ 186.17	\$ 37.23	\$ 223.40	\$ 150.30	\$ 20.49	\$ 55.85	\$ 450.04
	MO2	Oficial	\$ 158.63	\$ 31.73	\$ 190.36	\$ 128.07	\$ 17.46	\$ 47.59	\$ 383.48
	MO3	Medio oficial	\$ 146.26	\$ 29.25	\$ 175.51	\$ 118.08	\$ 16.09	\$ 43.88	\$ 353.56
	MO4	Ayudante	\$ 134.27	\$ 26.85	\$ 161.12	\$ 108.40	\$ 14.77	\$ 40.28	\$ 324.57
	MO5	Sereno (\$/mes)	\$ 24,362.77	\$ 4,872.55	\$ 29,235.32	\$ 19,669.52	\$ 2,680.88	\$ 7,308.83	\$ 58,894.55

		DÓLAR	\$	85.00	18/3/2020			
COD	MAQUINA / HERRAMIENTAS	MARCA	POTENCIA	UN	PRECIO \$	PRECIO U\$	FECHA	
	<b>MOVIMIENTO DE SUELO</b>							
MVS1	Retro-Pala	CAT 416 F2	92 HP		\$ 8,075,000.00	\$ 95,000.00	jul-19	
MVS2	Camion		160 HP		\$ 4,250,000.00	\$ 50,000.00	jul-19	
MVS3	Minicargadora	BOBCAT S175	46 HP		\$ 3,867,500.00	\$ 45,500.00	jul-19	
MVS4	Minicargadora c/martillo	BOBCAT S175	46 HP		\$ 5,397,500.00	\$ 63,500.00	jul-19	
MVS5	Minicargadora c/retroexcavadora	BOBCAT S176	46 HP		\$ 5,482,500.00	\$ 64,500.00	jul-19	
MVS6	Minicargadora	BOBCAT S630	74 HP		\$ 4,930,000.00	\$ 58,000.00	jul-19	
MVS7	Minicargadora c/martillo	BOBCAT S630	74 HP		\$ 6,460,000.00	\$ 76,000.00	jul-19	
MVS8	Minicargadora c/retroexcavadora	BOBCAT S630	74 HP		\$ 6,545,000.00	\$ 77,000.00	jul-19	
MVS9	Retroexcavadora b/1,2 m3	KOMATSU PC200	146 HP		\$ 15,674,000.00	\$ 184,400.00	jul-19	
MVS10	Tunelera hidraulica		12.5 HP		\$ 150,000.00		jul-19	
MVS11	Retro-Pala c/martillo		92 HP		\$ 9,775,000.00	\$ 115,000.00	jul-19	
MVS12	Camion Volcador	Ford	150 HP		\$ 5,355,000.00		jul-19	
MVS13	Camión Regador		70 HP		\$ 1,375,000.00			
MVS14	Motoniveladora	CATERPILLAR MODELO 140	170 HP		\$ 13,684,664.54			
MVS15	pala cargadora 2m3	Heli	182 HP		\$ 7,216,500.00	84900		
MVS16								
	<b>COMPACTADORES</b>							
MVC1	Vibroapisonador	Honda	6.5 HP		\$ 34,132.23		ene-19	
MVC2	Vibroapisonador	Wacker	4 HP		\$ 70,247.93		ene-19	
MVC3	Vibrador de inmersión		4 HP		\$ 7,382.64		ene-19	
MVC4	Rodillo Neumatico Asfalto	DYNAPAC	95 HP		\$ 1,275,000.00			
MVC5	Rodillo autopropulsado vibrante	TORTONE	125 HP		\$ 5,622,750.00	\$ 66,150.00		
MVC6	Compactador Rodilllo Liso	TORTONE	71 HP		\$ 3,213,000.00	\$ 37,800.00		
MVC7	Aplanadora	DYNAPAC	110 HP		\$ 11,421,411.75	\$ 134,369.55		
MVC8	Rodillo Pata de Cabra Autopropulsado		111 HP		\$ 9,520,000.00	\$ 112,000.00		

OBRA: REMEDIACIÓN DE "EL CHICHÓN"

VOLVER

ANALISIS DE PRECIOS



Item	1.2	Unidad
Designación	Provisión y colocación de materiales de revestimiento inferior (Alternativa 1)	m2

CODIGO

**A) EJECUCION**

RENDIMIENTO:	350.00	m2/día
--------------	--------	--------

EQUIPOS	CANT.	HP EQ	HP EQ TOT.	\$ EQ	\$ EQ TOT.
Rodillo autopropulsado vibrante	2	125	250	\$ 5,622,750.00	\$ 11,245,500.00
Camión Regador	1	70	70	\$ 1,375,000.00	\$ 1,375,000.00
Retro-Pala	2	92	184	\$ 8,075,000.00	\$ 16,150,000.00
Camion	2	160	320	\$ 4,250,000.00	\$ 8,500,000.00
<b>TOTALES</b>			824	\$	37,270,500.00

MVC5  
mvs13  
MVS1  
MVS2

**AMORTIZACION:**

37,270,500	8	hs/día	\$/día	29,816.40
	10000	hs		

**INTERESES:**

37,270,500	0.1	8	hs/día	\$/día	7,454.10
2	2000	hs/a			

**REPARACIONES Y REPUESTOS:**

75% de Amortización	\$/día	22,362.30
---------------------	--------	-----------

**COMBUSTIBLES:**

0.150	lts/hp.h x	824	hp x	8	hs/día x	\$	53.19	\$/lts =	\$/día	52,594.27
	Generador			0	hs/día x	\$	49.19	\$/lts =	\$/día	0.00

C1  
C2

**LUBRICANTES:**

50.0% de Combustibles	\$/día	26,297.14
-----------------------	--------	-----------

**MANO DE OBRA:**

Ayudante	2.00	Pers. x	8	hs/día x	324.57	\$/hs =	\$/día	5,193.12
Oficial	0.00	Pers. x	8	hs/día x	383.48	\$/hs =	\$/día	0.00
Oficial Especializado	7.00	Pers. x	8	hs/día x	450.04	\$/hs =	\$/día	25,202.24

MO4  
MO2  
MO1

**COSTO DIARIO**

\$/día	168,919.57
--------	------------

**COSTO UNITARIO EJECUCION: (A)**

\$/m2	482.63
-------	--------

**B) MATERIALES**

MATERIALES	CANT.	UNID.	COSTO	UNID.	COEFIC.		
Geotextil de protección	1	m2	289.26	\$/m2	1.05	\$/ml	303.72
Geomembrana HDPE	1	m2	319.36	\$/m2	1.05	\$/ml	335.33
Suelo arcilloso	1.2	m3	315.52	\$/m3	1.05	\$/ml	397.56
Canto rodado 6-19 mm	0.22	m3	2,892.56	\$/m3	1.05	\$/ml	668.18

m613  
m614  
m615  
m616

**COSTO UNITARIO MATERIALES : (B)**

\$/m2	1,704.78
-------	----------

**C) OTROS RECURSOS**

RECURSO	CANT.	UNID.	COSTO	UNID.	COEFIC.		
						\$/m2	0.00

**COSTO UNITARIO OTROS RECURSOS : (C)**

\$/m2	0.00
-------	------

**COSTO UNITARIO TOTAL: (A) + (B) + (C)**

\$/m2	2,187.41
-------	----------

**COEFICIENTE DE RESUMEN**

1.7840

**PRECIO DEL ITEM**

\$/m2	3,902.43
-------	----------

ADOPTADO = 3,902.43 \$/m2

OBRA: REMEDIACIÓN DE "EL CHICHÓN"

VOLVER

ANALISIS DE PRECIOS



Item	1.1	Unidad
Designación	Excavación del vaso de acopio	m3

CODIGO

**A) EJECUCION**

RENDIMIENTO:	900.00	m3/día
--------------	--------	--------

EQUIPOS	CANT	HP EQ	HP EQ TOT.	\$ EQ	\$ EQ TOT.
Retroexcavadora b/1,2 m3	1	146	146	\$ 15,674,000.00	\$ 15,674,000.00
Camion	2	160	320	\$ 4,250,000.00	\$ 8,500,000.00
pala cargadora 2m3	1	182	182	\$ 7,216,500.00	\$ 7,216,500.00
<b>TOTALES</b>			648.0	\$	31,390,500.00

MVS9  
MVS2  
mvs15

<b>AMORTIZACION:</b>	31,390,500	8	hs/día			\$/día	25,112.40
		10000	hs				

<b>INTERESES:</b>	31,390,500	0.1	8	hs/día		\$/día	6,278.10
	2	2000	hs/a				

<b>REPARACIONES Y REPUESTOS:</b>	75% de Amortización					\$/día	18,834.30
----------------------------------	---------------------	--	--	--	--	--------	-----------

<b>COMBUSTIBLES:</b>	0.150	lts/hp.h x	648.0	hp x	8	hs/día x	\$ 53.19	\$/lts =	\$/día	41,360.54
		Generador			0	hs/día x	\$ 49.19	\$/lts =	\$/día	0.00

C1  
C2

<b>LUBRICANTES:</b>	50.0% de Combustibles					\$/día	20,680.27
---------------------	-----------------------	--	--	--	--	--------	-----------

<b>MANO DE OBRA:</b>	Ayudante	2.00	Pers. x	8	hs/día x	324.57	\$/hs =	\$/día	5,193.12
	Oficial	0.00	Pers. x	8	hs/día x	383.48	\$/hs =	\$/día	0.00
	Oficial Especializado	4.00	Pers. x	8	hs/día x	450.04	\$/hs =	\$/día	14,401.28

MO4  
MO2  
MO1

<b>COSTO DIARIO</b>						\$/día	131,860.02
---------------------	--	--	--	--	--	--------	------------

<b>COSTO UNITARIO EJECUCION: (A)</b>						\$/m3	146.51
--------------------------------------	--	--	--	--	--	-------	--------

**B) MATERIALES**

MATERIALES	CANT.	UNID.	COSTO	UNID.	COEFIC.		
						\$/m3	0.00

<b>COSTO UNITARIO MATERIALES : (B)</b>						\$/m3	0.00
--	--	--	--	--	--	-------	------

**C) OTROS RECURSOS**

RECURSO	CANT.	UNID.	COSTO	UNID.	COEFIC.		
						\$/m3	0.00

<b>COSTO UNITARIO OTROS RECURSOS : (C)</b>						\$/m3	0.00
--	--	--	--	--	--	-------	------

<b>COSTO UNITARIO TOTAL: (A) + (B) + (C)</b>						\$/m3	146.51
--	--	--	--	--	--	-------	--------

<b>COEFICIENTE DE RESUMEN</b>	1.7840
-------------------------------	--------

<b>PRECIO DEL ITEM</b>		\$/m3	261.38
------------------------	--	-------	--------

<b>ADOPTADO =</b>	261.38	\$/m3
-------------------	--------	-------

OBRA: REMEDIACIÓN DE "EL CHICHÓN"

VOLVER

ANALISIS DE PRECIOS

←

Item	1.3	Unidad
Designación	Colocación de los desechos de dióxido de uranio en el relleno	m3

CODIGO

**A) EJECUCION**

RENDIMIENTO:	1,200.00	m3/día
--------------	----------	--------

EQUIPOS	CANT	HP EQ	HP EQ TOT.	\$ EQ	\$ EQ TOT.
Rodillo autopropulsado vibrante	2	125	250	\$ 5,622,750.00	\$ 11,245,500.00
Camión Regador	1	70	70	\$ 1,375,000.00	\$ 1,375,000.00
Camion	2	160	320	\$ 4,250,000.00	\$ 8,500,000.00
pala cargadora 2m3	2	182	364	\$ 7,216,500.00	\$ 14,433,000.00
<b>TOTALES</b>			1,004	\$	35,553,500.00

mvc5  
mvs13  
mvs2  
mvs15

**AMORTIZACION:**

35,553,500	8	hs/día			\$/día	20,316.29
	14000	hs				

**INTERESES:**

35,553,500	0.1	8	hs/día		\$/día	7,110.70
2	2000	hs/a				

**REPARACIONES Y REPUESTOS:**

75% de Amortización					\$/día	15,237.21
---------------------	--	--	--	--	--------	-----------

**COMBUSTIBLES:**

0.140	Its/hp.h x	1,004	hp x	8	hs/día x	\$ 53.19	\$/Its =	\$/día	59,811.09
	Generador			0	hs/día x	\$ 49.19	\$/Its =	\$/día	0.00

C1  
C2

**LUBRICANTES:**

50.0% de Combustibles						\$/día	29,905.55
-----------------------	--	--	--	--	--	--------	-----------

**MANO DE OBRA:**

Ayudante	0.00	Pers. x	8	hs/día x	324.57	\$/hs =	\$/día	0.00
Oficial	0.00	Pers. x	8	hs/día x	383.48	\$/hs =	\$/día	0.00
Oficial Especializado	6.00	Pers. x	8	hs/día x	450.04	\$/hs =	\$/día	21,601.92

MO4  
MO2  
MO1

**COSTO DIARIO**

\$/día	153,982.76
--------	------------

**COSTO UNITARIO EJECUCION: (A)**

\$/m3	128.32
-------	--------

**B) MATERIALES**

MATERIALES	CANT.	UNID.	COSTO	UNID.	COEFIC.

\$/m3	0.00
-------	------

m52

**COSTO UNITARIO MATERIALES : (B)**

\$/m3	0.00
-------	------

**C) OTROS RECURSOS**

RECURSO	CANT.	UNID.	COSTO	UNID.	COEFIC.

\$/m3	0.00
-------	------

ph1

**COSTO UNITARIO OTROS RECURSOS : (C)**

\$/m3	0.00
-------	------

**COSTO UNITARIO TOTAL: (A) + (B) + (C)**

\$/m3	128.32
-------	--------

**COEFICIENTE DE RESUMEN**

1.784

**PRECIO DEL ITEM**

\$/m3	228.93
-------	--------

**ADOPTADO = \$ 228.93 \$/m3**

OBRA: REMEDIACIÓN DE "EL CHICHÓN"

VOLVER

ANALISIS DE PRECIOS



Item	1.40	Unidad
Designación	Provisión y colocación de materiales de cubierta	m3

CODIGO

**A) EJECUCION**

RENDIMIENTO:	900.00	m3/día
--------------	--------	--------

EQUIPOS	CANT	HP EQ	HP EQ TOT.	\$ EQ	\$ EQ TOT.
Rodillo autopropulsado vibrante	1	125	125	\$ 5,622,750.00	\$ 5,622,750.00
Camión Regador	1	70	70	\$ 1,375,000.00	\$ 1,375,000.00
Retro-Pala	1	92	92	\$ 8,075,000.00	\$ 8,075,000.00
Camion	1	160	160	\$ 4,250,000.00	\$ 4,250,000.00
<b>TOTALES</b>			447.0	\$	19,322,750.00

MVC5  
mvs13  
MVS1  
MVS2

**AMORTIZACION:**

19,322,750	8	hs/día			\$/día	11,041.57
	14000	hs				

**INTERESES:**

19,322,750	0.1	8	hs/día		\$/día	3,864.55
2	2000	hs/a				

**REPARACIONES Y REPUESTOS:**

75% de Amortización					\$/día	8,281.18
---------------------	--	--	--	--	--------	----------

**COMBUSTIBLES:**

0.140	lts/hp.h x	447.0	hp x	8	hs/día x	\$ 53.19	\$/lts =	\$/día	26,629.04
	Generador			0.5	hs/día x	\$ 49.19	\$/lts =	\$/día	24.60

C1  
C2

**LUBRICANTES:**

50.0% de Combustibles						\$/día	13,314.52
-----------------------	--	--	--	--	--	--------	-----------

**MANO DE OBRA:**

Ayudante	2.00	Pers. x	8	hs/día x	324.57	\$/hs =	\$/día	5,193.12
Oficial	0.00	Pers. x	8	hs/día x	383.48	\$/hs =	\$/día	0.00
Oficial Especializado	7.00	Pers. x	8	hs/día x	450.04	\$/hs =	\$/día	25,202.24

MO4  
MO2  
MO1

**COSTO DIARIO**

\$/día	93,550.82
--------	-----------

**COSTO UNITARIO EJECUCION: (A)**

\$/m3	103.95
-------	--------

**B) MATERIALES**

MATERIALES	CANT.	UNID.	COSTO	UNID.	COEFIC.
Suelo arcilloso	1.2	m3	315.52	\$/m3	1
Canto rodado 6-19 mm	0.22	m3	2,892.56	\$/m3	1

M615  
M616

**COSTO UNITARIO MATERIALES : (B)**

\$/m3	1,014.99
-------	----------

**C) OTROS RECURSOS**

RECURSO	CANT.	UNID.	COSTO	UNID.	COEFIC.

\$/m3	0.00
-------	------

**COSTO UNITARIO OTROS RECURSOS : (C)**

\$/m3	0.00
-------	------

**COSTO UNITARIO TOTAL: (A) + (B) + (C)**

\$/m3	1,118.93
-------	----------

**COEFICIENTE DE RESUMEN**

1.7840

**PRECIO DEL ITEM**

\$/m3	1,996.22
-------	----------

**ADOPTADO = 1,996.22 \$/m3**

OBRA: REMEDIACIÓN DE "EL CHICHÓN"

VOLVER

ANALISIS DE PRECIOS



Item	2.1.3	Unidad
Designación	Provisión y colocación de materiales de revestimiento inferior (Alternativa 2)	m2

CODIGO

**A) EJECUCION**

RENDIMIENTO:	400.00	m2/día
--------------	--------	--------

EQUIPOS	CANT	HP EQ	HP EQ TOT.	\$ EQ	\$ EQ TOT.
Rodillo autopropulsado vibrante	2	125	250	\$ 5,622,750.00	\$ 11,245,500.00
Camión Regador	1	70	70	\$ 1,375,000.00	\$ 1,375,000.00
Retro-Pala	2	92	184	\$ 8,075,000.00	\$ 16,150,000.00
Camion	2	160	320	\$ 4,250,000.00	\$ 8,500,000.00
<b>TOTALES</b>			504.0	\$	28,770,500.00

MVC5  
mvs13  
MVS1  
MVS2

<b>AMORTIZACION:</b>	28,770,500	8	hs/día			\$/día	23,016.40
		10000	hs				

<b>INTERESES:</b>	28,770,500	0.1	8	hs/día		\$/día	5,754.10
	2	2000	hs/a				

<b>REPARACIONES Y REPUESTOS:</b>	75% de Amortización					\$/día	17,262.30
----------------------------------	---------------------	--	--	--	--	--------	-----------

<b>COMBUSTIBLES:</b>	0.150	lts/hp.h x	504.0	hp x	8	hs/día x	\$ 53.19	\$/lts =	\$/día	32,169.31
		Generador			0	hs/día x	\$ 49.19	\$/lts =	\$/día	0.00

C1  
C2

<b>LUBRICANTES:</b>	50.0%	de Combustibles						\$/día	16,084.66
---------------------	-------	-----------------	--	--	--	--	--	--------	-----------

<b>MANO DE OBRA:</b>	Ayudante	2.00	Pers. x	8	hs/día x	324.57	\$/hs =	\$/día	5,193.12
	Oficial	0.00	Pers. x	8	hs/día x	383.48	\$/hs =	\$/día	0.00
	Oficial Especializado	7.00	Pers. x	8	hs/día x	450.04	\$/hs =	\$/día	25,202.24

MO4  
MO2  
MO1

<b>COSTO DIARIO</b>						\$/día	124,682.13
---------------------	--	--	--	--	--	--------	------------

<b>COSTO UNITARIO EJECUCION: (A)</b>						\$/m2	311.71
--------------------------------------	--	--	--	--	--	-------	--------

**B) MATERIALES**

MATERIALES	CANT.	UNID.	COSTO	UNID.	COEFIC.		
Geotextil de protección	1.00	m2	289.26	\$/m2	1	\$/m2	289.26
Geomembrana HDPE	1.00	m2	319.36	\$/m2	1	\$/m2	319.36
Canto rodado 6-19 mm	0.22	m3	2,892.56	\$/m3	1	\$/m2	636.36

M613  
M614  
M616

<b>COSTO UNITARIO MATERIALES : (B)</b>						\$/m2	1,244.98
--	--	--	--	--	--	-------	----------

**C) OTROS RECURSOS**

RECURSO	CANT.	UNID.	COSTO	UNID.	COEFIC.		
						\$/m2	0.00

<b>COSTO UNITARIO OTROS RECURSOS : (C)</b>						\$/m2	0.00
--	--	--	--	--	--	-------	------

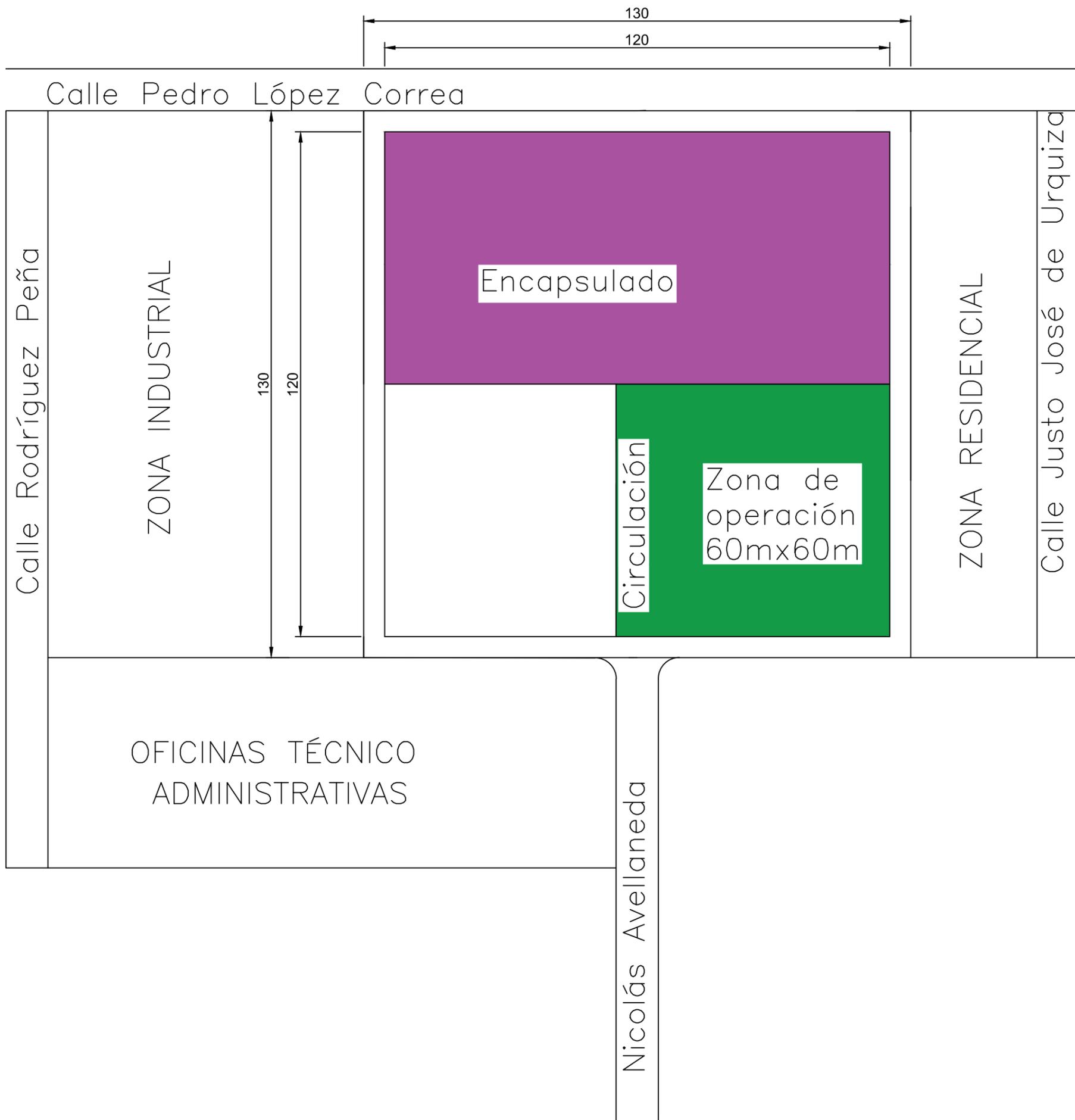
<b>COSTO UNITARIO TOTAL: (A) + (B) + (C)</b>						\$/m2	1,556.69
--	--	--	--	--	--	-------	----------

<b>COEFICIENTE DE RESUMEN</b>	1.7840						
-------------------------------	--------	--	--	--	--	--	--

<b>PRECIO DEL ITEM</b>						\$/m2	2,777.19
------------------------	--	--	--	--	--	-------	----------

<b>ADOPTADO =</b>	2,777.19	\$/m2
-------------------	----------	-------

# A3



NOMBRE DE PROYECTO  
REMEDIACIÓN  
DE "EL CHICHÓN"

PLANO:  
ÁREA DEL  
ENCAPSULADO

AUTOR  
Viviana Farias

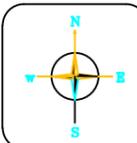
ESCALA  
1:100

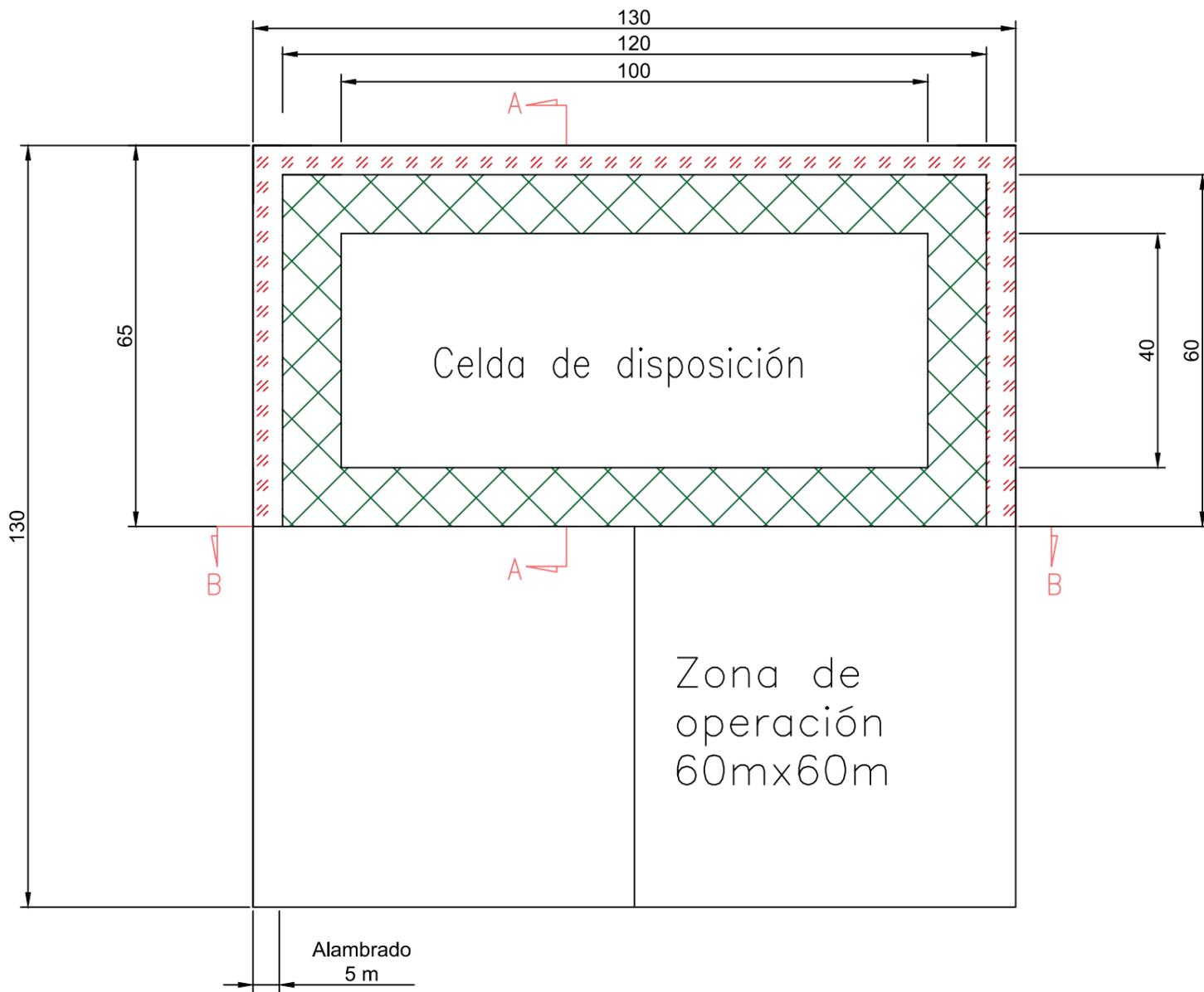
A3

DIBUJO N°  
1

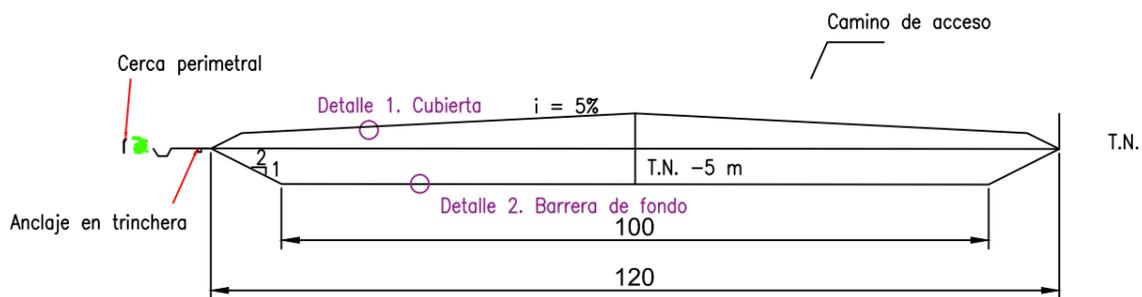
REVISION:  
-

UNIT:  
-

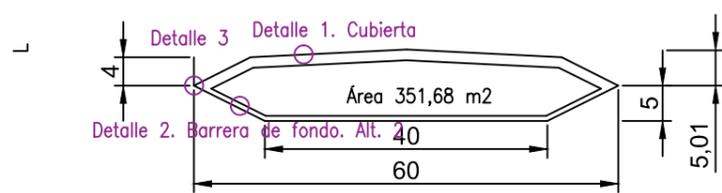




Corte B-B



Corte A-A Alt. 1



Alt. 2



A3

NOMBRE DE PROYECTO  
 REMEDIACIÓN  
 DE "EL CHICHÓN"

PLANO:  
 DIMENSIONES DE  
 LOS MÓDULOS

AUTOR  
 Viviana Farias

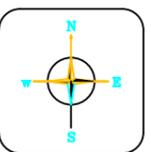
ESCALA  
 1:100

A3

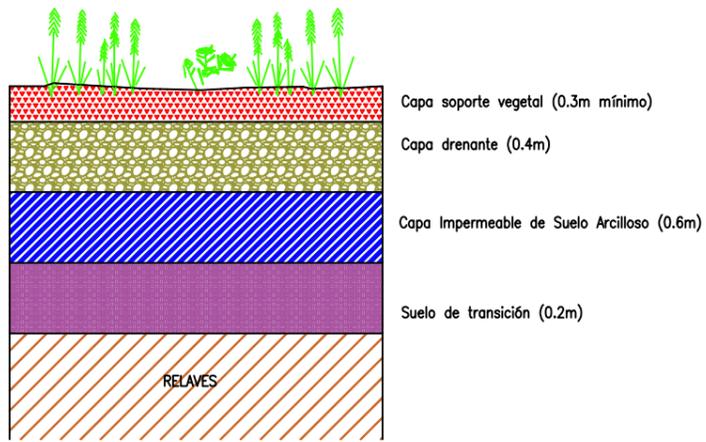
DIBUJO N°  
 2

REVISION:  
 -

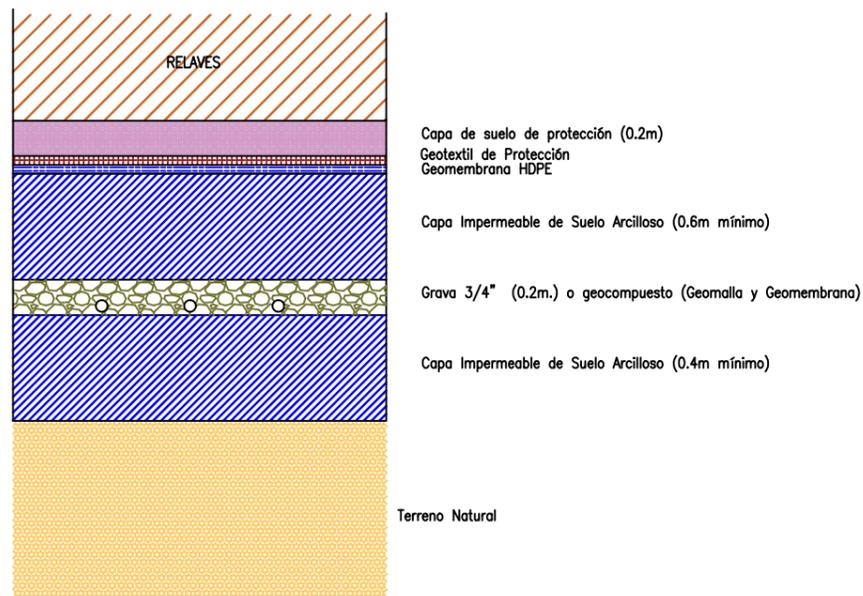
UNIT:  
 -



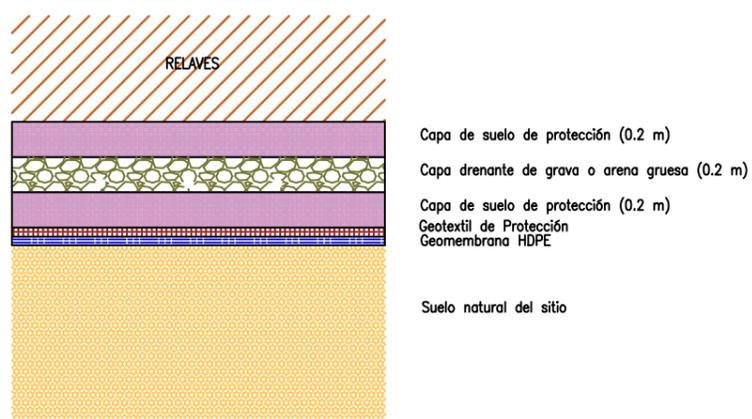
Sistema de cubierta y Capa aislante inferior  
 Alternativa 1  
 Detalle 1



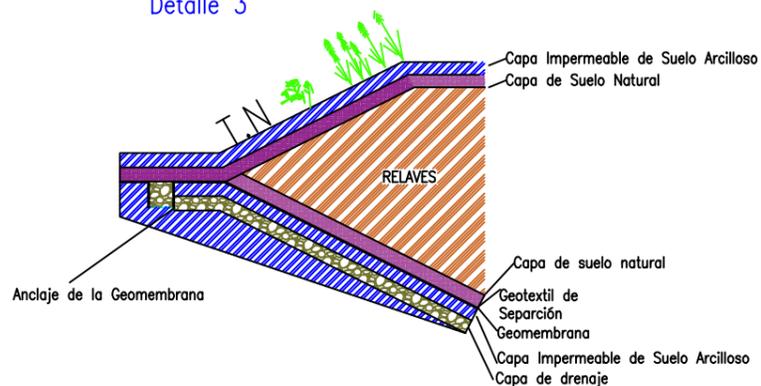
Detalle 2 Alternativa 1



Detalle 2 Alternativa 2



Detalle 3



NOMBRE DE PROYECTO  
 REMEDIACIÓN  
 DE "EL CHICHÓN"

PLANO:  
 DETALLES DE  
 CUBIERTA Y REV.  
 INF.

AUTOR  
 Viviana Farias

ESCALA  
 -

A3

DIBUJO N°  
 3

REVISIÓN:  
 -

UNIT:  
 -

