



CURSO/GUÍA PRÁCTICA INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

**Perforación, ensayos, diseño y
mantenimiento de pozos tubulares**



Índice

¿QUÉ APRENDERÁ?.....	15
Introducción.	16
PARTE PRIMERA.	17
Fundamentos de ingeniería de extracción de aguas subterráneas	17
Capítulo 1: Principios hidrogeológicos para la captación subterránea	17
1. Fundamentos del ciclo hidrológico subterráneo	17
a. Componentes del balance hídrico	17
b. Procesos de recarga natural y artificial	18
c. Interacción superficie-subsuelo	19
2. Tipología y estructura de acuíferos	19
a. Acuíferos libres, confinados y semiconfinados	19
b. Medios kársticos y fracturados	20
c. Parámetros hidrogeológicos clave	20
3. Calidad y vulnerabilidad del agua subterránea	20
a. Origen y evolución química natural	20
b. Contaminación antrópica y geogénica	21
c. Métodos de evaluación de vulnerabilidad	21
4. Zonificación y cartografía hidrogeológica aplicada	21
a. Técnicas de levantamiento de datos de campo	21
b. Integración SIG y modelos digitales	22
c. Delimitación de unidades hidrogeológicas	22
5. Relación pozo-acuífero y sostenibilidad de extracciones	22
a. Criterios de balance hídrico sostenible	22
b. Indicadores de sobreexplotación	23
c. Buenas prácticas de gestión	23
6. Impactos ambientales y medidas de mitigación	23
a. Descenso piezométrico y subsidencia	23
b. Intrusión salina y degradación de ecosistemas	24
c. Estrategias de restauración y compensación	25
Capítulo 2: Prospección y caracterización de recursos subterráneos	27
1. Objetivos y diseño de campañas de prospección	27
a. Definición de parámetros objetivo	27
b. Planificación de trabajos de campo	28
c. Coordinación multidisciplinar	28
2. Métodos geofísicos de superficie para aguas subterráneas	28
a. Sondeos eléctricos verticales y perfiles de resistividad	28
b. Técnicas electromagnéticas y magnetotelúricas	29
c. Georradar y sísmica de refracción	29
3. Prospección geofísica de pozos piloto (diagráfias)	29
a. Registros gamma y espontáneo natural	29

b. Caliper, resistividad y conductividad	30
c. Integración litológica-hidrogeológica	30
4. Muestreo exploratorio y ensayos de permeabilidad in situ.....	30
a. Pozos de reconocimiento y testigos continuos	30
b. Ensayos Lugeon y Lefranc.....	31
c. Correlación geofísica-litológica.....	31
5. Modelado conceptual hidroestratigráfico	31
a. Elaboración de secciones interpretativas.....	31
b. Identificación de horizontes productivos	32
c. Selección de zonas óptimas de captación	32
6. Informes hidrogeológicos y estándares internacionales	32
a. Contenidos y formatos ISO / ASTM	32
b. Recomendaciones técnicas para perforación	33
c. Validación y visado profesional	34
PARTE SEGUNDA.....	36
Diseño y construcción de pozos tubulares de agua.....	36
Capítulo 3: Métodos de perforación aplicados a la ingeniería de pozos.....	36
1. Perforación rotatoria directa e inversa	36
a. Principios de operación y equipos.....	36
b. Selección según litología y diámetro	37
c. Control y reciclaje de lodos.....	37
2. Perforación con aire: rotopercusión y martillo en fondo.....	38
a. Ventajas en medios duros y fracturados	38
b. Equipos de compresión y separación de recortes.....	38
c. Control de polvo y mitigación ambiental.....	39
3. Criterios de elección del método de perforación	39
a. Factores geológicos-económicos.....	39
b. Profundidad y caudal objetivo	40
c. Análisis de costes y rendimientos.....	40
4. Control de desviaciones y estabilidad del pozo	40
a. Técnicas de verticalidad y azimut	41
b. Prevención de colapsos y pérdidas de circulación	41
c. Monitoreo continuo de parámetros operativos.....	41
5. Muestreo y registro geológico durante perforación.....	42
a. Toma y conservación de muestras de testigo	42
b. Descripción litológica y codificación.....	42
c. Software de registro geológico en tiempo real	42
6. Seguridad, calidad y medio ambiente en obra.....	43
a. Evaluación de riesgos y planes de emergencia.....	43
b. Gestión de residuos de perforación	44
c. Certificación ISO 45001 e ISO 14001	44
Capítulo 4: Diseño estructural e hidráulico de pozos tubulares.....	46
1. Dimensionamiento hidráulico y caudal de proyecto	46
a. Cálculo de caudal sostenible	46

b. Selección de diámetro y profundidades clave.....	47
c. Altura dinámica total y pérdidas estimadas	47
2. Selección de tuberías, filtros y grava empaquetada.....	48
a. Materiales: acero al carbono, acero inoxidable, PVC, FRP	48
b. Diseño de ranuras y porcentaje abierto	49
c. Curado y colocación de grava embolsada	49
3. Cementación y sellado sanitario del anular	50
a. Lechadas y aditivos apropiados	50
b. Tecnología de empaquetamiento	50
c. Control de integridad del sellado	51
4. Terminación superior y protección sanitaria	51
a. Cabezal de pozo y cámara aforadora	51
b. Sellos antihongos y ventosas de aireación	51
c. Protección frente a vandalismo e inundaciones.....	52
5. Pruebas de aforo inicial y curvas características	52
a. Ensayo paso a paso y aforo continuo	52
b. Cálculo del rendimiento específico	52
c. Diagnóstico de eficiencia inicial.....	53
6. Documentación y certificación del proyecto de pozo.....	53
a. Planos “as built” y memoria técnica.....	53
b. Registro fotográfico y videográfico	54
c. Requisitos normativos internacionales.....	55
PARTE TERCERA.....	57
Hidráulica de acuíferos y ensayos de bombeo en ingeniería de extracción.....	57
Capítulo 5: Bases de hidráulica aplicada a acuíferos explotados	57
1. Ecuaciones de flujo en régimen permanente.....	57
a. Ley de Darcy y conductividad hidráulica	57
b. Soluciones radiales y lineales	58
c. Aplicaciones prácticas en diseño	58
2. Flujos transitorios y régimen no permanente	58
a. Método de Theis y soluciones analíticas	59
b. Modelos de difusión en acuíferos heterogéneos	59
c. Influencia del almacenamiento elástico	59
3. Conos de depresión e interferencia entre pozos.....	60
a. Superposición de extracciones	60
b. Criterios de espaciamiento óptimo	60
c. Modelado de interferencias	60
4. Efectos de anisotropía y heterogeneidad	61
a. Comportamientos en medios fracturados	61
b. Métodos de caracterización regional	62
c. Ajuste de modelos analíticos	63
5. Nivel estático, dinámico y recuperación post-bombeo	63
a. Curvas temporales de abatimiento	64
b. Factores que afectan la recuperación	64
c. Indicadores de agotamiento prematuro.....	65

6. Parámetros clave: transmisividad, conductividad y almacenamiento.....	66
a. Técnicas de cálculo y software especializado	66
b. Sensibilidad e incertidumbre de parámetros	67
c. Aplicación a la gestión de explotaciones	68
Capítulo 6: Ejecución e interpretación de ensayos de bombeo.....	70
1. Ensayos a caudal constante y escalonados	70
a. Planificación y objetivos de cada ensayo	70
b. Instrumentación y monitoreo en continuo	71
c. Control de variaciones de caudal y nivel	71
2. Ensayos de recuperación y slug tests	71
a. Metodología y equipamiento	72
b. Interpretación rápida en campo.....	73
c. Ajuste con modelos teóricos	73
3. Tratamiento y análisis de datos de bombeo	74
a. Registros digitalizados y filtros de ruido	74
b. Métodos de Jacob, Cooper-Jacob y Hantush	75
c. Herramientas de software y validación	76
4. Evaluación de eficiencia hidráulica del pozo.....	77
a. Pérdidas de carga laminares y turbulentas	77
b. Rendimiento específico y curva de eficiencia	78
c. Diagnóstico de obstrucciones y colmatación.....	79
5. Elaboración del informe técnico de ensayos.....	80
a. Estructura y contenidos mínimos recomendados	80
b. Gráficos, tablas y anexos normalizados	81
c. Conclusiones y recomendaciones operativas	83
6. Aplicación de resultados a planes de explotación sostenible	84
a. Límites de extracción y perímetros de protección	84
b. Estrategias de bombeo escalonado anual.....	85
c. Integración en modelos de gestión acuífera	86
PARTE CUARTA.	88
Operación, mantenimiento y rehabilitación de pozos tubulares.....	88
Capítulo 7: Planificación preventiva del mantenimiento de captaciones	88
1. Programación de inspecciones periódicas	88
a. Frecuencia y alcance de revisiones.....	88
b. Indicadores de condición operativa	89
c. Sistemas de gestión de mantenimiento (CMMS)	89
2. Técnicas de videgrabación y diagnóstico interno	89
a. Cámaras sumergibles y bitácora visual	90
b. Identificación de incrustaciones y corrosión	91
c. Evaluación de perforaciones y colapsos	92
3. Control de calidad del agua bombeada	92
a. Parámetros físico-químicos críticos.....	93
b. Tendencias de deterioro y alarmas	93
c. Planes de muestreo comparativo	93

4. Indicadores de envejecimiento y pérdida de eficiencia	93
a. Incremento de abatimiento por caudal.....	94
b. Variación del rendimiento específico	94
c. Estimación de colmatación del filtro	94
5. Estrategias de mantenimiento predictivo	94
a. Monitoreo continuo de parámetros eléctricos	94
b. Algoritmos de predicción de fallo de bombas.....	95
c. Gestión de repuestos y logística	96
6. Coste-beneficio del mantenimiento preventivo	97
a. Comparación con rehabilitaciones correctivas.....	97
b. Optimización del ciclo de vida del pozo	98
c. Priorización de inversiones	98
Capítulo 8: Limpieza, rehabilitación y desarrollo de pozos	100
1. Limpieza mecánica: cepillado y pistoneo	100
a. Equipos de pistoneo con aire y cable	100
b. Selección de cepillos y escariadores.....	101
c. Control de partículas removidas.....	101
2. Limpieza química: desincrustantes y oxidantes	102
a. Tipos de reactivos y compatibilidad	102
b. Secuencias de aplicación y enjuague.....	102
c. Neutralización y disposición de efluentes	102
3. Métodos combinados y estimulación hidráulica	103
a. Aire-lift y jetting de alta presión	103
b. Impulsos hidráulicos y ultrasónicos.....	104
c. Casos de éxito y limitaciones	105
4. Desarrollo posterior a la rehabilitación	105
a. Aire-lift continuo y surging alterno.....	106
b. Estabilización de parámetros fisicoquímicos.....	106
c. Confirmación de caudal y calidad	107
5. Reinstalación y ajuste del equipo de bombeo	108
a. Verificación de profundidad óptima.....	108
b. Cálculo de frecuencia y eficiencia eléctrica.....	108
c. Protocolos de arranque y monitoreo inicial	109
6. Evaluación del éxito de la rehabilitación	110
a. Recuperación del rendimiento específico	110
b. Análisis económico post-intervención	111
c. Registro y actualización de historial del pozo	111
PARTE QUINTA.	113
Gestión y sostenibilidad de la extracción de aguas subterráneas	113
Capítulo 9: Marco regulador y gestión internacional de captaciones.....	113
1. Legislación y concesiones de agua subterránea	113
a. Directrices ONU-UNESCO y marcos regionales	113
b. Procedimientos de otorgamiento de derechos.....	114
c. Obligaciones de reporte y control	114

2. Evaluación de impacto ambiental en proyectos de pozos	114
a. Identificación de impactos críticos	114
b. Estudios de impacto y planes de mitigación	115
c. Seguimiento y auditoría ambiental.....	115
3. Planes de gestión integral de acuíferos	115
a. Modelado de balances hídricos regionales	115
b. Programas de recarga artificial y control de intrusión	116
c. Participación comunitaria y gobernanza	117
4. Indicadores de sostenibilidad y huella hídrica	118
a. Metodología de cálculo de huella	118
b. Certificaciones y estándares internacionales	119
c. Comunicación de resultados a stakeholders	120
5. Adaptación al cambio climático en la extracción	120
a. Proyecciones de disponibilidad y recarga	121
b. Estrategias de resiliencia y diversificación	121
c. Tecnologías de ahorro y reutilización	122
6. Innovación y digitalización en la gestión de pozos	123
a. Sensórica IoT y telemetría	123
b. Modelos predictivos basados en IA.....	124
c. Plataformas de visualización en tiempo real	125
PARTE SEXTA.	126
Herramientas de ingeniería de extracción de aguas subterráneas	126
Capítulo 10: Formularios técnicos y plantillas de proyecto de pozos.....	126
FORMULARIO Nº 1 — Datos generales del proyecto de captación	126
Sección 1 — Identificación del proyecto	126
Sección 2 — Localización y coordenadas	126
Sección 3 — Datos administrativos y concesión	127
Sección 4 — Objetivos de caudal y calidad	127
FORMULARIO Nº 2 — Bitácora diaria de perforación	127
Sección 1 — Datos de la jornada.....	127
Sección 2 — Parámetros operativos	127
Sección 3 — Consumibles y costes.....	128
Sección 4 — Incidencias y seguridad	128
FORMULARIO Nº 3 — Diseño hidráulico del pozo	128
Sección 1 — Parámetros de cálculo	128
Sección 2 — Selección de diámetro y filtros	128
Sección 3 — Gráfica carga vs caudal (datos tabulados)	128
FORMULARIO Nº 4 — Ensayo de bombeo y análisis de datos	129
Sección 1 — Configuración del ensayo.....	129
Sección 2 — Datos resumidos (curva semilog).....	129
Sección 3 — Recomendaciones.....	129
CHECKLIST — Inspección y mantenimiento preventivo.....	129
Sección 1 — Cabezal y superficie	129
Sección 2 — Equipos mecánicos y eléctricos	129
Sección 3 — Calidad de agua.....	130

Sección 4 — Documentación.....	130
FORMULARIO Nº 5 — Rehabilitación del pozo y validación	130
Sección 1 — Programa de limpieza	130
Sección 2 — Resultados de aforo post-rehabilitación.....	130
Sección 3 — Certificación	130
Capítulo 11: Checklists de control de calidad, seguridad y medio ambiente.....	131
CHECKLIST — Seguridad en operaciones de perforación.....	131
Sección 1 — EPI obligatorios y formación del personal	131
Sección 2 — Control de equipos a presión.....	131
Sección 3 — Plan de emergencias y primeros auxilios.....	132
CHECKLIST — Control de lodos y evacuación de recortes.....	133
Sección 1 — Parámetros de viscosidad y densidad.....	133
Sección 2 — Gestión de decantación y tratamiento	133
Sección 3 — Disposición final conforme a normativa	133
LISTA — Verificación de terminación sanitaria	133
Sección 1 — Integridad del sellado de cementación.....	133
Sección 2 — Protección del cabezal y ventilación	133
Sección 3 — Ensayo bacteriológico inicial.....	134
CHECKLIST — Ensayos de bombeo: preparación y ejecución.....	134
Sección 1 — Calibración de caudalímetros y sondas	134
Sección 2 — Protocolos de arranque y paro controlado.....	134
Sección 3 — Supervisión de variaciones anómalas	134
LISTA — Indicadores de gestión sostenible del pozo	134
Sección 1 — Seguimiento de niveles piezométricos	134
Sección 2 — Control de rendimiento específico	134
Sección 3 — Registro de consumos energéticos	135
PLANTILLA — Informe anual de explotación a la autoridad	135
Sección 1 — Datos de caudales y niveles medios	135
Sección 2 — Parámetros de calidad y vertidos	135
Sección 3 — Cumplimiento de condiciones concesionales.....	135
PARTE SÉPTIMA.	136
Práctica de ingeniería de extracción de aguas subterráneas	136
Capítulo 12: Estudios de éxito y lecciones aprendidas en pozos tubulares	136
1. Captaciones en acuíferos aluviales de gran caudal	136
a. Diseño y rendimiento alcanzado	136
b. Retos de colmatación fina	136
c. Medidas correctivas aplicadas.....	136
2. Pozos profundos en formaciones volcánicas	137
a. Selección de método rotopercusión	137
b. Control de gases disueltos.....	137
c. Monitorización sísmica asociada	137
3. Sistemas de pozos en medios kársticos complejos	137
a. Identificación de cavidades y fisuras	137
b. Diseño de filtros especiales	138

c. Gestión de fluctuaciones de caudal	138
4. Rehabilitación exitosa de pozos deteriorados	138
a. Diagnóstico integral con videograbación	138
b. Limpieza química-física combinada.....	138
c. Recuperación del 90 % del caudal original	138
5. Captaciones sostenibles en zonas semiáridas	138
a. Optimización de bombeo escalonado	139
b. Implantación de recarga artificial.....	139
c. Resultados tras cinco años de operación	139
6. Errores comunes y cómo evitarlos	139
a. Perforaciones fuera de diseño.....	139
b. Selección incorrecta de filtros	139
c. Falta de mantenimiento programado.....	139
Capítulo 13. Casos prácticos de ingeniería de extracción de aguas subterráneas	140
Caso práctico 1. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Selección de la ubicación óptima para un pozo tubular en un entorno rural.	140
Causa del Problema	140
Soluciones Propuestas.....	140
1. Estudio geofísico de superficie ampliado.....	140
2. Campaña de sondajes exploratorios y ensayos de permeabilidad detallados	141
3. Modelización conceptual e hidrogeológica avanzada	141
Consecuencias Previstas.....	141
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	142
Lecciones Aprendidas	142
Caso práctico 2. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Determinación del caudal viable en un acuífero kárstico complejo.	143
Causa del Problema	143
Soluciones Propuestas.....	143
1. Cartografía detallada de fracturas y conductos kársticos	143
2. Tomografía eléctrica y ensayos de recarga artificial	143
3. Ensayo de bombeo escalonado y análisis de datos avanzados.....	143
4. Desarrollo de modelo numérico Acuífero-Discreto.....	144
Consecuencias Previstas.....	144
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	144
Lecciones Aprendidas	145
Caso práctico 3. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Diseño avanzado de sistema de filtros y grava empaquetada multicapa en un acuífero arenoso-gravoso heterogéneo.	146
Causa del Problema	146
Soluciones Propuestas.....	146
1. Caracterización granulométrica y clasificación estratigráfica previa	146
2. Diseño de filtro multicapa y grava empaquetada zonificada.....	146
3. Procedimiento de instalación controlada y limpieza posterior	147
Consecuencias Previstas.....	147
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	147
Lecciones Aprendidas	148
Caso práctico 4. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Rehabilitación integral de un pozo municipal colmatado por procesos biogeoquímicos.	149
Causa del Problema	149

Soluciones Propuestas.....	149
1. Videgrabación diagnóstica y análisis de incrustaciones.....	149
2. Limpieza mecánica: pistoneo y cepillado especializado	149
3. Limpieza química: aplicación de desincrustantes ácidos y oxidantes.....	149
4. Estimulación hidráulica y surging alterno	150
5. Reinstalación y ajuste de motobomba y cabezal sanitario	150
Consecuencias Previstas.....	150
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	151
Lecciones Aprendidas.....	151
Caso práctico 5. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Captaciones sostenibles en zona semiárida mediante bombeo escalonado y recarga artificial.	152
Causa del Problema.....	152
Soluciones Propuestas.....	152
1. Diseño de bombeo escalonado anual.....	152
2. Implantación de recarga artificial controlada	152
3. Sistema de telemetría y control inteligente.....	153
Consecuencias Previstas.....	153
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	153
Lecciones Aprendidas.....	154
Caso práctico 6. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Errores comunes en diseño y operación de pozos tubulares y estrategias para su evitación.	155
Causa del Problema.....	155
Soluciones Propuestas.....	155
1. Evaluación previa de transmisividad y ensayo piloto de caudal	155
2. Diseño de filtro y grava empaquetada acorde a estratigrafía real	155
3. Estudio hidrogeológico 3D y delimitación de perímetro de protección	156
4. Selección y mantenimiento preventivo de motobomba y cabezal	156
Consecuencias Previstas.....	156
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	157
Lecciones Aprendidas.....	157
Caso práctico 7. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Diseño de captación múltiple en acuífero aluvial de gran caudal para industria cervecera.	159
Causa del Problema.....	159
Soluciones Propuestas.....	159
1. Diseño de red de pozos paralelos y espaciamiento óptimo	159
2. Balance de bombeo mediante variadores de frecuencia (VFD).....	159
3. Colector y tanque de regulación intermedio	160
4. Recarga parcial mediante canal infiltrante y pozo de inyección	160
Consecuencias Previstas.....	160
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	161
Lecciones Aprendidas.....	161
Caso práctico 8. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Perforación de pozos profundos en formaciones volcánicas con control de gases disueltos y monitorización sísmica asociada.	162
Causa del Problema.....	162
Soluciones Propuestas.....	162
1. Selección de método de perforación con control de presión.....	162
2. Sistema de degasificación y tratamiento de fluidos de retorno.....	162
3. Monitorización sísmica pasiva y microseísmica inducida	163
4. Diseño escalonado de revestimiento y cementación zonificada	163

Consecuencias Previstas.....	163
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	164
Lecciones Aprendidas.....	164
Caso práctico 9. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Prospección geofísica de pozos piloto y diagráfias para caracterización litológica-hidrogeológica.	165
Causa del Problema.....	165
Soluciones Propuestas.....	165
1. Diagráfias eléctricas y gamma natural en pozo piloto	165
2. Ensayo de permeabilidad combinado con testeos Lugeon.....	165
3. Integración de sísmica vertical (PS logging)	165
4. Modelo conceptual hidroestratigráfico tridimensional	166
Consecuencias Previstas.....	166
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	166
Lecciones Aprendidas.....	167
Caso práctico 10. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Diseño y operación de sistemas de captación en medios kársticos complejos sin interrupciones de flujo.	168
Causa del Problema.....	168
Soluciones Propuestas.....	168
1. Cartografía 3D de redes kársticas y mapeo de cavidades.....	168
2. Diseño de filones múltiples con interconexión hidráulica	168
3. Bomba sumergible de control inteligente y regulación piezométrica	169
4. Programa de recarga artificial puntual y mantenimiento de cavidades	169
Consecuencias Previstas.....	169
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	170
Lecciones Aprendidas.....	170
Caso práctico 11. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Rehabilitación exitosa de pozo deteriorado mediante limpieza química-física combinada y videograbación diagnóstica.	172
Causa del Problema.....	172
Soluciones Propuestas.....	172
1. Videograbación diagnóstica avanzada	172
2. Limpieza química-física combinada	172
3. Reemplazo parcial de grava empaquetada	173
Consecuencias Previstas.....	173
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	173
Lecciones Aprendidas.....	174
Caso práctico 12. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Zonificación y cartografía hidrogeológica aplicada en proyecto transnacional.	175
Causa del Problema.....	175
Soluciones Propuestas.....	175
1. Campaña de levantamiento geológico unificado.....	175
2. Integración SIG y modelos digitales de terreno (MDT)	175
3. Delimitación de unidades hidrogeológicas y perímetros de protección.....	176
Consecuencias Previstas.....	176
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	176
Lecciones Aprendidas.....	177
Caso práctico 13. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Evaluación de vulnerabilidad y calidad de un acuífero costero frente a contaminantes agrícolas.	178
Causa del Problema.....	178
Soluciones Propuestas.....	178
1. Ampliación de la red piezométrica y muestreo sistemático	178

2. Cartografía de vulnerabilidad DRASTIC adaptada	178
3. Ensayos de infiltración y trazadores de materia orgánica	178
4. Desarrollo de modelo numérico de transporte de contaminantes	179
Consecuencias Previstas	179
Resultados de las Medidas Adoptadas	179
Lecciones Aprendidas	180
Caso práctico 14. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Identificación y aplicación de indicadores de sostenibilidad en la explotación de un acuífero aluvial.....	181
Causa del Problema	181
Soluciones Propuestas.....	181
1. Definición de indicadores clave de sostenibilidad	181
2. Instrumentación y telemetría continua	181
3. Ensayos de balance hídrico y simulaciones anuales	182
4. Sistema de extracción adaptativa	182
Consecuencias Previstas.....	182
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	183
Lecciones Aprendidas	183
Caso práctico 15. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Diseño de campaña de prospección de recursos subterráneos en cuenca árida.....	184
Causa del Problema	184
Soluciones Propuestas.....	184
1. Definición de parámetros objetivo y diseño de muestreo.....	184
2. Planificación detallada de trabajos de campo	184
3. Coordinación multidisciplinar y comunicación con stakeholders	185
Consecuencias Previstas.....	185
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	185
Lecciones Aprendidas	186
Caso práctico 16. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Muestreo exploratorio y ensayos de permeabilidad in situ en un acuífero fracturado.	187
Causa del Problema	187
Soluciones Propuestas.....	187
1. Muestreo estratigráfico y de fractura continuado.....	187
2. Ensayos de bombeo a caudal constante en intervalos discretos.....	187
3. Ensayos Lugeon en fracturas principales	188
4. Integración de resultados en modelo conceptual dual.....	188
Consecuencias Previstas.....	188
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	189
Lecciones Aprendidas	189
Caso práctico 17. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Modelado conceptual hidroestratigráfico 3D para selección de zonas óptimas de captación en acuífero aluvial heterogéneo.....	190
Causa del Problema	190
Soluciones Propuestas.....	190
1. Integración y unificación de datos de campo	190
2. Construcción de modelo conceptual hidroestratigráfico 3D	190
3. Calibración inversa con ensayos de bombeo piloto.....	191
4. Selección de ubicaciones y diseño de programa de captación	191
Consecuencias Previstas.....	191
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	192
Lecciones Aprendidas	192

Caso práctico 18. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Selección y aplicación de métodos de perforación rotatoria directa e inversa según litología y diámetros de pozo.....193

Causa del Problema	193
Soluciones Propuestas.....	193
1. Análisis comparativo de litologías y parámetros operativos	193
2. Diseño híbrido de campaña rotatoria directa-inversa	193
3. Control de lodos y reciclaje en tiempo real	194
4. Gestión de desviaciones y verticalidad	194
Consecuencias Previstas.....	194
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	195
Lecciones Aprendidas	195

Caso práctico 19. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Uso de rotopercusión y martillo en fondo para perforación en formaciones duras y fracturadas.196

Causa del Problema	196
Soluciones Propuestas.....	196
1. Adopción de rotopercusión con martillo en fondo (DTH) por aire	196
2. Diseño de sistema de separación de recortes y gestión de polvo	196
3. Optimización de parámetros operativos y control de presión de fondo	197
4. Plan de mantenimiento preventivo y monitorización de desgaste	197
Consecuencias Previstas.....	197
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	198
Lecciones Aprendidas	198

Caso práctico 20. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Criterios de elección del método de perforación según geología y coste en proyecto de pozos interconectados.....199

Causa del Problema	199
Soluciones Propuestas.....	199
1. Elaboración de matriz de evaluación técnico-económica.....	199
2. Análisis de riesgos geotécnicos y económicos	199
3. Simulación de escenarios de rendimiento	200
4. Definición de procedimiento de decisión y manual operativo	200
Consecuencias Previstas.....	200
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	201
Lecciones Aprendidas	201

Caso práctico 21. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Control de desviaciones y estabilidad del pozo en obra de gran diámetro.202

Causa del Problema	202
Soluciones Propuestas.....	202
1. Implementación de Measurement While Drilling (MWD) y Logging While Drilling (LWD).....	202
2. Uso de subs de inclinación ajustable y collares de motor direccional	202
3. Control de presión de lodos y estabilización de taladro	203
4. Plan de revestimientos provisionales escalonados.....	203
Consecuencias Previstas.....	203
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	203
Lecciones Aprendidas	204

Caso práctico 22. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Dimensionamiento hidráulico y cálculo de caudal sostenible en un pozo para suministro urbano.205

Causa del Problema	205
Soluciones Propuestas.....	205
1. Cálculo preliminar de caudal sostenible	205
2. Ensayo de bombeo a caudal constante y paso a paso	205

3. Cálculo de tubería de producción y pérdidas de carga	205
Consecuencias Previstas.....	206
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	206
Lecciones Aprendidas.....	206
Caso práctico 23. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Selección de tuberías, filtros y grava empaquetada para un pozo de gran caudal en acuífero mixto.	208
Causa del Problema	208
Soluciones Propuestas.....	208
1. Análisis granulométrico detallado y definición de estratigrafía funcional.....	208
2. Diseño de filtro ranurado y grava empaquetada multicapa zonificada	208
3. Protocolo de instalación y compactación de grava.....	209
Consecuencias Previstas.....	209
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	209
Lecciones Aprendidas.....	210
Caso práctico 24. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Diseño y ejecución de cementación y sellado sanitario del anular en pozo tubular.	211
Causa del Problema	211
Soluciones Propuestas.....	211
1. Selección de lechada cementante y aditivos	211
2. Técnica de cementación zonificada por etapas	211
3. Control de calidad y monitorización de lechada	211
4. Prueba de integridad y curado acelerado	212
Consecuencias Previstas.....	212
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	212
Lecciones Aprendidas.....	213
Caso práctico 25. "INGENIERÍA DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS." Terminación superior y protección sanitaria del cabezal de pozo.	214
Causa del Problema	214
Soluciones Propuestas.....	214
1. Diseño de cabezal sanitario estanco	214
2. Cámara aforadora modular de polietileno	214
3. Sistema anti-inundación y drenaje perimetral.....	214
4. Protección contra vandalismo y seguridad	215
Consecuencias Previstas.....	215
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	215
Lecciones Aprendidas.....	215