



CURSO/GUÍA PRÁCTICA INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIACTIVOS DE ALTA ACTIVIDAD GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)



Índice

¿QUÉ APRENDERÁ?	20
Introducción.	21
PARTE PRIMERA	23
Fundamentos de la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF	23
Capítulo 1: Contexto histórico, político y normativo de la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF	23
1. Historia de la gestión de residuos radiactivos	23
a. Primeros métodos y lecciones iniciales	23
b. Evolución hacia la disposición geológica	25
c. Hitos internacionales clave	27
2. Marco regulatorio internacional	28
a. IAEA y estándares mundiales	28
b. OECD/NEA y acuerdos bilaterales	29
c. Benchmarking de requisitos	30
3. Legislación	31
a. Directivas de la Unión Europea	31
b. Leyes y reglamentos nacionales	32
c. Órganos de supervisión y control	33
4. Gobernanza y participación ciudadana	35
a. Modelos de voluntariado comunitario	35
b. Mecanismos de consulta pública	35
c. Estudios de consentimiento informado	36
5. Comunicación y percepción social	37
a. Encuestas de opinión pública	37
b. Estrategias de divulgación didáctica	39
c. Gestión de controversias y crisis	40
6. Casos prácticos de políticas nacionales	41
a. Suecia y Finlandia	41
b. Canadá y Japón	43
c. Lecciones extraídas para la guía	45
Capítulo 2: Caracterización de residuos radiactivos de alta actividad en la ingeniería geológica: GDF	48
1. Tipología y clasificación de alta actividad	48
a. Combustible gastado	48
b. Residuos de reprocesamiento	49
c. Subproductos de medicina e I+D	50
2. Propiedades físico-químicas y radiactivas	51
a. Composición isotópica	51
b. Generación de calor y corrosión	52
c. Vida media y liberación de dosis	54

3. Acondicionamiento y embalaje previo	55
a. Inmovilización en matrices vítreas	55
b. Contenedores metálicos y cerámicos	56
c. Protocolos de transporte seguro	57
4. Inventarios nacionales y proyecciones	59
a. Métodos de cálculo de inventario	59
b. Escenarios de generación futura	60
c. Sensibilidades críticas	62
5. Movilidad de radionúclidos en la geosfera	63
a. Mecanismos de migración	63
b. Interacciones suelo-agua	64
c. Datos de laboratorio y campo	65
6. Ejemplos de caracterización detallada	67
a. Central A (caso de estudio)	67
b. Planta de reprocesado B	68
c. Recomendaciones metodológicas	69
Capítulo 3: Principios de seguridad y protección radiológica en la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF	71
1. Defensa en profundidad	71
a. Concepto y niveles de barrera	71
b. Implementación en diseño	73
c. Ejemplos de robustez	74
2. Seguridad pasiva a largo plazo	76
a. Ventajas frente al mantenimiento activo	76
b. Diseño sin intervención humana	77
c. Casos de fiabilidad comprobada	78
3. Evaluación probabilística de riesgos (FEPs)	79
a. Identificación y clasificación de FEPs	79
b. Modelos Monte Carlo y sensibilidad	80
c. Gestión de incertidumbres	81
4. Límites de dosis y estándares de exposición	82
a. Comparación con fondo natural (2,7 mSv/año)	82
b. Umbral GDF (0,02 mSv/año adicional)	83
c. Métodos de demostración de cumplimiento	84
5. Protección humana y ambiental	85
a. Radioprotección de operarios	85
b. Salvaguarda de ecosistemas	87
c. Indicadores de seguimiento	88
6. Casos de análisis de seguridad	89
a. Revisiones europeas de safety case	89
b. Validación por pares internacionales	90
c. Mejora continua y retroalimentación	91
PARTE SEGUNDA	92
Diseño y construcción de la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF	92

Capítulo 4: Selección y caracterización del emplazamiento para la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF 92

1. Criterios geológicos esenciales	92
a. Estabilidad estructural a largo plazo	92
b. Propiedades litológicas y mineralógicas.....	94
c. Historia tectónica y evolución geodinámica	96
2. Estudios geotécnicos y perforaciones exploratorias	98
a. Métodos de sondeo y testificación	98
b. Ensayos in situ de resistencia	100
c. Modelización geomecánica 3D	102
3. Análisis hidrogeológico detallado	103
a. Cartografía de acuíferos profundos.....	103
b. Caracterización de flujos subterráneos.....	105
c. Simulaciones numéricas de transporte	106
4. Evaluación de riesgos naturales.....	108
a. Sismicidad y falla activa	108
b. Riesgos de inundación y glaciación	110
c. Impacto del cambio climático	111
5. Impacto ambiental y planes de mitigación	113
a. Afectación a ecosistemas locales	113
b. Programas de restauración y compensación	115
c. Monitorización previa a la construcción.....	116
6. Casos internacionales de emplazamiento	118
a. ONKALO (Finlandia)	118
b. Cigéo (Francia).....	119
c. Blue Ribbon Commission (EE UU)	121

Capítulo 5: Diseño de barreras naturales y artificiales en la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF.....123

1. Barrera geológica — roca huésped	123
a. Porosidad y permeabilidad.....	123
b. Integridad geoquímica a largo plazo	124
c. Formaciones ígneas, sedimentarias y salinas	125
2. Barreras de backfill	127
a. Bentonita y mezclas arcillosas	127
b. Cementos de baja alcalinidad.....	129
c. Ensayos de compatibilidad	130
3. Contenedores de residuos.....	132
a. Acero cobreado y aleaciones avanzadas	132
b. Dimensiones y tolerancias críticas	134
c. Modelos de corrosión acelerada	135
4. Interacción multibarrera	137
a. Sinergias entre roca y backfill	137
b. Modelos termo-hidro-mecánico-químicos.....	138
c. Validación experimental a escala real	140
5. Procesos termo-hidro-químicos (THC).....	142

a. Transferencia de calor y gradientes	142
b. Evolución de porosidad y presión	143
c. Plazos críticos de degradación	145

6. Referencias de barreras en proyectos piloto147

a. FEBEX (España)	147
b. EBS (Suiza)	148
c. Lecciones para el diseño final	150

Capítulo 6: Infraestructura y métodos de construcción subterránea en la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF.....152

1. Técnicas de excavación de túneles y cámaras.....152

a. TBM vs. voladura controlada	152
b. Ventajas y limitaciones técnicas	153
c. Selección según litología	155

2. Sistemas de soporte y entibación158

a. Pernos, anclajes y hormigón proyectado.....158

b. Instrumentación de convergencia	161
c. Control de estabilidad en tiempo real	163

3. Gestión de aguas de excavación164

a. Drenaje y bombeo	164
b. Tratamiento de efluentes	166
c. Criterios de vertido legal	168

4. Ventilación y control de calidad del aire170

a. Diseño de redes de ventilación	170
b. Filtrado de aerosoles radiactivos	172
c. Monitorización continua	174

5. Aseguramiento de calidad en obra176

a. Planes de control de procesos	176
b. Protocolos de inspección y ensayo	177
c. Gestión de no conformidades	179

6. Casos reales de construcción subterránea.....182

a. Estrategias de optimización de costes	182
b. Innovaciones tecnológicas	184
c. Lecciones aprendidas	185

PARTE TERCERA187

Operación, cierre y post-cierre en la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF187

Capítulo 7: Instalación de residuos y sellado operacional en la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF.....187

1. Recepción e inspección de contenedores187

a. Verificación documental	187
b. Ensayos de integridad	188
c. Trazabilidad digital	190

2. Colocación en túneles y cámaras191

a. Manipulación remota segura	191
-------------------------------------	-----



b. Sistemas de posicionamiento láser	193
c. Control dimensional final.....	194
3. Relleno y compactación de espacios	195
a. Selección de materiales de relleno.....	195
b. Ensayos de densidad y permeabilidad	196
c. Validación post-relleno	197
4. Sellado de accesos y pozos	198
a. Materiales de sellado definitivo	198
b. Inyección y curado.....	199
c. Pruebas de estanqueidad	201
5. Desmantelamiento de instalaciones auxiliares.....	203
a. Retirada de equipos.....	203
b. Gestión de residuos de obra	204
c. Restauración parcial de superficie	205
6. Lecciones de proyectos piloto.....	206
a. ONKALO Test Gallery	206
b. PRACLAY Heater (Bélgica).....	207
c. Mejores prácticas	208
Capítulo 8: Monitoreo y verificación en la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF	210
1. Instrumentación geotécnica y radiológica	210
a. Sensores de presión y deformación	210
b. Detectores de radiación gamma	211
c. Redes de comunicaciones.....	213
2. Sistemas de adquisición y análisis de datos.....	214
a. Plataformas SCADA / IIoT	214
b. Análisis en tiempo real	215
c. Alarmas y visualización GIS.....	216
3. Inspecciones y mantenimiento	217
a. Calendario de revisiones	217
b. Procedimientos de calibración	219
c. Gestión de incidencias	220
4. Protocolos de emergencia	221
a. Definición de umbrales críticos	221
b. Planes de respuesta rápida	222
c. Simulacros y formación	224
5. Vigilancia ambiental a largo plazo	225
a. Muestreo de agua y sedimentos	225
b. Control de biota indicadora.....	227
c. Publicación de informes periódicos	228
6. Estudios comparativos de redes internacionales	229
a. Sistema KBS-3 (Suecia)	230
b. Cigar Lake natural analogue (Canadá).....	231
c. Recomendaciones de mejora	231
Capítulo 9: Planificación de cierre y vigilancia post-cierre en la ingeniería geológica de	

residuos radiactivos de alta actividad: GDF233

1. Estrategias de transición a seguridad pasiva	233
a. Cronograma de actividades post-cierre	233
b. Responsabilidades institucionales.....	236
c. Garantías financieras	238
2. Modelización de evolución geológica a milenios	239
a. Escenarios de glaciación y tectónica	239
b. Deformaciones y cambios hidrológicos.....	241
c. Análisis de impacto a largo plazo.....	242
3. Programas de vigilancia post-cierre	243
a. Monitorización radiológica continua.....	243
b. Seguimiento de deformaciones lentas	244
c. Periodicidad y criterios de terminación	245
4. Conservación de la memoria del sitio	246
a. Señalización e inhibición de acceso	247
b. Archivos digitales y físicos	248
c. Comunicación intergeneracional	249
5. Gestión de incertidumbres residuales	250
a. Actualización periódica de FEPs	250
b. Planes de contingencia	251
c. Comunicación de riesgos a largo plazo	252
6. Casos de instalaciones cerradas	253
a. WIPP (EE UU)	253
b. Sellafield Legacy Ponds (RU).....	254
c. Lecciones aplicables.....	256

PARTE CUARTA258
Gestión integral, riesgos e información técnica de la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF.....258
Capítulo 10: Gestión documental y sistemas de información en la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF258

1. Bases de datos de residuos y geología	258
a. Estructuras de datos relacionales.....	258
b. Integración SIG-BIM	260
c. Seguridad y redundancia	262
2. Control de versiones y auditoría	264
a. Protocolos de registro	265
b. Firmas digitales y sellos de tiempo.....	266
c. Inspecciones regulatorias	268
3. Colaboración y comunicación técnica	271
a. Plataformas de trabajo compartido	271
b. Flujos de aprobación	273
c. Gestión de permisos y roles.....	275
4. Reportes de cumplimiento y transparencia.....	278
a. Formatos normalizados	278
b. Periodicidad y destinatarios	280

c. Mejora continua basada en feedback	282
5. Archivado y preservación digital a largo plazo.....	284
a. Estrategias de almacenamiento	284
b. Migración tecnológica	286
c. Acceso futuro garantizado	288
6. Caso de estudio: plataforma de gestión integrada en proyecto X.....	289
Capítulo 11: Evaluación de riesgos, incertidumbres y análisis económico en la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF.....	
292	
1. Identificación y clasificación de FEPs.....	292
a. Registro de eventos y procesos	293
b. Priorización según impacto	294
c. Documentación de supuestos	296
2. Modelización probabilística de riesgos	298
a. Simulaciones Monte Carlo	298
b. Análisis de sensibilidad	300
c. Gestión de incertidumbre residual	301
3. Análisis de costes a lo largo del ciclo de vida	303
a. Construcción y operación	303
b. Desmantelamiento y post-cierre	306
c. Escenarios de costes futuros	308
4. Estructuras de financiación y garantías	309
a. Fondos de provisión y fideicomiso	309
b. Seguros y coberturas.....	311
c. Mecanismos de financiación innovadores.....	312
5. Análisis multicriterio de sostenibilidad	314
a. Indicadores ambientales	314
b. Indicadores sociales y económicos.....	315
c. Matrices de decisión	317
6. Herramientas software de apoyo al análisis integrado	319
a. Plataformas de modelización 3D	319
b. Paquetes de gestión de riesgos	321
c. Suites de evaluación financiera	323
PARTE QUINTA	325
Herramientas didácticas y de apoyo para la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF	325
Capítulo 12: Formularios básicos para la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF	
325	
1. Formulario de perfil geológico y geotécnico.....	325
a. Datos de ubicación y coordenadas del emplazamiento	325
b. Características litológicas y estructurales principales	326
c. Parámetros geomecánicos (resistencia, módulo, densidad)	326
d. Testificación de sondeos y registros geofísicos	327
f. Observaciones sobre estabilidad y fracturación	328
2. Formulario de análisis hidrogeológico.....	328

a. Inventario de puntos de agua subterránea y niveles piezométricos	329
b. Resultados de ensayos de bombeo y permeabilidad	329
c. Conductividad hidráulica y porosidad efectiva del medio	330
d. Química del agua (pH, Eh, TDS, radionúclidos trazadores)	330
e. Modelización de flujos y mapas equipotenciales	331
f. Identificación de posibles rutas de migración de radionúclidos	332
3. Formulario de diseño de barreras artificiales	333
a. Especificación del contenedor (material, espesor, recubrimientos)	333
b. Composición y propiedades de la bentonita/backfill	334
c. Parámetros de corrosión y durabilidad a largo plazo	335
d. Esquemas de montaje y detalles de sellado periférico	336
e. Requisitos de fabricación y control de calidad de componentes	337
f. Ensayos de compatibilidad químico-mecánica con el residuo	338
4. Formulario de planificación de excavación subterránea	339
a. Métodos de excavación propuestos (TBM, perforación y voladura)	339
b. Secuencia de fases y diagrama de Gantt preliminar	340
c. Sección tipo de túneles y cámaras de disposición	341
d. Sistemas de soporte y entibación previstos	342
e. Gestión de aguas de excavación y drenaje temporal	343
f. Procedimientos de ventilación, seguridad y evacuación	344
5. Formulario de registro documental inicial	345
a. Identificación del residuo y origen (central, lote, fecha)	345
b. Trazabilidad del contenedor: código, sellos y precintos	345
c. Resultado de inspección visual y dimensional en recepción	346
d. Datos radiológicos (calor, actividad, espectro isotópico)	346
e. Información de transporte, ruta y condiciones de entrega	347
f. Responsable técnico, firmas y verificación de conformidad	347
6. Formulario de control de calidad y validación de obra	348
a. Registro de ensayos de materiales (hormigón, bentonita, acero)	348
b. Checklist de inspección diaria y puntos de control críticos	348
c. Gestión de no conformidades y acciones correctoras aplicadas	350
d. Certificados de cumplimiento normativo y resultados de ensayo	350
e. Evidencias fotográficas, mediciones instrumentales y datos SCADA	351
f. Aprobación final de hitos de construcción y liberación de fase	351
Capítulo 13: Checklists didácticos básicos para la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF	353
1. Checklist de recepción e instalación de contenedores	353
a. Verificación documental previa (manifiesto de carga, código del contenedor)	353
b. Inspección visual de integridad y precintos de seguridad	353
c. Medición de radiación externa y temperatura superficial	354
d. Confirmación de posición y orientación en la galería	354
e. Registro fotográfico y firma del responsable técnico	354
f. Actualización del sistema de trazabilidad y bases de datos	355
2. Checklist de relleno y sellado de galerías	355
a. Confirmación de material de backfill (lote y especificaciones)	355
b. Comprobación de humedad y densidad objetivo de la bentonita	355
c. Secuencia de colocación y compactación por tramos	356
d. Control de uniformidad y auscultación de huecos residuales	356
e. Sellado provisional y ensayo de permeabilidad inicial	356

f. Validación y liberación de fase por el departamento de calidad	357
3. Checklist de calibración de sensores e instrumentación	357
a. Identificación de sensores instalados y rangos de medida	357
b. Verificación de fecha de última calibración y certificados	357
c. Prueba de funcionalidad in situ (señal, alimentación, comunicaciones)	358
d. Ajuste o sustitución de equipos fuera de tolerancia	358
e. Registro de valores de referencia pos-calibración	358
f. Carga de datos y respaldo en servidor central	358
4. Checklist de inspección post-cierre (fase temprana)	359
a. Revisión de registros de sellado y cierre definitivo	359
b. Inspección visual de accesos clausurados y señalización	359
c. Monitorización de radiación en superficie y entorno inmediato	359
d. Verificación de integridad de sistemas de drenaje pasivo	360
e. Generación de informe de conformidad para regulador	360
f. Programación de la próxima campaña de inspección	361
5. Checklist de revisión de FEPs residuales	361
a. Actualización del listado de Features, Events & Processes críticos	361
b. Evaluación de nuevos datos geológicos o hidrológicos	361
c. Análisis de impactos potenciales sobre la seguridad a largo plazo	362
d. Documentación de cambios en hipótesis de modelización	362
e. Determinación de acciones correctoras si procede	362
f. Aprobación y archivado en sistema de gestión de riesgos	363
6. Checklist de vigilancia ambiental continua	363
a. Calendario de muestreo y puntos de control establecidos	363
b. Recolección de muestras de agua, suelo y biota	363
c. Análisis de laboratorio y validación de resultados	364
d. Comparación con límites regulatorios y valores de fondo	364
e. Comunicación de resultados a las partes interesadas	364
f. Revisión anual del programa y ajustes necesarios	365
Capítulo 14: Plantillas de informes y documentos técnicos para la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF	366
1. Plantilla de informe de caracterización de sitio	366
a. Resumen ejecutivo y objetivos del estudio	366
b. Metodología de prospección geológica e hidrogeológica	367
c. Resultados de ensayos de laboratorio e in situ	368
d. Evaluación de idoneidad del emplazamiento	369
e. Conclusiones y recomendaciones de diseño	370
f. Anexos con datos brutos, mapas y registros	371
2. Plantilla de safety case preliminar	372
a. Descripción del sistema multibarrera propuesto	372
b. Inventario de residuos y características radiactivas	373
c. Modelización de escenarios evolutivos (normal y disruptivos)	374
d. Análisis de cumplimiento de criterios de dosis y riesgo	375
e. Identificación de incertidumbres y plan de I+D futuro	376
f. Revisión por pares y plan de interacción regulatoria	377
3. Plantilla de plan de vigilancia ambiental	378
a. Objetivos y alcance del programa de monitoreo	378
b. Matriz de parámetros, puntos de muestreo y frecuencia	379

c. Procedimientos de muestreo y análisis de laboratorio	380
d. Límites de referencia y criterios de alarma	381
e. Estrategia de comunicación de resultados al público	382
f. Revisión y mejora continua del plan	383
4. Plantilla de informe de cumplimiento regulatorio	384
a. Marco normativo aplicable (nacional e internacional)	384
b. Tabla de requisitos y evidencias presentadas	385
c. Descripción de desviaciones y acciones correctoras	386
d. Resultados de auditorías internas y externas	386
e. Conclusiones de cumplimiento y próximos pasos	387
f. Firmas del representante legal y del auditor acreditado	388
5. Plantilla de reporte de auditoría interna	388
a. Alcance y objetivos de la auditoría	388
b. Metodología y criterios de evaluación	389
c. Resumen de hallazgos y clasificación de no conformidades	390
d. Acciones correctoras propuestas y plazos	391
e. Seguimiento de acciones de auditorías previas	391
f. Declaración de cierre y conformidad final	392
6. Plantilla de informe de gestión de riesgos y costes	392
a. Identificación de riesgos técnicos, regulatorios y financieros	392
b. Matriz de probabilidad-impacto y ranking de prioridades	393
c. Estrategias de mitigación y contingencias presupuestarias	394
d. Proyección de costes a lo largo del ciclo de vida	395
e. Sensibilidades y escenarios alternativos	397
f. Recomendaciones para la dirección del proyecto	398
Capítulo 15: Checklists y guías de uso avanzadas para la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF	400
1. Checklist integrado de diseño multibarrera	400
a. Verificación de compatibilidad roca-backfill-contenedor	400
b. Validación de parámetros de diseño térmico e hidráulico	401
c. Control de especificaciones de material (composición, pureza)	401
d. Simulación de escenarios de fallo y redundancia	402
e. Actualización de registros de modelización THMC	403
f. Aprobación multidisciplinar y firma de diseño final	403
2. Checklist de validación de modelos numéricos	404
a. Revisión de datos de entrada y supuestos básicos	404
b. Calibración frente a datos experimentales o análogos naturales	405
c. Análisis de sensibilidad y convergencia numérica	405
d. Verificación de consistencia entre módulos acoplados	406
e. Documentación de versiones y control de software	407
f. Informe de validación y aceptación por el equipo de seguridad	407
3. Guía de buenas prácticas para manejo de incertidumbres	408
a. Tipos de incertidumbre (paramétrica, de modelo, de escenario)	408
b. Técnicas de propagación (Monte Carlo, análisis booleano)	409
c. Métodos de reducción (I+D, monitorización, pruebas piloto)	410
d. Comunicación de incertidumbre a reguladores y partes interesadas	411
e. Integración en la toma de decisiones del proyecto	411
f. Actualización periódica y registro histórico	411

4. Checklist de transición a seguridad pasiva	412
a. Confirmación de finalización de operaciones activas.....	412
b. Verificación de sellado definitivo y retirada de equipos	412
c. Transferencia de responsabilidades institucionales	413
d. Activación de programas de vigilancia post-cierre.....	413
e. Validación de fondos financieros para mantenimiento a largo plazo	414
f. Comunicación pública de cambio de fase y lecciones aprendidas.....	414
5. Guía de conservación de la memoria geológica	415
a. Principios de durabilidad de soportes (piedra, polímero, digital)	415
b. Estructura del mensaje y símbolos de advertencia	416
c. Ubicación y redundancia de archivos y marcadores físicos.....	416
d. Estrategias de actualización multigeneracional	417
e. Coordinación con archivos nacionales e internacionales	418
f. Procedimientos de revisión y renovación cada siglo	419
6. Guía de auditoría de ciberseguridad para sistemas GDF	419
a. Identificación de activos críticos (SCADA, bases de datos)	419
b. Evaluación de amenazas y vulnerabilidades actuales	420
c. Requisitos mínimos de hardening y segregación de redes	421
d. Protocolos de monitoreo, registro y respuesta a incidentes	422
e. Ensayos de penetración y verificación por terceros.....	424
f. Plan de mejora continua y reporte a la autoridad competente.....	425
Capítulo 16: Herramientas digitales y software de apoyo para la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF	427
1. Plataformas de modelización geológica 3D	427
a. Visualización avanzada de estratos	427
b. Integración con SIG y BIM	428
c. Exportación de datos a códigos THMC	430
2. Software de simulación de barreras.....	431
a. Códigos termo-hidro-mecánico-químicos	431
b. Modelos de corrosión y degradación	433
c. Validación con datos experimentales	435
3. Herramientas de gestión documental en la nube	437
a. Control de versiones y permisos	437
b. Firma digital y trazabilidad	438
c. Integración con plataformas regulatorias	439
4. Sistemas de realidad virtual y aumentada.....	440
a. Formación inmersiva de operarios	440
b. Inspección virtual de túneles.....	442
c. Planificación de rutas de instalación	443
5. Automatización y robótica en obra subterránea	444
a. Vehículos teleoperados	444
b. Robots de inspección radiológica	446
c. Integración con SCADA	447
6. Ciberseguridad y protección de datos	449
a. Amenazas y vulnerabilidades	449
b. Estrategias de mitigación	450
c. Normativas aplicables.....	451

Capítulo 17: Programas de formación y simulación para la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF.....454

1. Diseño curricular para técnicos y gestores	454
a. Competencias técnicas esenciales.....	454
b. Contenidos de seguridad radiológica	456
c. Evaluación de desempeño	458
2. Plataformas de e-learning y MOOC.....	460
a. Cursos modulares en línea	460
b. Seguimiento y certificación	462
c. Comunidad de práctica global	464
3. Simuladores de toma de decisiones.....	465
a. Modelos de gestión de incidencias	465
b. Juegos serios y role-play.....	467
c. Medición de indicadores de éxito.....	469
4. Entrenamiento en realidad virtual	470
a. Simulación de instalaciones subterráneas	470
b. Procedimientos de emergencia.....	472
c. Actualización de escenarios	474
5. Programas de formación continua para reguladores	476
a. Talleres de actualización normativa	476
b. Intercambio de buenas prácticas	477
c. Evaluación de competencias	479
6. Framework de acreditación profesional.....	481
a. Requisitos de certificación.....	481
b. Mantenimiento de credenciales	482
c. Reconocimiento internacional.....	483

PARTE SEXTA486

Práctica de la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF.....486

Capítulo 18: Casos prácticos de la ingeniería geológica de residuos radiactivos de alta actividad: GDF.486

Caso práctico 1. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Evaluación inicial de migración de radionúclidos en arcillolitas	486
Causa del Problema.....	486
Soluciones Propuestas.....	487
1. Ensayos triaxiales de alta fidelidad	487
2. Perforaciones anguladas y muestreo estratificado.....	487
3. Modelización numérica THMC escalada	487
4. Monitoreo piloto continuo en pozos	488
Consecuencias Previstas.....	488
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	489
Lecciones Aprendidas.....	489
Caso práctico 2. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Análisis de estabilidad mecánica de galerías en roca granítica	491

Causa del Problema	491
Soluciones Propuestas.....	491
1. Ensayos triaxiales triaxiales anisotrópicos con muestras orientadas	491
2. Monitorización de microseísmica inducida durante excavación piloto	491
3. Modelización numérica acoplada THM (termo-hidro-mecánica)	492
4. Refuerzo proactivo con bulonado y proyectado de hormigón de baja alcalinidad	492
Consecuencias Previstas.....	493
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	493
Lecciones Aprendidas.....	494

Caso práctico 3. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Evaluación y optimización de materiales de backfill de bentonita

bentonita	495
Causa del Problema.....	495
Soluciones Propuestas.....	495
1. Selección de mezcla de bentonita–perlita de baja salinidad	495
2. Pretratamiento de bentonita con intercambiador iónico natural	495
3. Incorporación de polímero superabsorbente	496
4. Diseño de sistema de barrera compuesta con capa de bentonita superficial y relleno granular interior.....	496
Consecuencias Previstas.....	496
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	497
Lecciones Aprendidas	497

Caso práctico 4. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Caracterización hidrogeológica de acuíferos profundos mediante pruebas de bombeo

mediante pruebas de bombeo	499
Causa del Problema	499
Soluciones Propuestas.....	499
1. Campaña de pruebas de bombeo de larga duración	499
2. Ensayos de trazadores conservativos y reactivos	499
3. Geofísica de carga-descarga (Slug tests) complementaria	500
4. Modelización numérica MODFLOW con calibración inversa	500
Consecuencias Previstas.....	500
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	501
Lecciones Aprendidas	501

Caso práctico 5. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Evaluación de sismicidad activa y su influencia en el diseño de la instalación.....

Causa del Problema.....	502
Soluciones Propuestas.....	502
1. Estudio detallado de fallas y paleosismicidad.....	502
2. Simulación numérica de respuesta sísmica local (Site Response Analysis)	502
3. Diseño de galerías resistentes a carga sísmica.....	503
4. Sistemas de monitorización sísmica y geodésica permanente	503
Consecuencias Previstas.....	503
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	504
Lecciones Aprendidas.....	504

Caso práctico 6. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Selección de emplazamiento según estabilidad estructural a largo plazo.....

Causa del Problema.....	506
Soluciones Propuestas.....	506

1. Mapeo detallado de fracturación y caracterización de juntas.....	506
2. Ensayos de esfuerzo in situ (Hydraulic Fracturing Tests)	506
3. Modelización numérica geomecánica a largo plazo	507
4. Ensayo de columna de roca (Rock Pillar Stability Test)	507
Consecuencias Previstas.....	507
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	508
Lecciones Aprendidas.....	508
Caso práctico 7. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Implementación de trazabilidad digital y sellado operacional de contenedores	510
Causa del Problema	510
Soluciones Propuestas.....	510
1. Implantación de RFID y plataforma GIS integrada	510
2. Sistemas de posicionamiento láser y QR bidimensional	510
3. Morteros inteligentes con sensores de curado y registro digital.....	511
4. Protocolos de verificación remota y checklist dinámico	511
Consecuencias Previstas.....	511
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	512
Lecciones Aprendidas.....	512
Caso práctico 8. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Diseño e implementación de un sistema integrado de monitorización geotécnica y radiológica	514
Causa del Problema	514
Soluciones Propuestas.....	514
1. Red de sensores multiparamétricos en galerías y backfill	514
2. Plataforma SCADA/IIoT para adquisición y análisis	514
3. Inspecciones robotizadas con drones y sondas subterráneas	515
4. Protocolos de mantenimiento predictivo y calibración continua	515
Consecuencias Previstas.....	515
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	516
Lecciones Aprendidas.....	516
Caso práctico 9. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Diseño de plan de cierre y vigilancia post-cierre	518
Causa del Problema	518
Soluciones Propuestas.....	518
1. Elaboración de cronograma detallado de actividades post-cierre	518
2. Constitución de fideicomiso y garantías financieras a largo plazo	518
3. Programas de monitorización radiológica y geotécnica de largo plazo	519
4. Conservación de la memoria del sitio y señalización multigeneracional.....	519
Consecuencias Previstas.....	519
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	520
Lecciones Aprendidas.....	520
Caso práctico 10. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Implementación de plataforma integrada de gestión documental y auditoría regulatoria	522
Causa del Problema	522
Soluciones Propuestas.....	522
1. Desarrollo de plataforma documental centralizada con control de versiones	522
2. Integración de firma digital avanzada y sellos de tiempo	522
3. Módulo de auditoría y generación de reportes regulatorios.....	523

4. Formación y transición organizativa	523
Consecuencias Previstas.....	523
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	524
Lecciones Aprendidas.....	524
Caso práctico 11. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIACTIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Identificación y clasificación de FEPs para el análisis probabilístico de riesgos	526
Causa del Problema	526
Soluciones Propuestas.....	526
1. Desarrollo de un catálogo estructurado de FEPs	526
2. Priorización cuantitativa mediante análisis de árbol de fallos y árbol de eventos	526
3. Modelización probabilística Monte Carlo multiescenario	527
4. Documentación y revisión periódica de FEPs	527
Consecuencias Previstas.....	527
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	528
Lecciones Aprendidas.....	528
Caso práctico 12. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIACTIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Diseño y validación de un formulario de perfil geológico y geotécnico.....	530
Causa del Problema	530
Soluciones Propuestas.....	530
1. Desarrollo de Formulario Digital Estandarizado	530
2. Piloto de Campo y Capacitación de Personal	530
3. Integración con SIG y Software de Modelización	531
4. Validación y Control de Calidad Continuo.....	531
Consecuencias Previstas.....	532
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	532
Lecciones Aprendidas.....	533
Caso práctico 13. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIACTIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Desarrollo e implementación de checklist para la calibración y verificación de instrumentación geotécnica y radiológica.....	534
Causa del Problema	534
Soluciones Propuestas.....	534
1. Diseño del checklist de calibración para sensores de presión y deformación	534
2. Desarrollo del checklist de calibración para detectores radiológicos gamma	535
3. Elaboración del checklist de verificación de cableado y conectividad	536
4. Capacitación y validación práctica del personal	536
Consecuencias Previstas.....	537
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	537
Lecciones Aprendidas.....	538
Caso práctico 14. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIACTIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Desarrollo de plantilla de informe de caracterización de sitio.....	539
Causa del Problema	539
Soluciones Propuestas.....	539
1. Diseño de estructura estándar de informe	539
2. Desarrollo de plantilla en formato editable y texto plano	540
3. Incorporación de plantillas de tablas y gráficos	540
4. Validación de la plantilla con ensayos piloto	540
Consecuencias Previstas.....	541
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	541

Lecciones Aprendidas	542
Caso práctico 15. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Implementación de checklist integrado de diseño multibarrera	543
Causa del Problema	543
Soluciones Propuestas.....	543
1. Definición de criterios de aceptación de cada barrera	543
2. Estructuración del checklist integrado	544
3. Integración de criterios de interacción multibarrera	545
4. Implantación piloto y ajuste del checklist integrado	546
Consecuencias Previstas.....	547
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	547
Lecciones Aprendidas	548
Caso práctico 16. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Implementación de plataforma de modelización geológica 3D integrada con SIG y BIM.....	550
Causa del Problema	550
Soluciones Propuestas.....	550
1. Selección e implantación de plataforma interoperable.....	550
2. Definición de flujo de datos y estándares de nomenclatura	551
3. Entrenamiento y puesta en marcha del repositorio colaborativo	551
4. Integración continua de datos de campo y actualización de modelo 3D	552
Consecuencias Previstas.....	553
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	553
Lecciones Aprendidas	554
Caso práctico 17. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Diseño e implementación de un programa de formación y simulación en realidad virtual para técnicos y gestores.....	555
Causa del Problema	555
Soluciones Propuestas.....	555
1. Diseño curricular modularizado según perfiles.....	555
2. Desarrollo de simuladores de realidad virtual (VR)	556
3. Módulo de e-learning y MOOC para fundamentos teóricos.....	557
4. Plan de formación continua y evaluación de competencias.....	557
Consecuencias Previstas.....	558
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	559
Lecciones Aprendidas	559
Caso práctico 18. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Desarrollo e implementación de simulación THMC para evaluación de barreras multicomponente	561
Causa del Problema	561
Soluciones Propuestas.....	561
1. Selección y parametrización de software especializado THMC	561
2. Diseño de geometría y malla numérica representativa	562
3. Configuración de escenarios de simulación y casos de sensibilidad	563
4. Análisis e interpretación de resultados.....	563
Consecuencias Previstas.....	564
Lecciones Aprendidas	565
Caso práctico 19. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF	

(GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Desarrollo de plantilla de safety case preliminar	567
Causa del Problema	567
Soluciones Propuestas.....	567
1. Definición de estructura estándar de plantilla de safety case preliminar	567
2. Creación de la plantilla digital en formato editable y texto plano	568
3. Validación con ejemplos reales y revisión multidisciplinar	568
4. Implementación de checklist de revisión interna y actualización periódica	569
Consecuencias Previstas.....	570
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	570
Lecciones Aprendidas	571

Caso práctico 20. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Integración de herramientas probabilísticas para la evaluación de incertidumbres a largo plazo

Causa del Problema.....	573
Soluciones Propuestas.....	573
1. Selección de software probabilístico y plataformas de cómputo distribuidas	573
2. Construcción de catálogo probabilístico de parámetros críticos	574
3. Diseño del modelo probabilístico de flujo y transporte simplificado	574
4. Análisis de sensibilidad global y prioridades de investigación	575
Consecuencias Previstas.....	575
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	576
Lecciones Aprendidas	577

Caso práctico 21. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Análisis económico del ciclo de vida de un GDF con incertidumbres de coste y financiación.....

Causa del Problema	578
Soluciones Propuestas.....	578
1. Elaboración del modelo de ciclo de vida de costes (Life-Cycle Cost Analysis, LCCA) con descomposición por fases.....	578
2. Incorporación de incertidumbres y distribuciones estocásticas en parámetros de coste	579
3. Evaluación de estructuras de financiación y escenarios de tasa de descuento	580
4. Desarrollo de escenario de sensibilidad económica y recomendaciones de mitigación	580
Consecuencias Previstas.....	581
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	582
Lecciones Aprendidas	583

Caso práctico 22. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Implementación de automatización y robótica en obra subterránea.....

Causa del Problema.....	585
Soluciones Propuestas.....	585
1. Despliegue de vehículos teleoperados para manipulación de contenedores y transporte de materiales	585
2. Implementación de robots autónomos para inspección radiológica y monitoreo geotécnico	586
3. Automatización del proceso de colocación y compactación de backfill de bentonita	587
4. Desarrollo de plataforma de rastreo y trazabilidad de activos y materiales en tiempo real	588
Consecuencias Previstas.....	589
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	590
Lecciones Aprendidas	590

Caso práctico 23. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Ciberseguridad y protección de datos en infraestructura crítica



subterránea.....	592
Causa del Problema	592
Soluciones Propuestas.....	593
1. Auditoría de ciberseguridad y análisis de vulnerabilidades	593
2. Implementación de arquitectura de red segmentada y Zona Desmilitarizada (DMZ)	593
3. Implantación de gestión de identidades y accesos (IAM) con autenticación multifactor	594
4. Desarrollo de plan de respuesta y recuperación ante incidentes cibernéticos	595
Consecuencias Previstas.....	596
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	597
Lecciones Aprendidas	598

Caso práctico 24. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Conservación de la memoria del sitio y archivado digital a largo plazo

plazo	599
Causa del Problema	599
Soluciones Propuestas.....	599
1. Diseño de signage multigeneracional y textos pictográficos	599
2. Archivado de datos digitales en formatos inmutables y soportes perdurables.....	600
3. Protocolo de actualización periódica y gobernanza de memoria	601
4. Herramientas de difusión comunitaria y educación intergeneracional	601
Consecuencias Previstas.....	602
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	603
Lecciones Aprendidas	603

Caso práctico 25. "INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GDF (GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY)." Desarrollo e implementación de gemelo digital (Digital Twin) para operación, mantenimiento y planificación a largo plazo

para operación, mantenimiento y planificación a largo plazo	605
Causa del Problema	605
Soluciones Propuestas.....	606
1. Diseño de arquitectura de Gemelo Digital integrada	606
2. Implementación de adquisición y almacenamiento de datos en tiempo real	607
3. Integración de simulaciones THMC en tiempo real y pronósticos IA	608
4. Desarrollo de plataforma de visualización y generación automática de informes	608
Consecuencias Previstas.....	611
Lecciones Aprendidas	612

¿QUÉ APRENDERÁ?



- Contexto histórico y normativo de la gestión de residuos radiactivos de alta actividad.
- Clasificación y tipología de residuos radiactivos de alta actividad.
- Propiedades físico-químicas y radiactivas de los residuos.
- Métodos de acondicionamiento y embalaje previo al transporte.
- Principios de defensa en profundidad y barreras multibarrera.
- Selección y caracterización de emplazamientos geológicos.
- Diseño de barreras naturales y artificiales (roca huésped, bentonita, contenedores).
- Técnicas de construcción subterránea y control de calidad en obra.
- Sistemas de monitorización geotécnica y radiológica.
- Planificación de cierre y vigilancia post-cierre a largo plazo.
- Gestión documental, auditoría y herramientas digitales de apoyo.
- Identificación de FEPs, análisis probabilístico de riesgos y aspectos económicos.

Introducción.



INGENIERÍA GEOLÓGICA DE RESIDUOS RADIACTIVOS DE ALTA ACTIVIDAD: GARANTÍA DE SEGURIDAD Y FUTURO SOSTENIBLE

En un mundo donde la generación de energía nuclear sigue siendo esencial para satisfacer la demanda eléctrica y mitigar el cambio climático, el tratamiento responsable de los residuos radiactivos de alta actividad se erige como un desafío ineludible. Las instalaciones de disposición geológica profunda (GDF, por sus siglas en inglés) representan la solución técnicamente más sólida y aceptada internacionalmente para aislar de manera definitiva los desechos de larga vida. Sin embargo, su diseño, construcción y gestión requieren un conocimiento exhaustivo de la geología local, las propiedades de los materiales radiactivos y los requisitos más exigentes de seguridad a miles de generaciones vista.

Esta guía práctica ofrece a ingenieros geólogos, físicos nucleares, gestores de residuos y responsables políticos un recorrido estructurado desde los principios históricos y normativos hasta las técnicas avanzadas de modelización THMC (Termo-Hidro-Mecánico-Químico) y los sistemas de monitorización remota. En la primera parte, profundizaremos en el contexto internacional, los marcos regulatorios de la IAEA y la UE, así como en la importancia de la participación ciudadana y la percepción social. A continuación, aprenderá a caracterizar tipologías de combustible gastado y residuos de reprocesado, a evaluar la migración de radionúclidos en la geosfera y a aplicar los principios de defensa en profundidad y protección radiológica.

En la segunda parte, abordaremos la selección de emplazamientos idóneos: criterios litológicos, estudios hidrogeológicos, riesgos naturales y planes de mitigación ambiental. Descubrirá cómo diseñar barreras naturales y backfill de bentonita, escoger contenedores avanzados de acero cobreado y desarrollar modelos numéricos que integren procesos de calor, flujo y reactividad. También se detallan las técnicas de excavación subterránea—desde TBM hasta voladura controlada—y los sistemas de entibación, drenaje y ventilación necesarios para asegurar la robustez de túneles y cámaras a cientos de metros de profundidad.



En la tercera parte, estudiaremos la operación diaria de un GDF: recepción, inspección y trazabilidad digital de contenedores, relleno controlado de galerías y sellado definitivo. Se explica cómo dismantelar las instalaciones auxiliares, restaurar parcialmente la superficie y recoger lecciones de proyectos piloto como ONKALO (Finlandia) y PRACLAY (Bélgica). Asimismo, profundizaremos en la instrumentación geotécnica, radiactiva y la arquitectura SCADA/IIoT para adquisición de datos en tiempo real, junto a protocolos de emergencia y vigilancia ambiental que garanticen la seguridad pasiva a milenios plazo.

La cuarta parte está dedicada a la gestión documental: bases de datos geológicas, control de versiones, colaboración técnica y formatos normalizados de informes de cumplimiento. Aprenderá a evaluar riesgos probabilísticos mediante simulaciones Monte Carlo, a modelizar costes de ciclo de vida y a definir estructuras de financiación con fondos fiduciarios y seguros especializados. También se describen herramientas digitales de modelización 3D, simulación de barreras y plataformas de realidad virtual para formación de equipos.

En la última sección encontrará formularios y checklists: desde el perfil geológico y geotécnico del emplazamiento hasta los listados de verificación de calibración de sensores, pasando por plantillas de informe de caracterización, safety case preliminar, plan de vigilancia ambiental y reporte ESG. Asimismo, se incluyen casos prácticos que ejemplifican el uso de estas herramientas en escenarios reales, con soluciones de éxito en arcillolitas, granito y roca salina, y la implementación de gemelos digitales para optimizar la operación y el mantenimiento a largo plazo.

Al finalizar esta guía, usted estará capacitado para diseñar y ejecutar proyectos GDF que cumplan con las exigencias más estrictas de seguridad radiológica y geológica. Comprenderá las barreras naturales y artificiales que evitan la migración de radionúclidos, sabrá cómo anticipar eventos futuros—desde glaciaciones hasta sismos—y podrá garantizar que la decisión de protección de la salud humana y el medio ambiente quede sellada con solvencia científica.

Hoy más que nunca, la población y los reguladores exigen transparencia, rigor y pruebas tangibles de que los residuos de alta actividad no representarán un peligro para las generaciones venideras. Esta guía constituye la hoja de ruta indispensable para técnicos, consultores, autoridades y empresas que desean asumir el reto de consolidar un GDF en España, Latinoamérica o cualquier país con programas nucleares emergentes. Inicie ya su formación en ingeniería geológica de residuos radiactivos y conviértase en protagonista de la gestión más crítica del siglo: proteger el presente y asegurar un legado seguro para el futuro.