



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO DE
CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA
MICROCUCENCA JAYLLIHUAYA – PUNO 2018**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. MARITHZA APAZA PINO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO – PERÚ

2019



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO
DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTE-
RRÁNEA EN LA MICROCUENCA JAYLLIH
UAYA - PUNO 2018**

AUTOR

MARITHZA APAZA PINO

RECuento DE PALABRAS

25945 Words

RECuento DE CARACTERES

144157 Characters

RECuento DE PÁGINAS

157 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

6.7MB

FECHA DE ENTREGA

Dec 7, 2023 7:38 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Dec 7, 2023 7:40 PM GMT-5

● **15% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base

- 15% Base de datos de Internet
- 3% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de Crossref
- Base de datos de contenido publicado de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)


Dr. German Belizario Quispe
DOCENTE - UNA - PUNO


UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
Dr. Isidro Alberto Pizarro Huaypa
DIRECTOR UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

Resumen



DEDICATORIA

A Dios, por brindarme sabiduría y acompañarme durante el logro de mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis queridos padres: Domingo Apaza y Melecia Pino, por brindarme su cariño y apoyo incondicional, por ser siempre mi soporte, por haber confiado en mí y por enseñarme a no desfallecer ante nada.

A mis hermanos: Miriam y Edward, por siempre estar presentes en mi vida, quienes en el día a día con su presencia y respaldo me impulsan a seguir adelante, además de saber que mis logros también son los suyos.

Marithza A.P.



AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater Universidad Nacional del Altiplano, en especial a mi querida Facultad de Ingeniería Agrícola por acogerme en sus aulas durante los años de estudio.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola por el desprendimiento de sus conocimientos en mi formación profesional.

A mi director de tesis Dr. Germán Belizario Quispe, por el asesoramiento, orientación, por compartir sus conocimientos tan valiosos y soporte profesional que fueron esenciales en la ejecución del presente proyecto de investigación.

A mis jurados Dr. Victoriano Rolando Apaza Campos, M. Sc. Oscar Raúl Mamani Luque, M. Sc. Teófilo Chirinos Ortiz, por sus acertadas observaciones y correcciones que contribuyeron a mejorar el desarrollo y culminación del presente proyecto de investigación.

A mis apreciadas amigas y compañeras de aula, Christy y Soledad, por brindarme su amistad incondicional, por esas palabras de aliento y extender su mano en momentos difíciles, siempre las llevo en mi corazón.

Marithza A.P.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	
RESUMEN	14
ABSTRACT.....	15
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
1.1.1. Pregunta general.....	17
1.1.2. Preguntas específicas	18
1.2. JUSTIFICACIÓN	18
1.3. HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	19
1.3.1. Hipótesis general.....	19
1.3.2. Hipótesis específicas	19
1.4. OBJETIVOS.....	19
1.4.1. Objetivo general	19
1.4.2. Objetivos específicos	19
CAPÍTULO II	
REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1. ANTECEDENTES	20



2.1.1.	Internacional.....	20
2.1.2.	Nacional	22
2.1.3.	Regional	23
2.2.	CONCEPTOS BÁSICOS	24
2.2.1.	Acuífero.....	24
2.2.1.1.	Clasificación de los acuíferos	25
2.2.2.	Agua subterránea.....	28
2.2.2.1.	Importancia de las aguas subterráneas	30
2.2.2.2.	Contaminación de las aguas subterráneas.....	31
2.2.2.3.	Mecanismos de introducción y propagación de la contaminación en el agua subterránea.	33
2.2.2.4.	Mecanismos de propagación a partir de la superficie	33
2.2.2.5.	Mecanismos de propagación desde la zona no saturada.....	36
2.2.2.6.	Mecanismos de propagación.....	38
2.2.2.7.	Notas potenciales de contaminación	39
2.2.2.8.	Comportamiento de los contaminantes	53
2.2.3.	Calidad del agua subterránea	55
2.2.3.1.	Parámetros físicos	57
2.2.3.2.	Parámetros químicos	58
2.2.4.	Amenaza de recursos hídricos subterráneos	61
2.2.4.1.	Amenaza por escasez	62
2.2.4.2.	Amenaza por contaminación.....	62
2.2.5.	Vulnerabilidad de las aguas subterráneas	64
2.2.5.1.	Tipos de vulnerabilidad.....	65



2.2.5.2. Importancia de la zona no saturada en la atenuación de contaminantes.....	66
2.2.5.3. Resistencia o inaccesibilidad en sentido hidráulico.	67
2.2.5.4. Régimen hidráulico del acuífero.	68
2.2.5.5. Profundidad del agua subterránea.	68
2.2.5.6. Características litológicas.	68
2.2.5.7. Métodos para la determinación de la vulnerabilidad	69
2.2.6. Riesgo de los recursos hídricos subterráneos	76

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO:.....	81
3.1.1. Ubicación política:	81
3.1.2. Ubicación geográfica:	81
3.1.3. Ubicación hidrográfica:.....	81
3.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA MICROCUENCA JAYLLIHUAYA:85	
3.3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	85
3.3.1. Precipitación.....	85
3.3.2. Temperatura	86
3.3.3. Humedad relativa	86
3.3.4. Evapotranspiración potencial.	86
3.3.5. Relieve.....	86
3.3.6. Geología	87
3.3.7. Estratigrafía	87
3.3.8. Topografía	87
3.3.9. Hidrología	88



3.3.10. Hidrología superficial.....	88
3.3.11. Drenaje... ..	88
3.3.12. Energía solar.....	89
3.3.13. Flora y fauna	89
3.3.14. Agricultura y ganadería.....	89
3.3.15. Población económicamente activa	90
3.3.16. Actividad productiva	90
3.3.17. Tenencia de tierras	91
3.3.18. Población.....	92
3.4. MATERIALES.....	92
3.4.1. Información cartográfica:.....	92
3.4.2. Equipos y programas de cómputo:.....	93
3.4.2.1. Materiales y equipos de campo:.....	93
3.5. METODOLOGIA	93
3.5.1. Tipo de investigación	93
3.5.2. Variables	94
3.5.3. Población y muestra	94
3.5.3.1. Población.....	94
3.5.3.2. Muestra.....	94
3.5.4. Metodología seguida	95
3.5.4.1. Determinación del nivel de vulnerabilidad a la contaminación	95
3.5.4.2. Identificación y determinación del nivel de amenaza principal de contaminación	99
3.5.4.3. Determinación del nivel de riesgo de contaminación del agua subterránea	103



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS.....	105
4.1.1. Determinación del nivel de vulnerabilidad a la contaminación	105
4.1.1.1. Control del nivel freático mensual	105
4.1.1.2. Caracterización litológica del acuífero	107
4.1.1.3. Caracterización del tipo de acuífero.....	108
4.1.1.4. Sistematización en la matriz de indexación GOD.	109
4.1.1.5. Determinación de niveles de vulnerabilidad.....	111
4.1.2. Identificación y determinación del nivel de amenaza principal de contaminación	113
4.1.2.1. Identificación de la amenaza principal.....	113
4.1.2.2. Toma de muestras de agua subterránea.....	113
4.1.2.3. Identificación del parámetro más representativo y/o crítico... 115	
4.1.2.4. Determinación del nivel de la amenaza principal.	116
4.1.3. Determinación del nivel de riesgo de contaminación	117
4.2. DISCUSIÓN	120
V. CONCLUSIONES	122
VI. RECOMENDACIONES	123
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	124
ANEXOS.....	130

Área: Ingeniería y Tecnología

Línea: Recursos Hídricos

Fecha de sustentación: 18 de julio del 2019.



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Parámetros DRASTIC y sus pesos relativos (W)	72
Tabla 2 Rangos de parámetros y puntajes DRASTIC.....	73
Tabla 3 Grados de vulnerabilidad según DRASTIC.....	74
Tabla 4 Parámetros determinados para aplicar el Método ERIS	78
Tabla 5 Cuadro de Variables.....	94
Tabla 6 Cuadro de niveles de vulnerabilidad.....	99
Tabla 7 Identificación de la amenaza en la zona de estudio	100
Tabla 8 Estándares de Calidad de Agua.....	102
Tabla 9 Clasificación del riesgo de contaminación	104
Tabla 10 Control de nivel freático del agua subterránea	106
Tabla 11 Índice de vulnerabilidad a la contaminación	109
Tabla 12 Nivel de vulnerabilidad en la zona alta.....	111
Tabla 13 Nivel de vulnerabilidad en la zona media.....	111
Tabla 14 Nivel de vulnerabilidad en la zona baja.....	112
Tabla 15 Puntos de muestreo de agua.....	114
Tabla 16 Nivel de amenaza en la zona alta.....	116
Tabla 17 Nivel de amenaza en la zona media.....	116
Tabla 18 Nivel de amenaza en la zona baja	117
Tabla 19 Nivel de riesgo de contaminación zona alta	118
Tabla 20 Nivel de riesgo de contaminación zona media	118
Tabla 21 Nivel de riesgo de contaminación zona baja.....	119



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Modelo de acuífero	25
Figura 2 El agua subterránea como parte del ciclo hidrológico	28
Figura 3 Contaminación del agua subterránea	32
Figura 4 Contaminación del agua subterránea por lixiviado de residuos sólidos depositados en superficie.	34
Figura 5 Contaminación difusa por actividades agrícolas.....	35
Figura 6 Flujo inducido de agua superficial contaminada hacia un pozo	35
Figura 7 Retención en el suelo de efluentes de fosas sépticas	36
Figura 8 Percolación de contaminantes a través de la zona de aireación hacia un acuífero libre	37
Figura 9 Programación de contaminantes inyectadas en acuíferos	38
Figura 10 Penacho de contaminación producido por un vertedero en acuífero arenoso	41
Figura 11 Interfase agua dulce- agua salada en un acuífero costero	50
Figura 12 Avance de la interface tierra adentro como consecuencia del bombeo excesivo.....	51
Figura 13 Contaminación directa de una captación por agua salada como consecuencia del bombeo excesivo.....	52
Figura 14 Diagrama para calificar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación	71
Figura 15 Diagrama de nivel de riesgo	79
Figura 16 Clasificación del cuadro de riesgo	80
Figura 17 Mapa de ubicación del Perú.....	82



Figura 18	Mapa de ubicación de Puno	83
Figura 19	Mapa de ubicación de la microcuenca Jayllihuaya	84
Figura 20	Matriz de indexación GOD	98
Figura 21	Esquema de identificación del Nivel de Riesgo	103



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

GOD:	Siglas en inglés, Groundwater, overall, delpth
DRASTIC :	Siglas en ingles, Depth, recharge, aquifer, topography, impact, conductivity
ERIS:	Siglas en inglés, Environmental, risk, inventory, system
IGME:	Instituto Geográfico y Minero de España
DBO5:	Diagrama Bioquímica de Oxígeno
OMS:	Organismo Mundial de la Salud
pH:	Índice de Hidrogeno
EPIK:	Siglas en inglés, Epikarst, Protective, Infiltration, Karst network
INIA:	Instituto Nacional de Investigación Agraria
SINANPE:	Servicio Natural de Áreas Protegidas Por el Estado
SERNANP:	Servicio Natural de Áreas Protegidas
INEI:	Instituto Nacional de Estadística e Informática



RESUMEN

La presente investigación se realizó en la microcuenca Jayllihuaya, el objetivo principal es determinar el nivel de riesgo de contaminación del agua subterránea, empleando el método de iteración FOSTER, ésta para determinar el nivel de riesgo de contaminación, GOD G (Ground wáter occurrence–tipo de acuífero), O (Overall Lithology–litología de la cobertura) y D (Depth to Groundwater–profundidad del nivel freático), ésta para determinar el nivel de vulnerabilidad de contaminación; Programas de Monitorización y Control, este último método fue aplicado para la identificación y determinación del nivel de la amenaza principal, para el cumplimiento con el objetivo propuesto se realizó diferentes actividades: Identificación e inventariado de pozos, determinación del nivel de vulnerabilidad a la contaminación, control del nivel freático mensual, caracterización litológica del acuífero, caracterización del tipo de acuífero, sistematización de la información del agua subterránea en la matriz de indexación GOD, determinación de los niveles de vulnerabilidad, identificación y determinación del nivel de amenaza principal de contaminación, identificación de la amenaza principal, toma de muestras de agua subterránea, selección del parámetro más representativo, determinación de los niveles de amenaza, determinación del nivel de riesgo de contaminación del agua subterránea, teniendo así como resultado: zona baja tiene un nivel de riesgo IV (alto), la zona media tiene un nivel de riesgo IV (alto), finalmente la zona alta tiene un nivel de riesgo III (medio), llegando así a la conclusión que las aguas subterráneas en la microcuenca Jayllihuaya, presenta un 67% de alto nivel de riesgo de contaminación.

Palabras clave: Amenaza, agua subterránea, contaminación, riesgo, vulnerabilidad.



ABSTRACT

The present investigation was carried out in the Jayllihuaya micro-basin, the main objective is to determine the level of risk of groundwater contamination, using the FOSTER iteration method, this to determine the level of contamination risk, GOD G (Ground water occurrence-type of aquifer), O (Overall Lithology–cover lithology) and D (Depth to Groundwater–depth of the water table), this one to determine the level of vulnerability to contamination; Monitoring and control programs, this last method was applied to identify and determine the level of the main threat, to comply with the proposed objective, different activities were carried out: Identification and inventory of wells, determination of the level of vulnerability to contamination, control of the monthly water table, lithological characterization of the aquifer, characterization of the type of aquifer, systematization of groundwater information in the GOD indexing matrix, determination of vulnerability levels, identification and determination of the level of main contamination threat, identification of the main threat, groundwater sampling, selection of the most representative parameter, determination of threat levels, determination of the level of risk of groundwater contamination, thus resulting in: low zone has a risk level IV (high), the middle zone has a risk level IV (high), finally the high zone has a risk level III (medium), thus reaching the conclusion that the groundwater in the Jayllihuaya micro-basin presents 67% of high contamination risk level.

Keywords: Threat, groundwater, contamination, risk, vulnerability.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La contaminación de las aguas subterráneas es un problema relativamente nuevo en muchos países, pero ya es uno de los principales responsables de la contaminación del agua. Debido a su ubicación subterránea, este recurso hídrico es más resistente a la contaminación directa que las aguas superficiales. Sin embargo, una vez contaminada, los efectos de este proceso suelen ser irreversibles; por ello, la evaluación del riesgo de contaminación se ha convertido en una herramienta cada vez más popular para proteger las aguas subterráneas desde la década de 1990. (Foster, 1987)

En el caso del Perú, se ha avanzado significativamente hacia el aprovechamiento y protección de este recurso con la aprobación de la Ley de Recursos Hídricos N° 29338.

Las características hidrogeológicas de los acuíferos son esencialmente desconocidas debido a que se han realizado muy pocas investigaciones en nuestra nación. Sin embargo, debido a que no todos los perfiles de suelo o circunstancias hidrogeológicas son iguales, no tenemos medios para conocer las propiedades hidrogeológicas de los subterráneos, el comportamiento del agua o la transferencia de contaminantes. Dada la importancia de la sostenibilidad y la seguridad a largo plazo, la evaluación de riesgos ha ganado amplia aceptación como enfoque preventivo y de control de la contaminación.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, un porcentaje mínimo de la población depende de la microcuenca de Jayllihuaya para sus necesidades de agua potable, en particular de los acuíferos que proporcionan un suministro futuro de agua para uso de la población. En 2008, vivían en la microcuenca 3.271 personas, repartidas en 680 hogares. Hoy, ese número ha



aumentado a 3.713 y las proyecciones para 2037 indican que habrá aumentado a 4.826. La población utiliza las aguas subterráneas sobre todo para fines agrícolas.

Más de la mitad de los pozos de la microcuenca de Jayllihuaya se encuentran dentro de los invernaderos. Los agricultores y los propietarios de los invernaderos utilizan el agua de pozos privados para regar sus cultivos. El uso empírico del riego por inundación, desprovisto de intervalos temporales de riego, junto con la aplicación de fertilizantes que contienen elevados niveles de nitratos, se aplica de forma no sistemática, sin atenerse a protocolos establecidos, y basándose únicamente en los conocimientos experienciales de los profesionales de los viveros en lo que respecta a la mitigación del efecto invernadero.

Con anterioridad a este estudio, no se han realizado investigaciones exhaustivas sobre la identificación de los riesgos de contaminación de las aguas subterráneas. Por lo tanto, el objetivo de este estudio es evaluar la posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas en la microcuenca de Jayllihuaya. Dada la presencia de poblaciones agrícolas que continúan practicando la extracción de aguas subterráneas, es imperativo realizar una investigación objetiva para evaluar los riesgos potenciales asociados a esta actividad. Este estudio debe tener como objetivo determinar el nivel de vulnerabilidad a la contaminación e identificar las Notas primarias de contaminación. Un análisis de este tipo será una herramienta valiosa para salvaguardar la calidad de los recursos de aguas subterráneas.

Llevándonos a plantear las siguientes preguntas:

1.1.1. Pregunta general

¿Cuál es el nivel de riesgo de contaminación del agua subterránea en la microcuenca Jayllihuaya?



1.1.2. Preguntas específicas

- ¿Cuál es el nivel de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en la microcuenca Jayllihuaya?
- ¿Cuál es el nivel de la amenaza principal de contaminación del agua subterránea en la microcuenca Jayllihuaya?

1.2. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de investigación dará a conocer el nivel de riesgo de contaminación del agua subterránea en la microcuenca Jayllihuaya, ya que actualmente no se han hecho estudios de esta naturaleza. El agua subterránea de esta microcuenca está expuesto a Notas de contaminación y carece de estudios de este tipo, no existen acciones específicas para solucionar las demandas insatisfechas, interferencia de pozos por contaminación. Dado que no se ha realizado ni construido ningún análisis de riesgos de las aguas subterráneas que incluya algunos problemas críticos para su detección dentro de la gestión del recurso, se requiere una investigación en este ámbito. Se requiere un análisis en profundidad de los riesgos, vulnerabilidades y amenazas, ya que esta microcuenca representa un recurso de aguas subterráneas prospectivo para el uso humano en el futuro. Esto facilitaría la toma de decisiones entre las numerosas partes interesadas en la asignación de estos bienes.

Un estudio que incluya un análisis descriptivo del riesgo de contaminación en una microcuenca permite estimar el nivel de riesgo al que están expuestas las aguas subterráneas en diversos sectores de la microcuenca.

Se espera que los resultados de la investigación allanen el camino para la identificación de estrategias de gestión alternativas que puedan ser aplicadas por las organizaciones responsables de la gestión de los recursos hídricos subterráneos para



fomentar una cultura de preservación y uso sostenible de los recursos basada en el principio de precaución, que a su vez sirva de base para la definición de directrices que permitan tanto la protección de las aguas subterráneas como de las Notas de abastecimiento y pueda servir de base para una futura legislación.

1.3. HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis general

El nivel de riesgo varía en función a la contaminación del agua subterránea en la microcuenca Jayllihuaya.

1.3.2. Hipótesis específicas

- La vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea es de nivel medio en la microcuenca Jayllihuaya
- La amenaza principal de contaminación del agua subterránea en la microcuenca Jayllihuaya es de nivel medio por la actividad agrícola.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Avaluar el nivel de riesgo de contaminación del agua subterránea en la microcuenca Jayllihuaya, por el método FOSTER.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar el nivel de vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea en la microcuenca Jayllihuaya
- Determinar el nivel de la amenaza principal del agua subterránea en la microcuenca Jayllihuaya.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. Internacional

Fonseca Vargas (2009), “evaluación de los riesgos de contaminación de los acuíferos pertenecientes al municipio de Mosquera”, el objetivo fue determinar el tipo de actividades que están contaminando el agua subterránea del Municipio, como metodología de investigación se utilizó la investigación acción, ya que fue el primer paso para investigar el problema, identificar la principal Nota de contaminación para estudiarla y luego proponer a la comunidad del municipio cambios en el estilo de vida para disminuir la contaminación de los acuíferos. Para el cálculo de la vulnerabilidad se utilizó la técnica GOD y se encontró que las unidades geológicas a las que pertenecen los acuíferos del Municipio de Mosquera presentan cierta vulnerabilidad a la contaminación utilizando el método de indexación "GOD". Se ha determinado que la actividad agropecuaria es una de las principales contribuyentes a la contaminación de las aguas subterráneas debido a los insumos utilizados en este sector de la economía.

Rivera Ramos (2005), la finalidad de este estudio fue “desarrollar un marco para el análisis de riesgo del recurso hídrico dentro del contexto de la gestión integrada del recurso hídrico en la microcuenca del río Pansalic en Mixco, Guatemala”. En el contexto de la gestión integrada a nivel de microcuenca, se utilizaron los métodos DRASTIC y GOD para evaluar la vulnerabilidad, y el método FOSTER para evaluar el riesgo, arrojando un nivel de riesgo de



contaminación III, o contaminación tardía. La combinación del método DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos con el peligro de contaminación resulta ser la metodología que puede emplearse para evaluar el riesgo en la microcuenca del río Pansalic. En la GIRH, el análisis de riesgos se utiliza como técnica de gestión para ayudar a los responsables de la toma de decisiones a sopesar los beneficios e inconvenientes de las posibles líneas de actuación. De ahí que este estudio presente una estrategia global de gestión de los recursos hídricos de la microcuenca del río Pansalic, con el objetivo de salvaguardar y gobernar eficazmente sus recursos hídricos utilizando técnicas de evaluación de riesgos.

Figuroa (2010), evaluación del peligro potencial de contaminación de las aguas subterráneas en la provincia de Talagante, el objetivo de este estudio era cartografiar las regiones de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la provincia de Talagante a escala 1:200.000 y evaluar la gravedad del problema. El procedimiento elegido incluyó la realización de determinaciones separadas y su posterior superposición. Este método permitió identificar las actividades potencialmente contaminantes, que resultaron incluir tanto actividades industriales como agrícolas a una escala bastante grande.

Para utilizar las técnicas de evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos, fue necesario describir y cartografiar primero las características de la región investigada.

Por lo tanto, se utilizó el método GOD (una técnica cualitativa) para determinar la susceptibilidad del acuífero a la contaminación. Al utilizar la técnica GOD, las zonas con una profundidad de agua subterránea inferior a 10 mt se



consideran muy vulnerables, mientras que las que tienen una profundidad de agua superior a 10 mt sólo se consideran moderadamente vulnerables.

2.1.2. Nacional

Palomino S. (2012), análisis de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero Aguascocha. Siendo la minería la principal industria contaminante, era importante evaluar la probabilidad de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero de Aguas Cocha en relación con los peligros existentes. El autor de la Acción COST (Cooperación Europea en Investigación Científica y Técnica) para las explotaciones mineras modificó un enfoque de evaluación de la vulnerabilidad denominado DRASTIC y otro denominado GOD para crear mapas intrínsecos de vulnerabilidad y peligrosidad. Utilizando la cuenca como unidad analítica y la minería como Nota dominante de contaminación de las aguas subterráneas, este estudio pretende desarrollar un protocolo para crear mapas de riesgo de esta amenaza medioambiental. Los métodos DRASTIC (Aller et al., EPA 1987) y GOD (Foster & Hirata, 1991) se utilizaron para crear el mapa de vulnerabilidad, y la metodología de la ACCIÓN COST 620 (Cooperación de la Unión Europea en Investigación Científica y Técnica) fue modificada por el autor para crear el mapa de peligrosidad, que se utilizó a continuación para crear el mapa de riesgo de contaminación. Al superponer estos mapas, pudimos elaborar un mapa de riesgos que nos indicaba qué partes de la cuenca corrían más peligro de contaminación y cuáles menos. Esta herramienta puede utilizarse para señalar las secciones de alto riesgo de la cuenca y recomendar medidas preventivas específicas para mitigar la contaminación en ellas.



2.1.3. Regional

Aguilar (2010), evaluación de la calidad del agua de uso doméstico y agrícola en la microcuenca de Jayllihuaya, el objetivo fue evaluar la calidad del agua de los pozos de abastecimiento público y de las aguas subterráneas potencialmente contaminadas. La técnica de tesis incluyó la observación del comportamiento físico-químico y bacteriano de los contaminantes. “Se midieron las siguientes variables fisicoquímicas en una muestra de once pozos para conocer el comportamiento de los contaminantes: pH, temperatura, conductividad eléctrica, salinidad, dureza total, alcalinidad, cloruros, sulfatos, nitratos, calcio, magnesio, sólidos totales, color, olor, sabor, coliformes totales y coliformes termotolerantes. Los laboratorios de química de la Facultad de Ingeniería Química y de microbiología de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional del Altiplano fueron los responsables de estos estudios”. La investigación de la calidad del agua de los pozos y manantiales concluyó que son marginalmente adecuados para el consumo doméstico y agrícola, pero están influidos por la contaminación biológica. En conclusión, creo que es vital subrayar que las percepciones de los aldeanos sobre la calidad del agua se basan en un conocimiento meramente superficial. Falta conciencia medioambiental, información sobre las actividades de la microcuenca y sus efectos, y una gestión adecuada de los recursos.

Cabrera (2017), evaluación del riesgo de contaminación del acuífero del centro poblado Jayllihuaya-Puno mediante la técnica GOD, 2017. El objetivo principal fue evaluar la susceptibilidad a la contaminación del acuífero Jayllihuaya. Para lograr los objetivos de este estudio se utilizaron métodos paramétricos de superposición e índices GOD, los datos adquiridos fueron



representativos del conjunto para esta investigación. Estos números son una muestra representativa tomada al azar. La información recopilada incluye la profundidad del nivel freático, la litología de la zona no saturada y el tipo de acuífero. Al final, los índices para las tres zonas del acuífero Jayllihuaya fueron los siguientes: vulnerabilidad alta en la zona baja (0.55), vulnerabilidad moderada en la zona central (0.504), y vulnerabilidad baja en la zona alta (0.384). De lo anterior se desprende que el sesenta por ciento del área del acuífero es muy vulnerable.

2.2. CONCEPTOS BÁSICOS

2.2.1. Acuífero

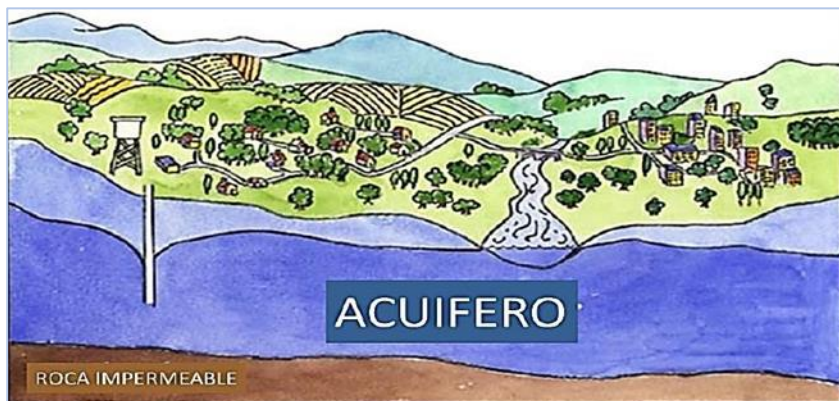
El medio edáfico, caracterizado por su porosidad y sus fracturas, facilita la circulación del agua, lo que permite su utilización por el hombre en proporciones que responden a sus necesidades (Custodio & Llamas, 2001).

Por acuífero se entiende una estructura geológica que sirve de depósito para el almacenamiento de fluidos, al tiempo que facilita su circulación como resultado de influencias gravitatorias o de presión (Vélez, 1999).

Un acuífero se refiere a una capa o estructura geológica que tiene suficiente porosidad y permeabilidad, lo que permite el almacenamiento y movimiento de agua de una manera que es económicamente valiosa para el uso humano en cantidades sustanciales para satisfacer sus necesidades (Castany, 1971).

Figura 1

Modelo de acuífero



Nota: Custodio y Llamas (2001)

2.2.1.1. Clasificación de los acuíferos

a) Según sus características litológicas

Es fundamental destacar las propiedades litológicas de las formaciones geológicas que pueden o no contener agua antes de hablar de las clasificaciones de los acuíferos (Custodio & Llamas, 2001).

- **Acuífero:** Un estrato o estructura geológica que permite el flujo de agua a través de sus poros o grietas se denomina acuífero (del latín aqua=agua y fero=llevar), y es utilizado por el ser humano para satisfacer sus necesidades en cantidades económicamente significativas (Custodio & Llamas, 2001).
- **Acuícludos:** Estructura geológica que, aunque retiene agua en su interior, incluso hasta la saturación, no la transfiere, imposibilitando su uso. La palabra "claudere" procede del latín claudere, que significa rodear o cerrar. Algunos ejemplos de esta categoría son los limos y lixiviados deltaicos y/o estuarinos (a menudo arcillas), que



contienen un alto porcentaje de agua (más del 50% en volumen) pero no son hidrogeológicamente aptos para su uso en captaciones de aguas subterráneas (Custodio & Llamas, 2001).

- **Acuitardos:** El término "tardío" procede de la palabra latina que significa "retrasar", y describe los numerosos tipos de formaciones geológicas que pueden almacenar grandes cantidades de agua pero que sólo la liberan lentamente, lo que las hace inadecuadas para su uso como lugares de captación de agua salvo en raras circunstancias. Si una capa de arcilla limosa o arenosa se sitúa por encima o por debajo de un acuífero más importante, puede actuar como acuífero y rellenar ese acuífero o recibir agua (Custodio & Llamas, 2001).
- **Acuífugos:** Los accidentes geológicos, como un macizo granítico ininterrumpido o rocas metamórficas sin apenas meteorización ni fracturas, se denominan "fugitivos", del latín fugere, que significa escapar (Custodio & Llamas, 2001).

b) Según sus características hidrostáticas.

La estructura y el tipo de porosidad de un acuífero son dos de los principales criterios utilizados para clasificar los acuíferos.

- Los acuíferos con un fondo impermeable y un techo de presión atmosférica se conocen como acuíferos libres, no confinados o freáticos. La infiltración de las precipitaciones a través de la zona no saturada o la infiltración procedente de ríos o lagos son las Notas directas de recarga de este tipo de acuíferos. Dado que el nivel freático sube y baja en respuesta a los patrones meteorológicos, son



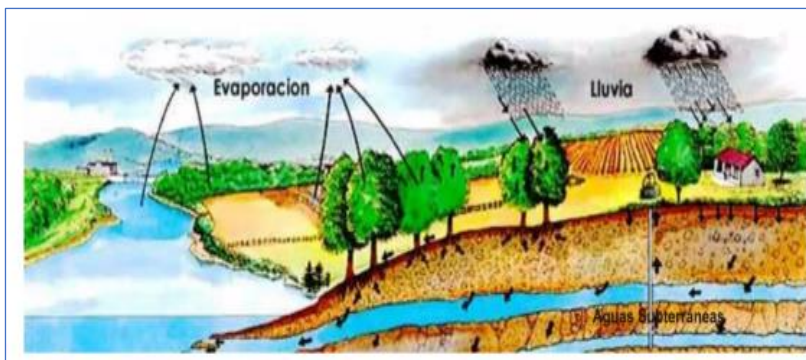
- los que más sufren siempre que hay sequía. Cuando el nivel freático desciende por debajo de la profundidad de un pozo, éste se seca (Collazo & Montaña, 2012).
- Los acuíferos con una formación de baja permeabilidad en la parte superior se denominan acuíferos confinados, cautivos o presurizados. La recarga se produce lateralmente y la presión hidrostática en la superficie del acuífero es superior a la presión atmosférica. El agua de este tipo de acuíferos asciende rápidamente por el interior del acuífero una vez que se hunde un pozo en el acuífero. El afloramiento se produce cuando el agua sube a la superficie. Cuando se suman los niveles hidráulicos medidos en cada pozo de un acuífero restringido, se obtiene un nivel de agua virtual, que se conoce como superficie potencio métrica (Collazo & Montaña, 2012).
 - Más frecuentes en la naturaleza que los acuíferos completamente confinados son los acuíferos semiconfinados o semicautivos. “En ellos, los estratos de baja permeabilidad constituyen el techo, el suelo o ambos, complicando, pero no impidiendo el movimiento vertical del agua. Para que se produzca, además de la permeabilidad, son necesarios cambios de carga o de potencial hidráulico entre el acuífero semiconfinado y un acuífero situado por encima. Las unidades de baja permeabilidad, como los acuíferos semiconfinados, las filtraciones o los acuitardos, son responsables de la recarga y el drenaje de los acuíferos semiconfinados (Collazo & Montaña, 2012).

2.2.2. Agua subterránea

En términos generales se entiende por agua subterránea aquella que se encuentra debajo de la superficie. No obstante, se debe tener presente que ni toda el agua que penetra en el suelo se considera propiamente agua subterránea, ni toda el agua que se infiltra y se almacena de modo tal que se pueda extraerse en cantidades suficientes para satisfacer necesidades humanas (Llamas Madurga, 1996).

Figura 2

El agua subterránea como parte del ciclo hidrológico



Nota: <http://madrimasd.org> (2007).

El agua que se encuentra bajo la superficie de la tierra se denomina agua subterránea. Aunque algunos autores se refieren a ella como geohidrología, es importante señalar que la hidrogeología se dedica únicamente a la hidráulica de las aguas subterráneas; por tanto, un subcampo de la hidrología. Los hidrogeólogos investigan de dónde proceden las aguas subterráneas, cómo viajan, dónde se distribuyen bajo tierra y cómo se conservan. En cuanto a la hidratación del subsuelo, se ha establecido que la gran mayoría de las aguas subterráneas proceden de la infiltración del agua de lluvia. Sin embargo, existen otras Notas de agua subterránea, como el magmatismo y el vulcanismo (aguas juveniles) y las



aguas subterráneas atrapadas en los poros de las rocas sedimentarias durante su deposición (aguas fósiles), aunque sus cantidades combinadas son insignificantes en comparación con las procedentes de la infiltración del agua de lluvia (Madeley, 2005).

A escala mundial, las aguas subterráneas son la mayor Nota de agua dulce accesible y, sin embargo, se utilizan mucho menos que las aguas superficiales. Como ya hemos dicho, el ciclo hidrológico incluye la infiltración de las aguas superficiales, que representan el 97% del agua dulce a la que tiene acceso el ser humano. La lluvia que se queda en lugar de perderse por escorrentía o evaporación se utiliza para rellenar los acuíferos. También puede producirse por infiltración del agua de los ríos o de la nieve fundida (Madeley, 2005).

Los recursos hídricos subterráneos se consideran una Nota fiable y de bajo coste de agua para uso humano tanto en zonas urbanas como rurales, ya que están contenidos en perfiles subterráneos. Es posible que este recurso se contamine más allá de su recuperación debido a la inviabilidad técnica y económica de su tratamiento si las cargas contaminantes generadas por las actividades humanas superan la capacidad natural de atenuación del suelo y los estratos subyacentes y se vierten sobre el terreno (Schmoll et al., 2006).

Las precipitaciones, la percolación desde los cursos de agua superficiales a las aguas subterráneas y la filtración desde arroyos, lagos, canales, embalses y otros depósitos de agua son las principales Notas de aguas subterráneas (Serruto, 2001).



2.2.2.1. Importancia de las aguas subterráneas

Es importante mencionar que al agua subterránea le corresponde el 25.7 por ciento del total de agua dulce y 98.4 por ciento del agua dulce no congelada en la hidrosfera. Por ello, representa una Nota potencial de mucha importancia de abastecimiento de agua en el mundo (Davis, 2005).

La importancia de las aguas subterráneas como reserva de agua y recurso medioambiental es cada vez más evidente. Al proporcionar el caudal básico, el agua que nutre los ríos durante todo el año, a los sistemas de aguas superficiales, muchos de los cuales sirven para el abastecimiento de agua y usos recreativos, las aguas subterráneas son fundamentales para el ciclo hidrológico y desempeñan un papel básico en el mantenimiento de los humedales y los caudales fluviales y como amortiguador de los efectos de las sequías (Comisión Europea, 2008).

Dada la importancia de estos recursos hídricos, cabe esperar que la salvaguarda de los acuíferos para evitar la degradación de la calidad natural de las aguas subterráneas haya recibido ya mucha atención en los grandes centros metropolitanos y sus alrededores. Sin embargo, por diversas razones, los países latinoamericanos aún no han prestado mucha atención a la conservación de los acuíferos. El transporte de contaminantes en las aguas subterráneas y su flujo son difíciles de controlar y cuantificar. Ambos procedimientos son notoriamente lentos. Por ello, ni siquiera los gestores de los recursos hídricos y del suelo están muy preocupados por la posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas. La magnitud y duración de muchos incidentes de contaminación de aguas subterráneas, el



daño que infligen a las Notas de agua potable y el elevado precio o la imposibilidad técnica de rehabilitar los acuíferos hacen de éste un problema acuciante y relevante (CEPIS, 1991).

2.2.2.2. Contaminación de las aguas subterráneas

Cada vez más personas de los países más industrializados y en vías de desarrollo recurren a la palabra contaminación para describir su creciente preocupación por el estado del medio ambiente. Sin embargo, la idea de contaminación es a menudo intuitiva, lo que la hace difusa e imprecisa; definirla con precisión es por tanto esencial (Fetter, 1999)

La contaminación de las aguas subterráneas se produce cuando los subproductos de diversas actividades humanas penetran en el acuífero, dando lugar a la introducción o acumulación de compuestos típicos de dichas actividades.

Varias formas de contaminación pueden contaminar las aguas subterráneas. La infiltración de agua procedente del arrastre de pesticidas y fertilizantes agrícolas en exceso, por ejemplo, provoca una concentración creciente de nitratos en las aguas subterráneas; éste es sólo un ejemplo de contaminación directa o puntual, sin dilución, cuando las sustancias contaminantes se introducen en el subsuelo y llegan directamente al acuífero. La lenta entrada subterránea de agua de mar en zonas costeras con bombeo excesivo es un escenario totalmente distinto; esta intrusión marina provoca la mezcla creciente de agua salada y agua dulce del acuífero, de forma que los sondeos de la zona afectada suministran agua

cada vez más cargada de sales, hasta el punto de resultar inutilizable (Fetter, 1999).

A continuación, se enumeran algunas de las características más destacadas de las aguas subterráneas contaminadas (Fetter, 1999).

- Hay una gran variedad de lugares que pueden estar liberando contaminantes y sustancias contaminantes.
- Los usos del suelo urbano, industrial y agrícola dan lugar a distintos tipos de contaminación, pero cada uno tiene su propio origen.
- Puede haber lugares de contaminación puntual o contaminación generalizada.
- Un factor esencial para evitar, vigilar o erradicar la contaminación de un acuífero es el lento movimiento y la gran inercia de las aguas subterráneas en respuesta a estímulos externos.
- Diversas variables, incluidas las características del terreno y el flujo de las aguas subterráneas a través del mismo, tienden a diluir la contaminación gradualmente con el tiempo y a lo largo del recorrido de la contaminación.

Figura 3.

Contaminación del agua subterránea



Nota: Fetter (1999).



Sin embargo, cuando se produce contaminación, es mucho más difícil limpiar las aguas subterráneas que las superficiales. Esto se debe a que el ritmo de reposición de las aguas subterráneas es bastante lento. Se considera que el periodo de residencia típico del agua en los ríos es de días, mientras que en un acuífero es de cientos de años, lo que dificulta enormemente su limpieza (Bellino, 2012)

2.2.2.3. Mecanismos de introducción y propagación de la contaminación en el agua subterránea.

Existen varias vías, a menudo enrevesadas, por las que los contaminantes pueden entrar y propagarse dentro de un acuífero, llegando incluso a regiones remotas. Los criterios para clasificar estos sistemas son igualmente intrincados y pueden prolongarse casi eternamente (Deutsh, 1963).

Una útil categorización tiene en cuenta la ubicación de la Nota de propagación de la contaminación. A continuación, se presentan algunos ejemplos de procesos razonablemente comunes que entran en cada una de las tres categorías descritas (Deutsh, 1963).

2.2.2.4. Mecanismos de propagación a partir de la superficie

La contaminación de las aguas subterráneas causada por el hombre se produce principalmente de dos formas: por infiltración de aguas superficiales contaminadas procedentes de ríos, canales de riego, etc., y por vertido de residuos en la tierra o uso de fertilizantes (Deutsh, 1963).

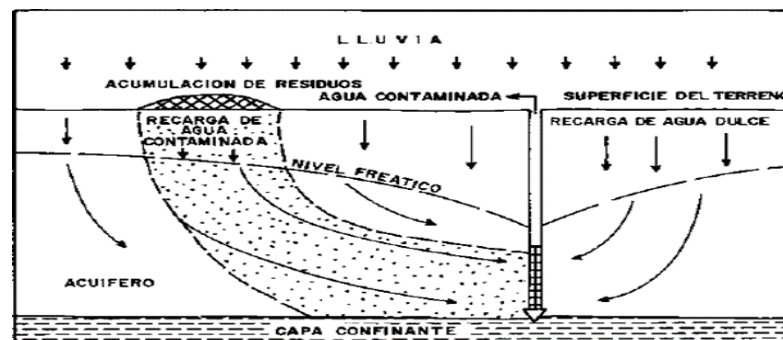
- Los lixiviados de la basura depositada en la superficie pueden contaminar los acuíferos.

La eliminación de residuos sólidos o efluentes de instalaciones de tratamiento vertidos en cauces secos, vertederos no gestionados y la acumulación de diversas sustancias en la superficie, en vertederos, etc., pueden estar relacionados con este escenario.

La lixiviación de materiales solubles de la basura acumulada por las lluvias podría provocar la contaminación de la zona saturada, del flujo subterráneo y, en última instancia, de las tomas de agua subterránea (Deutsh, 1963).

Figura 4

Contaminación del agua subterránea por lixiviado de residuos sólidos depositados en superficie.

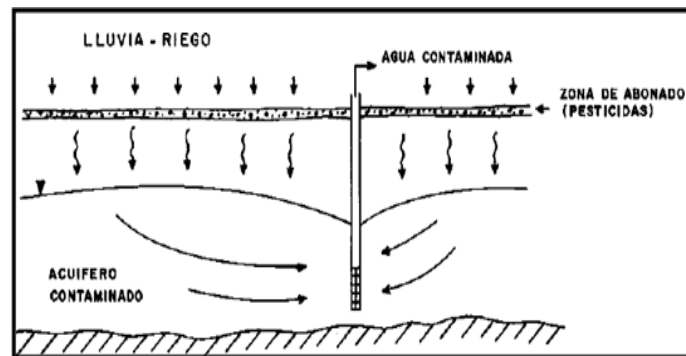


Nota: Deutsh (1993).

Contaminación relacionada con la agricultura (por fertilizantes, herbicidas y riego). Suele ocurrir cuando los fertilizantes, insecticidas, etc., se disuelven al infiltrarse el agua (de lluvia o de riego). Si se extrae agua del acuífero, por ejemplo, existe la posibilidad de que el agua esté contaminada (Deutsh, 1963).

Figura 5

Contaminación difusa por actividades agrícolas



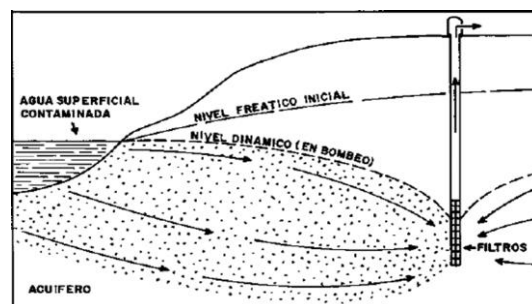
Nota: Deutsh (1963).

La introducción de aguas superficiales contaminadas en un pozo por medios artificiales.

La inversión del flujo producida por la extracción de agua subterránea cerca de un río, canal, zanja, etc. que recoge agua de retorno de riego, efluentes urbanos o industriales, etc. puede mostrarse en la figura como una condición contaminada. Dado que el bombeo altera la dirección del flujo, un pozo puede acabar recogiendo aguas superficiales contaminadas si funciona de forma continua durante el tiempo suficiente (Deutsh, 1963).

Figura 6

Flujo inducido de agua superficial contaminada hacia un pozo



Nota: Deutsh (1963).

2.2.2.5. Mecanismos de propagación desde la zona no saturada

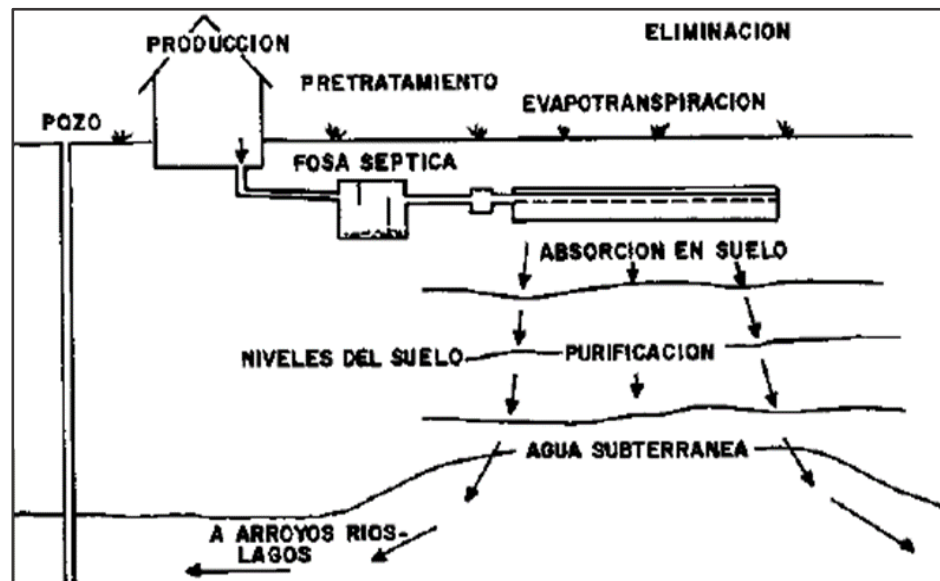
- Aguas residuales domésticas

Las fosas sépticas, el reciclaje de efluentes y otros métodos de tratamiento de aguas residuales domésticas podrían entrar en esta categoría (Bouma, 1972).

Las concentraciones de estos sistemas de vertido suponen una amenaza mucho mayor cuando se sitúan en lugares donde las condiciones hidrogeológicas favorecen la infiltración, como las zonas de recarga de los acuíferos. Las captaciones de agua pueden verse seriamente amenazadas por la penetración de determinados contaminantes hasta la capa freática, a pesar de que en la zona no saturada se producen mecanismos de adsorción del suelo y de atenuación de la contaminación (Bouma, 1972).

Figura 7

Retención en el suelo de efluentes de fosas sépticas



Nota: Bouma (1972).

- Embalsamiento superficial

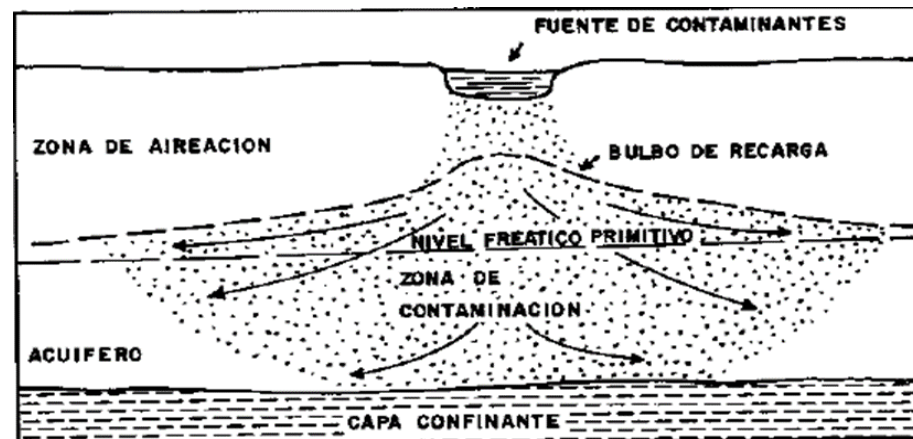
Ya sea en excavaciones naturales o artificiales, en graveras o incluso en vertederos controlados, el sistema puede utilizarse para gestionar la acumulación de residuos líquidos procedentes de Notas muy diversas (balsas de evaporación o concentración, balsas de infiltración de empresas, alcoholeras, etc. (Bouma, 1972).

La creación del bulbo de recarga puede dar lugar a circunstancias de inversión parcial del flujo, que pueden afectar a cuencas que antes eran inmunes a la contaminación en el sistema de flujo del acuífero primario (Deutsch, 1963).

La situación en la que el embalse entra en contacto directo con la zona saturada (a menudo el caso de las graveras abandonadas) es especialmente importante porque el contaminante encuentra entonces una vía de acceso directa al acuífero (Deutsch, 1963).

Figura 8

Percolación de contaminantes a través de la zona de aireación hacia un acuífero libre



Nota: Deutsch (1963).

2.2.2.6. Mecanismos de propagación

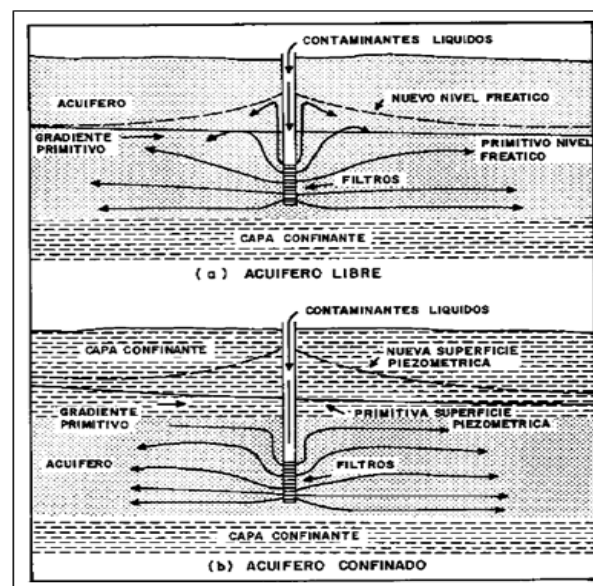
- Pozos de inyección

Por ejemplo, agua contaminada térmicamente procedente de operaciones de calefacción o refrigeración, salmuera de mina o efluentes industriales inyectados directamente en pozos para su eliminación (Deutsch, 1963).

Cuando los pozos y sondeos se utilizan con este fin sin planificarlos, construirlos, situarlos o controlarlos adecuadamente, representan un peligro importante y quizá el más directo para la calidad de las aguas subterráneas. En realidad, pueden provocar el desplazamiento de agua salina a acuíferos de agua dulce, la filtración a acuíferos con agua de buena calidad como consecuencia de fracturas hidráulicas imprevistas, etc. (Deutsch, 1963).

Figura 9

Programación de contaminantes inyectadas en acuíferos



Nota: Deutsch (1963).



2.2.2.7. Notas potenciales de contaminación

El hecho de la contaminación lleva implícita una disminución de la calidad de las aguas subterráneas, que puede ser provocada directamente por la acción humana o indirectamente por procesos naturales, o más a menudo por la acción combinada de ambos. Los párrafos siguientes se centran sobre todo en la contaminación provocada por la acción humana (Fetter, 1999).

La sabiduría convencional clasifica las principales Notas de contaminación de las aguas subterráneas en cuatro categorías en función de las actividades humanas que las generan (Fetter, 1999).

- Contaminación urbana y doméstica

El mayor peligro directo para la calidad de las aguas subterráneas procede de las dos formas principales de residuos producidos por estas actividades: los residuos sólidos y los residuos líquidos, o aguas residuales urbanas. Los residuos gaseosos tienen menos influencia directa en las aguas subterráneas que los otros tipos de residuos, pero pueden tener un impacto importante en la composición de las precipitaciones, la principal Nota de recarga de la mayoría de los acuíferos de las áreas metropolitanas contaminadas (Candela Lledó, 2002).

- Residuos sólidos urbanos y domésticos

Salvo en climas áridos, los residuos depositados en vertederos controlados -y en mayor medida en vertederos incontrolados- están sujetos



a la lixiviación por el agua de lluvia y otros residuos líquidos (Candela Lledó, 2002).

Como puede verse en la Tabla 1, las concentraciones totales de sólidos disueltos y contaminantes en el lixiviado líquido producido por este procedimiento pueden ser bastante elevadas (L. Candela Lledó, 2002).

Esto sugiere que el lixiviado tiene una composición química muy variada. Cuando se concentran Cl^- , SO_4^{2-} , H_2CO_3 , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , y Mg^{2+} , el contenido de sólidos disueltos suele ser bastante alto durante años, pero esto no suele ser evidente al principio. Los lixiviados suelen ser extremadamente reductores y suelen incluir mucho NH_4^+ , Fe , Mn y Zn ; las necesidades químicas y biológicas de oxígeno suelen ser elevadas (L. Candela Lledó, 2002).

Aunque en el agua puede haber un millón de veces más bacterias que en el suelo, los gérmenes nocivos tienen muchas más dificultades para prosperar en ella. Salvo en el caso de que la basura se amontone bajo el nivel freático, rara vez se detectan coliformes, lo que indica que la contaminación por organismos patógenos no alcanza niveles perjudiciales (Candela Lledó, 2002).

El aumento de la mineralización del agua del acuífero debido a la contaminación puede manifestarse de diversas formas, entre otras, aumento de la temperatura, color y olor desagradables, alto contenido de NH_4^+ y DQO, y quizás reducción del SO_4^{2-} , falta de NO_3^- , presencia de Fe y alto contenido de COI (en lo que se refiere al pH (Candela Lledó, 2002).

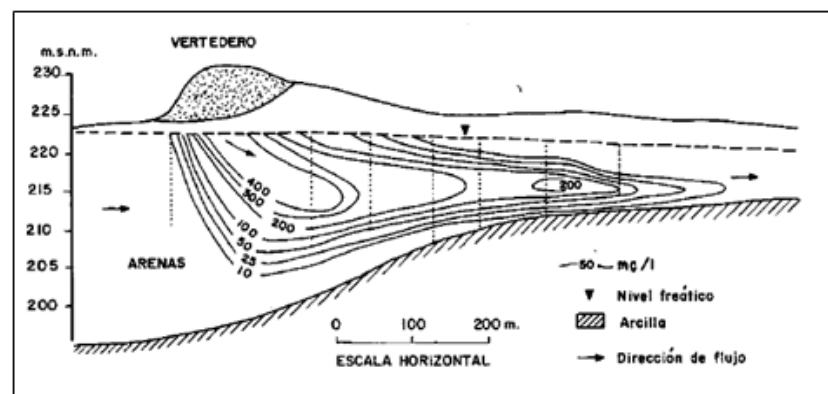
En zonas no áridas, el proceso de lixiviación puede continuar durante cientos o miles de años después de la construcción del vertedero. (Al parecer, todavía hoy se producen lixiviados en vertederos de la época romana) (Freeze & Cherry, 1979).

En circunstancias óptimas (alta humedad, alta actividad biológica y alta temperatura), la descomposición bioquímica de la materia orgánica de la basura doméstica produce gases además del lixiviado líquido que se observa en los vertederos. Es posible que los gases emitidos contengan hasta un 90% de dióxido de carbono y hasta un 55% de metano. Este último tiene el potencial de convertirse en explosivo (Freeze & Cherry, 1979).

Teniendo en cuenta que en estos vertederos se depositan residuos industriales sólidos procedentes de empresas urbanas, la lista de elementos que suponen una amenaza para el medio ambiente debe ampliarse más allá de los ya enunciados (Freeze & Cherry, 1979).

Figura 10

Penacho de contaminación producido por un vertedero en acuífero arenoso



Nota: Freeze y Cherry (1979).



- Residuos líquidos urbanos y domésticos

Las pérdidas por redes de alcantarillado, infiltraciones por pozos negros y fosas sépticas, vertidos directos a cauces secos, etc., representan un peligro más directo para los acuíferos, al igual que las actividades de riego erróneamente realizadas con este tipo de aguas. En lugares hidrogeológicamente propicios a la infiltración (zonas de recarga de acuíferos kársticos o extremadamente porosos, etc.), el peligro aumenta siempre que se producen vertidos o pérdidas de riego. Los microorganismos patógenos que pueden acompañar al vertido de residuos líquidos municipales y residenciales son eliminados por la acción filtrante del suelo y de la zona no saturada, protegiendo las aguas subterráneas en diversos grados. Sin embargo, en la actualidad no existe una solución concluyente a la cuestión de cómo los virus mantienen su existencia (Freeze & Cherry, 1979).

El agua puede desarrollar malos olores y sabores si los acuíferos se contaminan con materiales orgánicos debido al deterioro anaeróbico.

El suelo puede absorber una gran variedad de moléculas orgánicas, pero estos compuestos pueden sufrir cambios químicos que aumenten el peligro de contaminación, como la conversión del nitrógeno orgánico en nitratos altamente solubles (Freeze & Cherry, 1979).

La implantación de límites protectores en torno a las cuencas adyacentes a vertederos y emisarios de efluentes, el control riguroso de estos límites, la aplicación de medidas de tratamiento antes de la eliminación de residuos líquidos y la ubicación adecuada de los vertederos



de residuos sólidos en la zona son componentes integrales de un planteamiento global destinado a abordar tanto los residuos sólidos como los líquidos en el contexto de la contaminación urbana y doméstica (Freeze & Cherry, 1979).

- **Contaminación agrícola**

Las actividades agrícolas son quizá el factor más generalizado y consecuente del deterioro de la calidad de las aguas subterráneas debido a la actividad humana. Salvo en algunas situaciones (vertidos particulares de explotaciones agrícolas, por ejemplo), este tipo de contaminación se define por su naturaleza difusa, que la diferencia de otros tipos de contaminación generados por actividades similares (CEDEX, 1993).

Los fertilizantes, los plaguicidas y, de manera indirecta, los métodos de riego reciclados, tienen el potencial de ser los mayores peligros medioambientales en este sector. Los residuos animales (purines) vertidos en el campo, el almacenamiento de residuos agrícolas, etc., son otros contribuyentes menores a la contaminación (Javier Sánchez San Román, 1998).

En términos de contaminación de las aguas subterráneas, los productos químicos nitrogenados que se encuentran en los fertilizantes son los nutrientes más preocupantes debido a su movilidad. El estiércol, la urea, el amoníaco, el sulfato de amonio, el nitrato de amonio, el carbonato de amonio, etc., son formas comunes en las que estos elementos se utilizan como fertilizantes (Javier Sánchez San Román, 1998).



Principalmente NO₃, NO y NH se incorporan al agua de infiltración como resultado de la lixiviación por las precipitaciones o el agua de riego, estando los dos últimos presentes en proporciones considerablemente menores (menos del 1% del total de nitrógeno lixiviado) (Javier Sánchez San Román, 1998).

Las concentraciones de nitratos en el agua que llega a la zona saturada se ven afectadas por muchas variables, “como el contenido natural de nitrógeno orgánico del suelo, la cantidad y frecuencia de aplicación de fertilizantes, y las condiciones físicas del suelo y las condiciones externas” (precipitaciones, riego, etc. (Guerra, 1979).

Las aguas subterráneas afectadas por la agricultura pueden presentar concentraciones de nitratos muy variables debido a los factores antes mencionados. Las concentraciones máximas se dan en la parte superior de la zona saturada, y las más bajas aparecen en la parte inferior, en la mayoría de los acuíferos libres, ya que su distribución está directamente relacionada con la profundidad de las captaciones. Cuando la zona saturada tiene sólo unas micras de espesor, las concentraciones pueden llegar a ser notablemente uniformes a lo largo del tiempo (Guerra, 1979).

El alcance, la gravedad y la longevidad del problema de los nitratos en las regiones de agricultura intensiva van en aumento. La rápida propagación del problema por la mayor parte de España, desde el interior hasta la costa y las islas, es motivo de preocupación, cuando no de alarma absoluta (Guerra, 1979).



El aumento de las concentraciones de sulfato, cloruro y fósforo en las aguas subterráneas puede deberse al uso de fertilizantes a “base de sulfato de amonio [(NH)₄SO₄], cloruro de potasio [KCl] o carbonato de potasio [K₂CO₃]; éstos no suelen ser muy móviles si su uso no supera la capacidad de fijación del suelo y no se producen cambios en la solubilidad”. Sin embargo, en la mayoría de los casos, los nitratos suponen una amenaza mayor que estos productos químicos (Guerra, 1979).

Cuando el agua de penetración (lluvia o riego) lixivia los plaguicidas y otros productos químicos fitosanitarios del suelo, pueden convertirse en contaminantes potenciales de las aguas subterráneas. El mayor peligro de contaminación procede de los plaguicidas orgánicos clorados, debido a su larga vida media, su elevada toxicidad y su toxicidad selectiva. Debido a su toxicidad y potencial de acumulación, muchos de estos compuestos están ahora prohibidos o sujetos a estrictas normas. Sin embargo, el peligro que representan para las aguas subterráneas se ve mitigado por su baja solubilidad y su fuerte adsorción por el suelo (Feodorova, 1985).

La liberación de estiércol animal es otra Nota potencial de materiales contaminantes. Los nitratos se derivan principalmente del nitrógeno, y una Nota importante de nitrógeno son los residuos líquidos y la materia orgánica producidos por las explotaciones ganaderas. El riesgo de contaminación aumenta considerablemente cuando estos residuos se depositan sin tratamiento y con frecuencia en regiones inadecuadas antes de ser integrados en el suelo (fertilización, riego). Los efluentes o lixiviados de estas explotaciones suelen contener cantidades importantes



de coliformes fecales, DBO5 (1.000-30.000 mg/l) y sólidos en suspensión (1.000 mg/l en el caso de las explotaciones porcinas) (Feodorova,1985).

Por último, es importante subrayar que los lugares que dependen en gran medida del riego son propensos a la contaminación, sobre todo por nitratos (Feodorova,1985).

La capacidad del agua de riego para disolver las sales del suelo y lixiviar fertilizantes y pesticidas contribuye al aumento de sales que puede deteriorar la calidad de las aguas subterráneas en estas zonas. Las plantas sólo utilizan una pequeña parte de las sales existentes (Guerra, 1979).

Diversos factores, como el tipo de suelo y de cultivo, la concentración de sal en el suelo, las precipitaciones, etc., influyen en la cantidad de sal que puede filtrarse al acuífero (Guerra, 1979).

Reutilizar o reciclar el agua de riego conlleva el riesgo de aumentar la salinidad, lo que a su vez supone un incremento progresivo del contenido en sales, que puede ser insignificante a escala anual, pero que puede inutilizar el agua para el uso previsto a largo plazo” (Guerra, 1979).

En algunos casos, pueden ser necesarios tratamientos correctivos basados en la aplicación de yeso al suelo para desplazar el sodio y restaurar la permeabilidad original causada por el exceso de sodio en el suelo, que suele estar relacionado con estas prácticas (Sawyer et al., 2000).

Los problemas de contaminación más acuciantes provocados por la agricultura pueden resumirse en cinco categorías clave, enumeradas por orden de importancia reconocida (Sawyer et al., 2000).



- Los niveles de nitratos en los acuíferos pueden aumentar drásticamente cuando se hace un uso excesivo de fertilizantes nitrogenados y fosforados en regiones de regadío con suelos porosos y Notas de agua no confinadas.
- Las regiones con riego abundante tienen un alto índice de reciclado de las aguas subterráneas.
- Vertido descuidado de estiércol animal en lugares sensibles, aplicación inadecuada o excesiva de plaguicidas en suelos muy permeables con poca capacidad de adsorción.
- **Contaminación industrial**

La contaminación de las aguas subterráneas causada por la industria se caracteriza por dos aspectos principales. Por un lado, el gran número de compuestos químicos (orgánicos e inorgánicos) que pueden producirse en esta industria y, por tanto, suponer un riesgo de contaminación. Por otro lado, esta contaminación suele ser de carácter local o intermitente, distinguible de una industria a otra (Candela Lledó, 2002).

Los principales factores que contribuyen a este tipo de contaminación son la emisión de restos de fabricación a la atmósfera, el suelo y las aguas superficiales o subterráneas; la liberación de compuestos contaminantes durante el almacenamiento o el transporte; y los incidentes ocurridos en tanques, tuberías e infraestructuras similares.

En algunos residuos líquidos pueden estar presentes sustancias químicas tóxicas extremadamente nocivas que son persistentes, se retienen



mal en la matriz sólida del acuífero o son poco degradables. En otros casos, se trata de agua salada inofensiva o de agua con propiedades térmicas inusuales (Candela Lledó, 2002).

Además de verterlos en las vías fluviales superficiales, los métodos habituales de eliminación incluyen inyectarlos en acuíferos salinos o secos, almacenarlos temporalmente en estanques o balsas de evaporación, excavarlos o distribuirlos en la tierra mediante riego o pulverización (Candela Lledó, 2002).

Además de los problemas señalados en la eliminación de residuos sólidos urbanos, también están los inherentes a la naturaleza peligrosa de los vertidos que se crean en muchos tipos de industria cuando la basura sólida se deposita en vertederos y escombreras, que a menudo no están regulados” (Candela Lledó, 2002).

Dado que la magnitud de la cantidad derramada suele ser ignorada o arrastrada por el agua, lo que favorece las condiciones de infiltración, los accidentes relacionados con el transporte y la manipulación de productos químicos industriales líquidos suelen plantear peligros especiales sustanciales para las aguas subterráneas (Medellin, 2002).

Debido a las estrictas condiciones hidrogeológicas necesarias, encontrar un emplazamiento permanente para los residuos radiactivos sigue siendo un reto mundial sin resolver y sin las garantías adecuadas.

La minería es un sector vital de la industria, pero tiene efectos de gran alcance en los suministros de aguas subterráneas debido a los lugares en los que a menudo se lleva a cabo (Candela Lledó, 2002).



La minería del carbón y la fundición de metales producen la mayoría de los contaminantes sólidos que pueden contaminar las aguas subterráneas (Medellin, 2002).

La filtración ascendente de este tipo de agua a partir de un revestimiento deficiente en los pozos de producción puede contaminar los acuíferos suprayacentes debido a las características artesianas originales del sistema hidrocarburo-agua (Candela Lledó, 2002).

Los vertederos, depósitos de minerales, etc., pueden considerarse vertederos, normalmente incontrolados, que suponen un peligro para la calidad de las aguas subterráneas de la zona debido a los contaminantes singulares que pueden crear en función del método de extracción (Victoria, 1999).

- **Contaminación inducida por bombeo (Intrusión)**

El agua de alta salinidad puede filtrarse en los acuíferos de agua dulce y contaminarlos en cualquier momento. La contaminación (intrusión salina) puede deberse a cualquier Nota de agua salina en los acuíferos continentales (como los suelos yesíferos o los vertidos de flujos de larga distancia), mientras que el agua salada es el principal contaminante en los acuíferos costeros. La infiltración marina describe el segundo tipo de contaminación (Hubert, 1940).

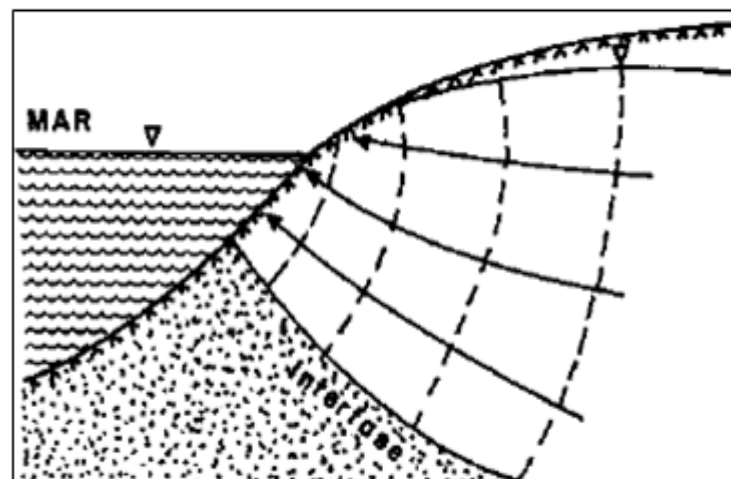
Una de las Notas de contaminación más comunes y difíciles de controlar en la mayor parte de la costa mediterránea española y los territorios insulares es la mezcla de agua salada con agua dulce en los acuíferos costeros. Aunque la infiltración de agua salada en tierra es un

problema en algunas regiones del interior, “la intrusión marina es mucho más preocupante debido a su frecuencia y a las características únicas de la región costera en la que se produce (alta densidad de población, escasas precipitaciones, condiciones ideales para asentamientos turísticos, industriales y agrícolas, y una práctica escasez, si no ausencia, de agua superficial permanente)”. Por ello, aquí profundizamos en el desarrollo de las ideas fundamentales del mecanismo de incursión (Hubert, 1940).

En circunstancias normales, el agua de mar se hunde por debajo del agua dulce en los acuíferos costeros, creando una cuña de agua salada que se desplaza tierra adentro. Se forma una interfaz entre ésta y la parte superior de la cuña de agua salada de agua salobre (Hubert, 1940).

Figura 11

Interfase agua dulce- agua salada en un acuífero costero



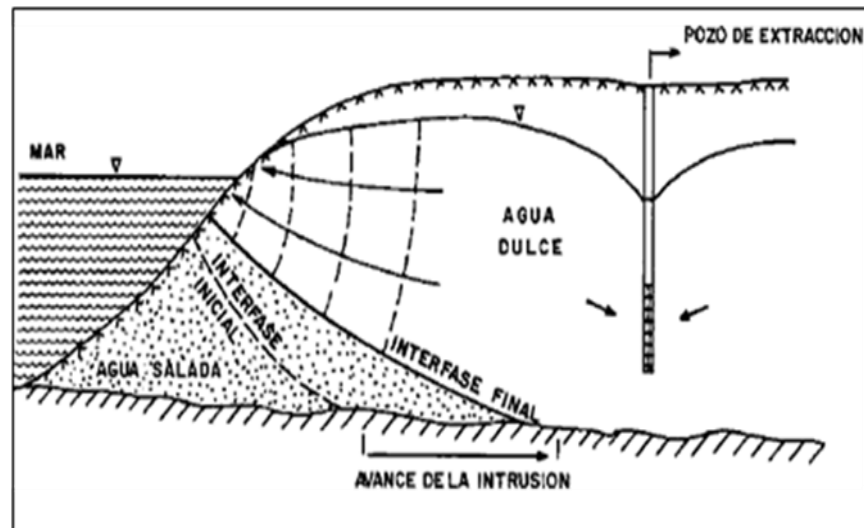
Nota: Hubert (1940).

La acción humana, a menudo un bombeo excesivo del medio ambiente, ha precedido casi siempre al inicio de la incursión marítima. Si la fuerza del bombeo es lo suficientemente alta, se concentra (Victoria, 1999).

A medida que disminuye la cantidad de agua dulce que drena hacia el océano, la cuña se desplaza gradualmente hacia el interior a medida que aumenta la interfase circundante (Victoria, 1999).

Figura 12

Avance de la interfase tierra adentro como consecuencia del bombeo excesivo

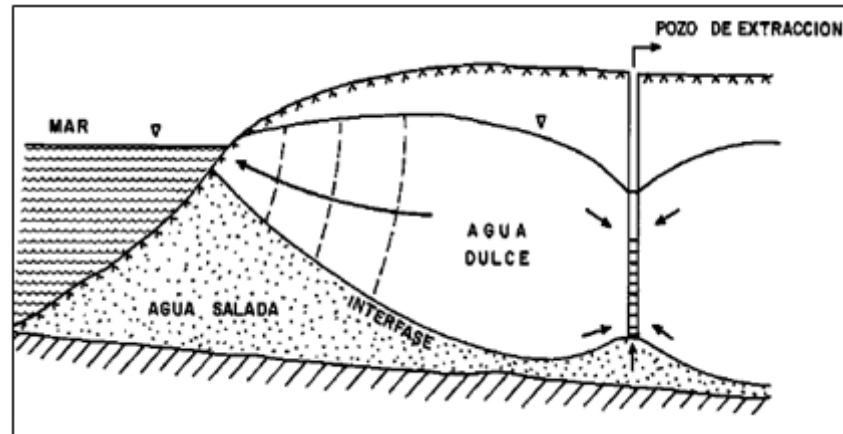


Nota: Hubert (1940)

Si se detiene la salida de agua dulce hacia el océano, el acuífero acabará llenándose de agua salina. Si se mantiene el bombeo, puede producirse un abombamiento de la interfase (domo salino) y el agua salada puede acumularse directamente en el pozo de bombeo, a pesar de que parte del agua dulce fluya hacia el mar (Victoria, 1999).

Figura 13

Contaminación directa de una captación por agua salada como consecuencia del bombeo excesivo



Nota: Hubert (1940).

En una primera aproximación, la fórmula de Ghyben-Herzberg determina la profundidad de contacto teórica entre el agua dulce y el agua salada para condiciones estacionarias en un acuífero monocalca:

$$Z = 40 \text{ hd} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

z = profundidad del agua salada

hd = nivel piezométrico del agua dulce en un piezómetro abierto en ella.

La construcción de canales de drenaje, sobre todo en las zonas costeras bajas, también puede contribuir a la contaminación por intrusión marina, ya que bajan el nivel freático al desviar menos agua dulce hacia el mar y, al mismo tiempo, permiten que el agua marina se infiltre en el acuífero al fluir por ellos durante la marea alta, contaminando las reservas de aguas subterráneas situadas lejos tierra adentro (Hubert, 1940).



Los aditivos utilizados en el lavado se han relacionado con un aumento de la contaminación en los vertidos urbanos, problemas de corrosión, mayores costes de tratamiento del agua, pérdida de captaciones para regadíos, deslocalización de empresas y otros problemas (Victoria, 1999).

El conocimiento del funcionamiento de un acuífero es esencial para explotarlo racionalmente, ya que permitirá establecer un escenario de compromiso entre la explotación requerida y la penetración admisible de agua en el acuífero, todo ello respetando un estricto plan de seguimiento, control y previsión (Victoria, 1999).

2.2.2.8. Comportamiento de los contaminantes

La zona no saturada actúa como primera línea de defensa contra la contaminación del acuífero, por lo que no debe permitirse que los contaminantes se filtren directamente a la zona saturada. Los pozos, fosas, excavaciones y cursos de agua temporales o intermitentes suponen una mayor amenaza para el medio ambiente y deben evitarse en la medida de lo posible cuando se viertan contaminantes. La zona no saturada actúa como amortiguador debido a las causas mencionadas y a que la velocidad del flujo es muy baja en ella. En condiciones secas y semiáridas, el nivel piezométrico tiende a ser más profundo como resultado de una menor recarga. Cabe señalar que las velocidades medias de flujo descendente en la zona no saturada suelen ser de aproximadamente un metro al año, aunque algunos lugares pueden experimentar velocidades mucho menores. Las velocidades de flujo dentro de la zona saturada suelen oscilar entre



decenas y cientos de metros al año, con la excepción de algunos acuíferos kársticos en los que las velocidades pueden alcanzar cientos de metros al año (Bredehoeft, 1992).

Aunque es probable que el intercambio de contaminantes entre el agua que se mueve a través de las fisuras y el agua considerablemente menos móvil de la matriz porosa sea insignificante en las fisuras grandes, sí se produce en los entornos fracturados. Cuando la infiltración es modesta, la mayor parte de la recarga pasa por la matriz porosa en lugar de por las fisuras, a menos que la roca matriz sea particularmente impermeable. Si el área de la zona no saturada es grande, esto hace que los tiempos de llegada se prolonguen. Es posible que el flujo se sitúe sobre todo en las fisuras, especialmente en el caso de infiltraciones importantes tras precipitaciones intensas o en caso de infiltración de aguas superficiales. El espesor y el contenido de humedad de la zona del suelo que sirve de amortiguador a los impulsos de recarga regulan la disponibilidad de flujo para el sistema de fisuras y, por extensión, de contaminantes (Skinner, 1985).

En mayor medida que las aguas superficiales, las subterráneas están al abrigo de la contaminación. Las dificultades que plantean se han pasado por alto a menudo en el pasado debido a esta creencia, a pesar de que a menudo son más acuciantes de lo que se pensaba. Dada la total ausencia de controles en los acuíferos, los escasos esfuerzos realizados hasta ahora en España para minimizar la contaminación de los ríos se han centrado en ellos. Lo mismo ocurre en otros países (Kerns, 1977).



Los acuíferos tardan en contaminarse porque la contaminación se desplaza lentamente por las zonas saturadas y no saturadas. Algunas toxinas pueden ser removilizadas y viajar más rápido que el flujo típico de las aguas subterráneas debido a la complejación y la presencia de coloides, sin embargo, esto no se ve y puede ser perjudicial incluso en cantidades minúsculas. Puede haber alcanzado proporciones enormes cuando llega a un pozo de abastecimiento de agua, un túnel de metro, un manantial, un río, un lago o un pantano. Esto implica que ciertas toxinas pueden persistir en un acuífero durante cientos de años, incluso milenios, y que la contaminación en curso puede ser el resultado de una actividad humana olvidada hace mucho tiempo. Del mismo modo, la calidad de las aguas subterráneas puede verse afectada por acciones presentes dentro de décadas. La movilización de contaminantes y la salud humana también pueden verse afectadas por cambios hidrológicos, como una elevación del nivel freático como consecuencia de un aumento de la recarga, una disminución del bombeo o inundaciones (Reichard et al., 1990).

2.2.3. Calidad del agua subterránea

Las cualidades fisicoquímicas o microbiológicas variables, y los umbrales en los que se consideran aceptables o inaceptables, son la base para definir la calidad del agua. La medición de determinados compuestos químicos que pueden influir en la salud tras una exposición breve o prolongada es la base de la calidad fisicoquímica del agua (Rojas, 2002). La evaluación de la calidad del agua es un procedimiento polifacético que tiene en cuenta las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua, además de sus implicaciones para la salud humana y acuática (OPS, 2004), muchas cosas pueden alterar la calidad del agua destinada



a ser ingerida por los seres humanos, y esto siempre ha sido una prioridad absoluta. Las acciones humanas contribuyen en gran medida a la contaminación del agua (Terán, 2003).

La presencia de gases, minerales, materiales orgánicos en solución o suspensión y microbios patógenos puede determinarse mediante un examen de cualquier masa de agua. Los primeros se producen de forma natural, mientras que los segundos son el resultado de la producción y el consumo humanos, que generan muchos residuos que se vierten en los cursos de agua para su eliminación (Sáenz, 1999). Como consecuencia, las reservas de agua son cada vez más escasas debido a la contaminación por residuos humanos e industriales, la pérdida de árboles y la gestión ineficaz de la tierra (OPS, 2004). En consecuencia, la calidad y la disponibilidad del agua están sufriendo el impacto negativo de una amplia gama de actividades humanas (OMS, 2006).

Así pues, la calidad del agua es una variable crucial, ya que repercute en todos los ámbitos, desde la salud de los ecosistemas hasta la salud humana, pasando por el suministro de alimentos, la actividad económica o la biodiversidad (CEPE, 1995). Tras ser consumida, el agua suele volver al sistema hidrológico, lo que puede tener graves consecuencias para el medio ambiente si no se manipula. En general, las normas de calidad del agua se basan en niveles científicamente aceptables de toxicidad para el ser humano, pero en el caso del agua potable, estas normas se establecen para garantizar un suministro de agua limpia y saludable para el consumo humano y proteger así la salud humana. (Gramajo, 2004).

Hasta la década de 1970 se creía que las aguas subterráneas tenían cierta seguridad inherente contra la contaminación. Antes se pensaba que los suelos



subterráneos y las capas de arena, grava y rocas actuaban como filtros, impidiendo que los contaminantes entraran en las aguas subterráneas. Ahora se sabe que algunas toxinas pueden atravesar muchas capas de filtración y llegar a la zona de saturación, donde pueden contaminar las aguas subterráneas (Sáenz, 1999).

La urbanización de alta densidad, el saneamiento sin alcantarillado, la eliminación deficiente de los efluentes líquidos industriales y los cambios en las técnicas de cultivo agrícola son las principales actividades que afectan a la calidad de las aguas subterráneas (Foster & Hirata, 1987).

2.2.3.1. Parámetros físicos

- Conductividad

La contaminación de las aguas subterráneas, debida principalmente a una capa freática poco profunda y al fenómeno de la intrusión salina, es la causa principal del aumento de la conductividad eléctrica en los pozos artesianos; esta amenaza para la calidad del agua es el resultado de un drenaje sanitario y pluvial inadecuado en la ciudad, que llevó a la instalación generalizada de fosas sépticas en las zonas residenciales, de las que drenan o se infiltran la mayoría de las aguas residuales (Granel et al., 2002).

- Temperatura

Las temperaturas elevadas tienen el potencial de provocar un aumento del crecimiento de plantas acuáticas y hongos, lo que se considera indeseable. La temperatura es un indicador importante de la calidad del agua, ya que afecta al comportamiento de otros indicadores como el pH,



los niveles de oxígeno, la conductividad eléctrica y otros factores fisicoquímicos (Metcalf & Eddy, 1995).

- **Sólidos totales disueltos**

La erosión del suelo, los restos orgánicos y el plancton contribuyen a la formación de sólidos en suspensión. Las características aparentes del agua, como la turbidez y la claridad, el sabor, el color y el olor, pueden utilizarse para identificar las materias en suspensión, que consisten en partículas extremadamente diminutas que no pueden eliminarse por deposición (OMS, 2003).

- **Turbidez**

Las arcillas, los limos o los materiales orgánicos e inorgánicos finamente divididos, los compuestos orgánicos solubles coloreados, el plancton, los sedimentos erosionados y los microbios contribuyen a la turbidez del agua. “A menudo se relaciona una gran turbidez con grandes cantidades de microorganismos, incluidos virus, parásitos y ciertas bacterias; el tamaño de las propias partículas oscila entre 0.1 y 1.000 nm de diámetro (Metcalf & Eddy, 1995; Sawyer et al., 2000; APHA, 2005)

2.2.3.2. Parámetros químicos

- **pH o índice de hidrógeno**

Es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para la calidad de las aguas naturales como de las aguas residuales; todas las etapas del tratamiento del agua de abastecimiento y de las aguas residuales; a una temperatura dada, la intensidad del carácter ácido o básico de una



solución viene dada por la actividad de los iones hidrógeno o pH; el pH de los sistemas acuosos puede medirse cómodamente con pH-metros; el pH no tiene ningún efecto directo sobre los consumidores, es uno de los parámetros indicadores de la calidad del agua (Metcalf & Eddy, 1995; Sawyer et al., 2000; APHA, 2005)

- **Sulfatos**

Las aguas subterráneas se forman cuando el agua se desplaza a través de formaciones rocosas y suelos que contienen minerales sulfatados; parte del sulfato se disuelve en las aguas subterráneas. Los sulfatos se encuentran de forma natural en muchos minerales y se utilizan comercialmente, sobre todo en las industrias químicas; se vierten a través de residuos industriales y depósitos atmosféricos (Severiche & González, 2012).

El sulfato de sodio y el sulfato de calcio tienen umbrales de sabor de 250 mg/L y 100 mg/L, respectivamente, y son dos de los elementos disueltos en la lluvia más abundantes. El sulfato es uno de los aniones menos venenosos; sin embargo, se ha demostrado que tiene efectos laxantes cuando se mezcla con calcio y magnesio, los dos componentes más frecuentes de la dureza del agua, lo que provoca catarsis, deshidratación y molestias gastrointestinales en concentraciones elevadas (OMS, 2006).

- **Nitratos**

Los nitratos producidos en exceso son transportados por el agua hasta el suelo, donde se filtran, ya que el suelo no puede almacenarlos y



sus concentraciones son mayores en las aguas subterráneas subyacentes. Las concentraciones de nitratos en el agua pueden aumentar por el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados como el amoníaco, así como por la contaminación provocada por la acumulación de excrementos humanos y animales (Muñoz et al., 2004).

Por lo tanto, es imposible formular una relación dosis-respuesta con respecto a la presencia de nitratos en el agua o los alimentos, ya que los riesgos para la salud de la exposición a nitratos y nitritos dependen no sólo de la exposición, sino también de la existencia de condiciones favorables para la reducción de los nitratos a nitritos y de algunos factores inherentes al individuo. Puede producirse metahemoglobinemia infantil si un niño menor de 6 meses bebe agua que contenga altos niveles de nitratos y nitritos (Sawyer et al., 2000).

- **Cloruros**

Debido a los efectos corrosivos del cloruro, no sería apropiado beber ni utilizar el agua de ninguna otra forma. Los cloruros y sulfatos también pueden proceder de aguas subterráneas que se filtran en alcantarillas cercanas a agua salada (Sawyer et al., 2000).

Las heces humanas, por ejemplo, contienen unos 6 g de cloruros por persona y día; un contenido elevado de cloruros puede dañar las tuberías y las estructuras metálicas y perjudicar el crecimiento de las plantas; el umbral de sabor de los cloruros es de 200 mg/L a 300 mg/L; los cloruros no tienen efectos nocivos para la salud, pero en concentraciones superiores a 250 mg/L, este valor se basa en el sabor del agua; y los



cloruros pueden dañar las tuberías y las estructuras metálicas y perjudicar el crecimiento de las plantas (Metcalf & Eddy, 1995; APHA, 2005).

- **Dureza total**

La cantidad de calcio y magnesio disueltos en el agua está directamente relacionada con su dureza. Dado que tanto el magnesio como el calcio son iones de carga positiva, la disolución de iones de carga positiva adicionales se ve dificultada en el agua dura en comparación con el agua desprovista de ambos elementos (OMS, 2006).

La aceptación pública de la dureza del agua puede ser muy variable y depende de las condiciones locales; la dureza del agua refleja la naturaleza de las formaciones geológicas con las que el agua ha estado en contacto; el umbral de sabor es de 100-300 mg/L; en concentraciones superiores a 200 mg/L, puede provocar incrustaciones; el agua dura no supone ningún riesgo para la salud, pero puede crear problemas a los consumidores; las concentraciones superiores a 200 mg/L pueden afectar a la fontanería, los calentadores de agua y los lavavajillas (Sawyer et al., 2000; OMS, 2006).

2.2.4. Amenaza de recursos hídricos subterráneos

La probabilidad de que los recursos hídricos puedan resultar dañados por un fenómeno natural o antropogénico se denomina nivel de amenaza. Por consiguiente, podríamos equiparar amenaza con peligro. Los peligros pueden ser naturales o antropogénicos, dependiendo de su causa. Los corrimientos de tierras, los terremotos, las erupciones volcánicas, las inundaciones, la erosión, las lluvias torrenciales y la falta de precipitaciones son ejemplos de peligros naturales; las



explosiones, los incendios, los accidentes aéreos, los accidentes de tráfico y los conflictos sociales son ejemplos de peligros antropogénico (Foster, 1987).

Todas las cosas que pueden alterar de algún modo la calidad del agua se consideran amenazas para los recursos hídricos. La calidad del agua, la cantidad y los ecosistemas están en peligro como consecuencia de esta degradación, que supone un grave peligro para el futuro abastecimiento de agua. Los principales riesgos para los recursos hídricos son la escasez de agua y la contaminación, que influyen en los múltiples usos de este recurso, con especial atención a los problemas de la microcuenca del río Pansalic y su impacto directo en el abastecimiento humano (Foster, 1987).

2.2.4.1. Amenaza por escasez

Para los seres humanos, el suministro y el consumo son los aspectos más críticos de la escasez de agua. Factores como la disminución de las precipitaciones, el aumento de la evaporación, el deterioro de la permeabilidad del suelo y la contaminación influyen en la escasez del recurso. Para los grupos más desfavorecidos, el aumento de la demanda de agua frente a unos suministros finitos provocará inevitablemente tensiones y violencia. La escasez de agua, la pérdida de cubierta forestal, la contaminación, el calentamiento global y el agotamiento de las aguas subterráneas son sólo algunas de las consecuencias de las múltiples causas de la escasez (Foster, 1987).

2.2.4.2. Amenaza por contaminación

Cualquier acción que degrade un sistema, como la introducción de agentes extraños en un medio o la alteración de la composición inherente



de un sistema de forma desfavorable, se considera contaminación. Los ríos, los lagos y las aguas subterráneas son susceptibles de contaminación.

Las consecuencias de la contaminación van desde hacer poco atractivo el lugar hasta degradar la ecología, pasando por afectar a los sistemas socioeconómicos y naturales que sustenta, la producción de gérmenes transmisores de enfermedades, el mal olor, la incomodidad y el desagrado de los usuarios (Albert, 1999).

Hay varios sectores de la economía que dependen de las aguas subterráneas para sobrevivir. Los residuos domésticos, las fosas sépticas, los vertidos de aguas residuales industriales, la sobreexplotación de los acuíferos, las propiedades que contaminan el agua y la contaminación del suelo contribuyen en gran medida a la degradación de los acuíferos. La disponibilidad de agua potable limpia en muchas ciudades depende de las aguas subterráneas. El transporte de contaminantes y el movimiento de las aguas subterráneas son difíciles de controlar. Ambos procedimientos son notoriamente lentos. Los acuíferos contaminados son casi imposibles de limpiar debido a los elevados costes y a los retos tecnológicos (Foster, 1987).

Las actividades humanas generan grandes cantidades de basura, lo que provoca una contaminación de las aguas subterráneas que a veces puede remediarse, pero que a menudo es permanente. Además, al alterar e introducir nuevos procesos de recarga de acuíferos, afectan a la cantidad, distribución y calidad de las aguas subterráneas (Foster, 1987).



2.2.5. Vulnerabilidad de las aguas subterráneas

Considera la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea como aquellas características intrínsecas de los estratos que separan la zona saturada de la superficie del terreno, lo cual determina su sensibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante aplicada en la superficie (Foster, 1987)

El grado en que un paisaje (la zona de recarga del acuífero) está expuesto a la contaminación superficial, que a su vez contamina el acuífero, es un fuerte indicador de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas de ese paisaje. Dado que la penetración del contaminante se ve afectada por la absorción de la zona saturada, la profundidad de la capa freática (nivel del agua subterránea), el tipo de material contaminante, sus propiedades físico-químicas y la reacción química que puede provocar, la permeabilidad determina la susceptibilidad del acuífero (Hirata, 2001).

Otra definición de la vulnerabilidad de un acuífero hace hincapié en su susceptibilidad a la contaminación procedente de Notas externas. En esencia, es la inversa de la capacidad de asimilación de contaminantes de una masa que recibe agua de la superficie, con la protección añadida que proporciona la cubierta del sustrato de un acuífero (Hirata, 2001).

Esta línea de pensamiento sugiere que el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la sección superior de un acuífero debido a actividades en la superficie terrestre superpuesta es otra definición de susceptibilidad a la contaminación (Hirata, 2001).

La vulnerabilidad de un acuífero vendría determinada por sus propiedades únicas, que determinan la facilidad con que se ve perjudicado por una carga

contaminante concreta. Dado que la susceptibilidad del acuífero a la contaminación no es absoluta ni cuantificable, no existe una unidad de medida para ella (Foster & Hirata, 1991).

2.2.5.1. Tipos de vulnerabilidad

- Vulnerabilidad *intrínseca o natural* (*vulnerabilidad del acuífero*)

Es sólo una consecuencia de las circunstancias naturales del acuífero (características hidrogeológicas) y no tiene en cuenta las características o el comportamiento de los contaminantes individuales. En otras palabras, es una evaluación de la capacidad del sistema para responder de forma genérica, sin tener en cuenta ningún contexto particular. Por lo tanto, habrá determinados sistemas que sean naturalmente más resistentes a la contaminación que otros (Mena & Montes, 2010).

- Vulnerabilidad *específica* (*vulnerabilidad por la actividad*)

Puede utilizarse para describir un único contaminante o un conjunto de contaminantes que compartan características similares, y tendrá en cuenta tanto factores ambientales como la pluviosidad y la temperatura como factores relacionados con la carga contaminante, como la forma y el lugar en que el contaminante entró en el acuífero y el tiempo que permaneció allí (Mena & Montes, 2010).

Por lo tanto, la susceptibilidad de un acuífero a la contaminación depende de las siguientes variables:



- Hidráulicamente, la zona saturada es impenetrable para los contaminantes.
- Debido a su retención física y a su reactividad química con los contaminantes, los estratos situados por encima de la zona saturada del acuífero tienen una gran capacidad de atenuación.

2.2.5.2. Importancia de la zona no saturada en la atenuación de contaminantes.

Por ser la primera línea de defensa contra la contaminación de las aguas subterráneas, la zona no saturada tiene una importancia crítica. Esto se debe a que está situada entre la superficie y los acuíferos, lo que la convierte en un hábitat ideal para reducir o eliminar la contaminación (Foster & Hirata, 1991).

El movimiento del agua es generalmente lento y se limita a los poros más pequeños de la zona no saturada, lo que desempeña un papel importante en la atenuación de los contaminantes. El entorno químico de esta región también suele ser aeróbico y a menudo alcalino.

Debido a estas cualidades, procesos como la captura, sorción y eliminación de bacterias y virus; la atenuación de metales pesados y otros productos químicos inorgánicos mediante precipitación; y la sorción o biodegradación de hidrocarburos y compuestos orgánicos sintéticos son opciones viables (Foster & Hirata, 1991).

En consecuencia, es posible que los procesos de atenuación sean más largos con el aumento del espesor de la zona no saturada, ya que los



contaminantes tendrán más tiempo para desplazarse por la zona y entrar en contacto con el medio (Foster & Hirata, 1991).

Por lo tanto, si la zona no saturada es especialmente gruesa y rica en arcillas y materia orgánica, el acuífero será resistente a la contaminación.

Sin embargo, si la zona saturada es fina y contiene mucha arena, grava o rocas permeables, el acuífero se clasificará como muy vulnerable (Foster & Hirata, 1991).

A pesar de ello, es difícil prever la capacidad de atenuación de los contaminantes en la zona no saturada, ya que el flujo de agua en esta zona suele ser un proceso muy complicado. Sin embargo, en el caso de los contaminantes persistentes y móviles, la zona no saturada se limita a retrasar su llegada a la capa freática sin aportar una atenuación beneficiosa. El grado de atenuación dependerá de la duración del viaje o estancia del contaminante en esta zona (Foster & Hirata, 1991).

2.2.5.3. Resistencia o inaccesibilidad en sentido hidráulico.

La resistencia de la zona no saturada hidráulicamente a la contaminación depende de cuatro variables: (1) el régimen hidráulico y el grado de confinamiento del acuífero; (2) la profundidad del nivel de agua en acuíferos libres o el techo del acuífero confinado; (3) las características litológicas y el grado de consolidación de la zona no saturada o de las capas de confinamiento; y (4) las características litológicas y el grado de consolidación de la roca madre del acuífero (María, 1999).



2.2.5.4. Régimen hidráulico del acuífero.

El grado de contención del agua de un acuífero se denomina régimen hidráulico. Hay tres categorías distintas de acuíferos: libres, confinados y semiconfinados. Un acuífero confinado protegido por una gruesa capa de confinamiento, por ejemplo, es intrínsecamente más seguro contra la contaminación que uno no confinado (María, 1999).

Excepto en el caso de niveles colgados muy pequeños, en los acuíferos multicapa debe darse prioridad a la capa permeable más superficial. El acuífero también se considera libre si existe alguna incertidumbre sobre la continuidad y/o el carácter de los niveles de confinamiento (María, 1999).

2.2.5.5. Profundidad del agua subterránea.

El nivel freático en los acuíferos no confinados y el techo del acuífero en otros lugares definen la profundidad de las aguas subterráneas. Los niveles freáticos más profundos en los acuíferos tienen menos probabilidades de estar contaminados. Existe una mayor probabilidad de atenuación de una carga contaminante dada a través de la degradación o la retención natural si la zona no saturada es más gruesa y el tiempo de transporte de un contaminante a las aguas subterráneas se alarga (Foster & Hirata, 1991).

2.2.5.6. Características litológicas.

El tiempo que tarda un contaminante en pasar de la zona no saturada a la saturada depende de su espesor y de las propiedades de los



materiales que componen la zona no saturada. Considerando indirectamente la porosidad efectiva, la permeabilidad de la matriz y el contenido de humedad o retención específica en la zona no saturada, así como el grado de consolidación y la probable presencia o ausencia de permeabilidad secundaria debida a fisuras, estas características de la zona no saturada y de las capas de confinamiento se refieren a: (1) el tipo de litología (Foster & Hirata, 1991).

La capacidad de atenuación de la zona no saturada o de las capas de confinamiento se reduce a medida que aumenta el tamaño del grano en los medios granulares porque la permeabilidad es proporcional al tamaño del grano. Sin embargo, la permeabilidad se reduce en los medios de grano fino (suelos con alto contenido de arcilla y limo), lo que significa que los contaminantes tienen una ruta más tortuosa hacia el acuífero. Por otra parte, la vulnerabilidad en un medio fragmentado es proporcional a la profundidad y frecuencia de las grietas (Foster & Hirata, 1991).

2.2.5.7. Métodos para la determinación de la vulnerabilidad

- Método GOD

Foster ideó la técnica GOD, que busca la claridad en sus cálculos.

La distancia al agua, la presencia de aguas subterráneas y el sustrato litológico son datos necesarios para su uso. Con esta técnica, la vulnerabilidad se determina multiplicando las siguientes variables:

$$IV = G O D \quad (\text{Ec. 2})$$



Donde:

IV: es el índice de vulnerabilidad

G: (Groundwater occurrence) es el índice por condición de confinamiento del acuífero,

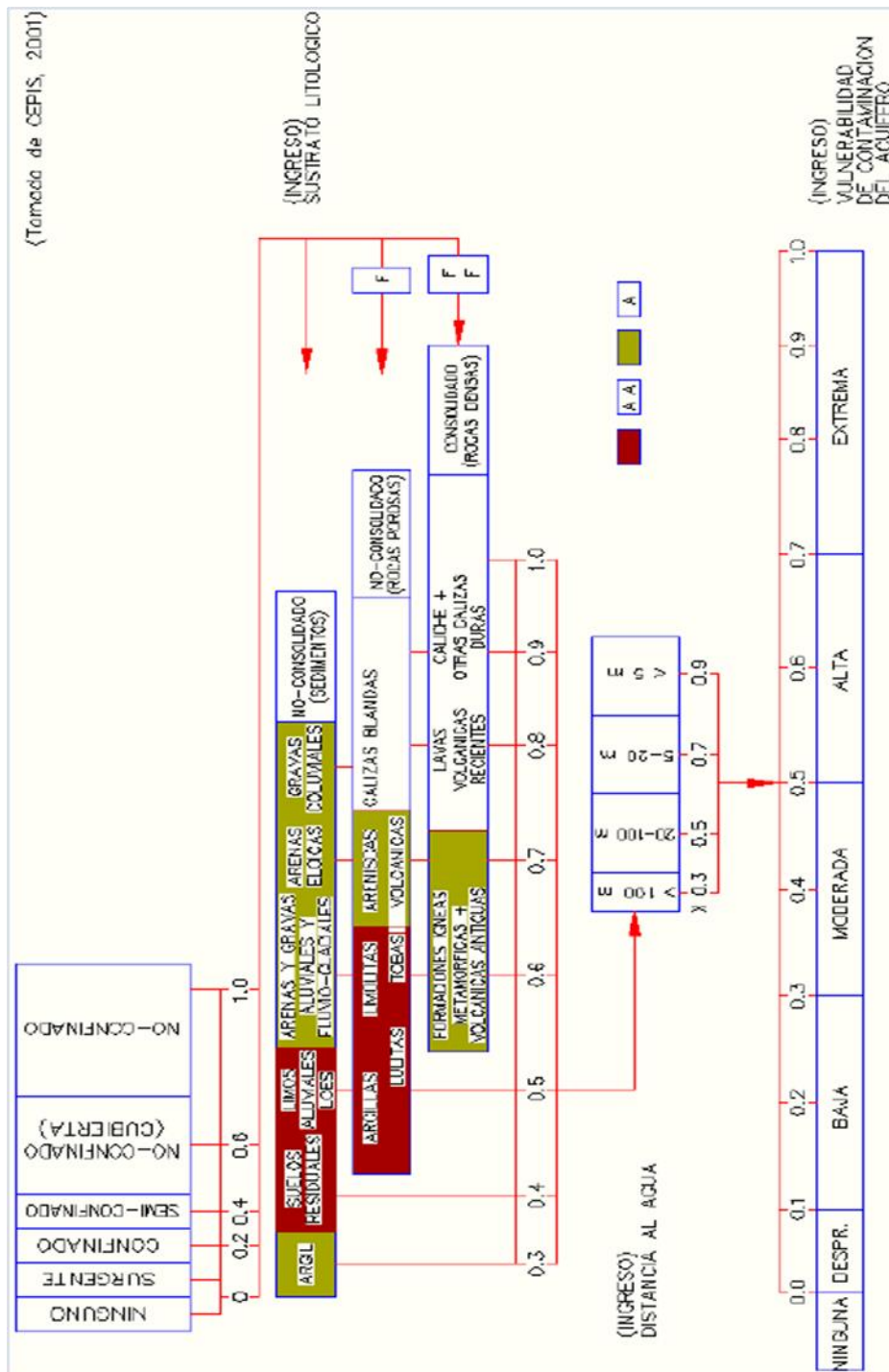
O: (Overall aquifer class) es el índice del substrato litológico en términos de grado de consolidación

D: (Depth) es índice por profundidad del nivel del agua o techo del acuífero confinado.

Cuanto más adversa sea la circunstancia, mayor será el valor del factor, que oscila entre 0 y 1. Cuando el valor es inferior a 0.1, el nivel de vulnerabilidad se considera extremadamente bajo; cuando está entre 0.1 y 0.3, es bajo; cuando está entre 0.3 y 0.5, es moderado; cuando está entre 0.5 y 0.7, es alto; y cuando es superior a 0.7, es grave (véase la Figura 13). Foster (1987).

Figura 14.

Diagrama para calificar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación



Nota: Foster (1987).

- Método DRASTIC

Este método fue desarrollado por Aller (1987) respaldados por la EPA (Environmental Protection Agency), la agencia federal encargada de preservar los recursos naturales de Estados Unidos. Chile (Espinosa, 2002); México (Belmonte, 2002); Nicaragua (Hernández, 2004); México (Rangel, 2001); Uruguay (Bessouat, 2001); etc. son sólo algunos de los países donde se ha puesto en práctica.

En este enfoque se utilizan siete características hidrogeológicas para categorizar la susceptibilidad o el potencial de contaminación de un acuífero, y los resultados se presentan en consecuencia. La posibilidad de contaminación del acuífero se evalúa utilizando estos factores, que se ponderan en función de su importancia relativa (ponderación W; véase la tabla 1).

Tabla 1

Parámetros DRASTIC y sus pesos relativos (W)

PARAMETRO	W
D (Depth) Profundidad	5
R (Recharge) Recarga	4
A (Aquifer) Acuífero	3
S (Soil) Suelo	2
T (Topography) Topografía I	1
(Impact) zona no saturada	5
C(Conductivity) Conductividad	3

Nota: HIDRORED (2001).

El índice del modelo DRASTIC, se calcula mediante la Ec.

$$ID = \sum_{j=1} W_j r_j$$



Donde:

ID = Índice DRASTIC

W = Pesos DRASTIC según la tabla 2, r = puntaje, dependiendo de rangos y valores de cada parámetro según la tabla 3 y el subíndice j indica los parámetros

DRASTIC. El resultado se compara con la vulnerabilidad DRASTIC representados en la tabla 2.

Tabla 2

Rangos de parámetros y puntajes DRASTIC.

Profundidad (m)	Puntaje r
0-1.5	9
1.5-5	7
5-10	5
10-15	3
15-20	2
20-30	1
>30	
Recarga (mm)	Puntaje r
0-50	1
50-103	3
103-178	6
178-254	8
>254	9
Tipo de acuífero	Puntaje r
Arcilla, Limo	2
Roca metamórfica, ígnea	3
Roca metamórfica, ígnea	4
Arenisca, caliza y arcillas	6
Roca Arenisca	6
Roca Caliza	6
Arena, grava	8
Roca, volcánica	9
Roca Caliza	10
Tipo de suelo	Puntaje r
Estrecho o ausente	10
Grava	10
Arena	10
Agregado arcilloso	7



Arenisca margosa	6
Detríticas (calcio y arcilla)	5
Limo margoso, arcilla	4
Arcilla margosa	3
Estiércol	2
Arcilla compactada	1
Pendiente (%)	Puntaje r
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1
Impacto Zona Vadosa	Puntaje r
Arcilla, limo	2
Roca metamórfica/ígneas	3
Roca metamórfica/ígneas	4
Arenisca caliza	6
Arenisca masiva	6
Caliza masiva	6
Arena grava	8
Roca volcánica	9
Caliza kárstica	10
Conductividad	Puntaje r
0-4 m/d	1
4-12	2
12-28	4
27-41	6
41-82	8
>82	10

Nota: Adaptado de HIDRORED (2001)

Tabla 3

Grados de vulnerabilidad según DRASTIC

VULNERABILIDAD	INDICE
Muy baja	<100
Baja	101 – 119
Media	120 – 139
Media alta	140 – 179
Alta	180 – 199
Muy alta	>200

NOTA: Adaptado de HIDRORED (2001).



- **Método SINTACS**

Se trata de una versión modificada de DRASTIC hecha específicamente para las variadas características hidrogeológicas de Italia, que exigían una cartografía más precisa. SINTACS es un acrónimo.

S (soggiacenza - profundidad del agua)

I (infiltrazione - infiltración)

N (non saturo - zona no saturada)

T (tipología de la cobertura - tipo de suelo)

A (acuífero - características hidrogeológicas del acuífero)

C (conducibilità - conductividad hidráulica)

S (superficie topográfica - pendiente topográfica)

Dado que las estructuras de entrada y salida de este enfoque son complicadas, su ejecución requiere un programa informático específico. Las aguas superficiales y el uso del suelo son otros dos factores que pueden afectar a la vulnerabilidad inherente (Civita et al., 1990).

- **Método EPIK**

Dado que las estructuras de entrada y salida de este enfoque son complicadas, su ejecución requiere un programa informático específico. Las aguas superficiales y el uso del suelo son otros dos factores que pueden afectar a la vulnerabilidad inherente (Doerfliger & Zwahlen, 1997).

El acrónimo EPIK significa:



E: (Epikarst) zona de intensa karstificación y elevada permeabilidad, cercana a la superficie.

P: (Protective cover) Cobertura protectora formado por el suelo y otros materiales, como depósitos glaciales, limos aluviales, derrumbes, etc.

I: (Infiltration conditions) Condiciones de infiltración.

K: (Karst network development) red kárstica.

- **Método EK_v**

Define la vulnerabilidad como el grado en que un acuífero está protegido de la contaminación por su entorno natural. Por tanto, también se conoce como una especie de defensa natural.

Esta técnica establece conexiones entre acuíferos no confinados en función de la profundidad del nivel freático.

(E) y la permeabilidad vertical de la zona parcialmente saturada (K_v). Para el cálculo se necesitan mediciones de la permeabilidad tomadas a cierta profundidad (Auge,1995).

2.2.6. Riesgo de los recursos hídricos subterráneos

El término riesgo se refiere a la posibilidad de que se produzcan resultados negativos en forma de daños económicos, sociales o medioambientales en un lugar determinado. Una definición de riesgo es la posibilidad de que se produzca un daño, que engloba incertidumbre y peligro (PNUD & GMP, 2004).

Dado que el riesgo es el resultado de la actividad humana en respuesta a las condiciones ambientales, es intrínsecamente social, está en constante



evolución y es dinámico. Está en el futuro y puede ocurrir o no. Su capacidad de daño e impacto evoluciona a lo largo del tiempo. Es susceptible de riesgo y depende de un peligro o amenaza concretos (PNUD & GMP, 2004).

Cuando algo va mal, suele deberse a uno o varios factores de riesgo. La sequía y la contaminación son dos ejemplos de riesgos que pueden suponer una amenaza para la salud y la seguridad humanas si se produjeran en determinados lugares y en determinados momentos. El grado de vulnerabilidad de una persona a los efectos de un riesgo depende de la naturaleza de esa vulnerabilidad, lo que la convierte en un aspecto intrínseco del riesgo. Los riesgos (R) asociados a un suceso se calculan correlacionando los peligros potenciales (A) con las susceptibilidades (V) de los componentes expuestos (Foster & Hirata, 1988)

Un riesgo para los recursos hídricos (véase la Ec.) es el resultado final de los factores de riesgo examinados, que son los peligros y las vulnerabilidades, junto con el apoyo de un diagnóstico del lugar investigado (Foster & Hirata, 1988)

$$R=AV \text{ (Ec. 4)}$$

Las amenazas y vulnerabilidades, como la escasez del recurso y el grado de contaminación de los recursos hídricos, suponen un peligro para el recurso hídrico, aumentando la probabilidad de que se deteriore o se pierda por completo. Elementos internos como la profundidad, el tipo de suelo, la recarga, la situación socioeconómica de la población, etc., entran en juego en el caso de una microcuenca cuyo recurso principal son las aguas subterráneas (Foster & Hirata, 1988).

2.2.6.1. Métodos para determinar el Riesgo

- Método ERIS

El método ERIS (Environmental Risk Inventory System) que vigila los peligros potenciales para el planeta. Vigila una determinada región porque cree que el contaminante supone una amenaza allí (Wilson, 1991).

Varios factores (precipitaciones, pendiente del terreno, aguas superficiales, estado del suelo, profundidad de los pozos, precipitaciones netas y conductividad hidráulica; véase el cuadro 5) interactúan con la carga contaminante (distancia de los pozos a la Nota contaminante; cantidad y tipo de sustancia peligrosa; biodegradabilidad; probabilidad de uso; toxicidad); así es como realiza su análisis el método ERIS (Wilson, 1991).

Tabla 4

Parámetros determinados para aplicar el Método ERIS

Parámetros geohidrológicos	Carga contaminante
Precipitación	Nota contaminante
Pendiente del terreno	Cantidad y tipo de sustancia peligrosa
Aguas superficiales	Biodegradabilidad
Estado del suelo	Probabilidad de uso
Profundidad de pozos	Toxicidad
Precipitación neta	
Conductividad hidráulica	

Nota: Navarro (2004).

Esta estrategia permite medir y evaluar los impactos humanos y no humanos. La técnica ERIS se distingue por centrarse en la identificación de una Nota de contaminación y la posterior evaluación de la vulnerabilidad del sistema en relación con dicha Nota (Wilson, 1991).

- Método de Foster

Este método es propuesto por Foster, es la interacción entre la amenaza y la vulnerabilidad del acuífero para la determinación del riesgo (Foster,1987).

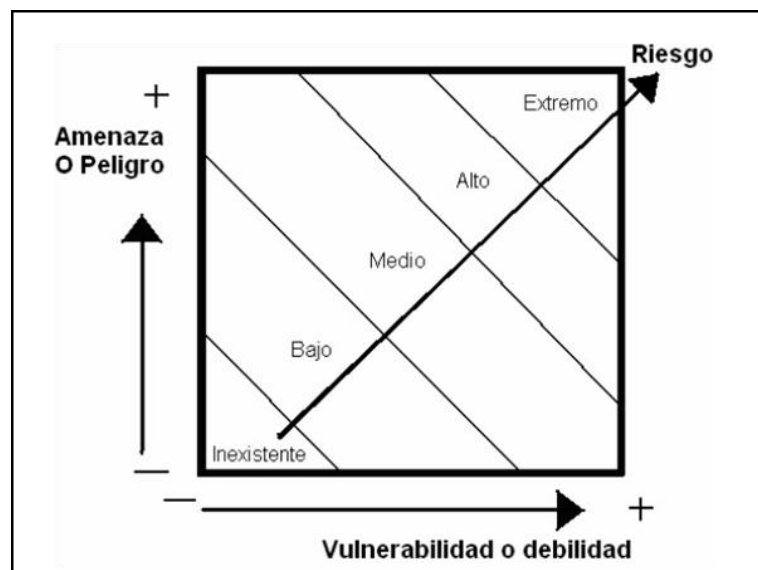
Para la determinación del nivel de riesgo de contaminación se combinan factores externos e internos las cuales son:

Factor interno. - Nivel de la Vulnerabilidad (V)

Factor externo. - Nivel de la Amenaza (A)

Figura 15

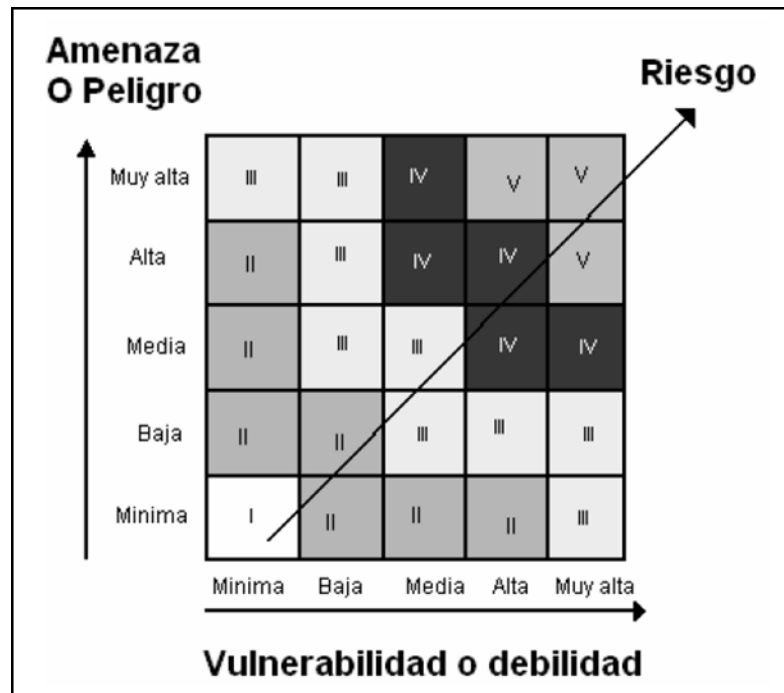
Diagrama de nivel de riesgo



Nota: Foster (1987).

Figura 16

Clasificación del cuadro de riesgo



Nota: Foster (1987).



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO:

3.1.1. Ubicación política:

La microcuenca Jayllihuaya tiene la siguiente ubicación política: Región: Puno, Provincia: Puno, Distrito: Puno y Centro Poblado: Jayllihuaya.

3.1.2. Ubicación geográfica:

La microcuenca Jayllihuaya tiene la siguiente ubicación geográfica: Coordenadas geográficas: Latitud Sur: 15° 53' 21.5" S (-15.88929292000), Longitud Oeste: 69° 57' 47.6" W (-69.96321676000), y altitud entre: 3806 – 5100 m.s.n.m.

3.1.3. Ubicación hidrográfica:

Hidrográficamente la microcuenca se encuentra ubicada en: Región hidrográfica: Titicaca

Figura 17

Mapa de ubicación del Perú



Figura 18

Mapa de ubicación de Puno

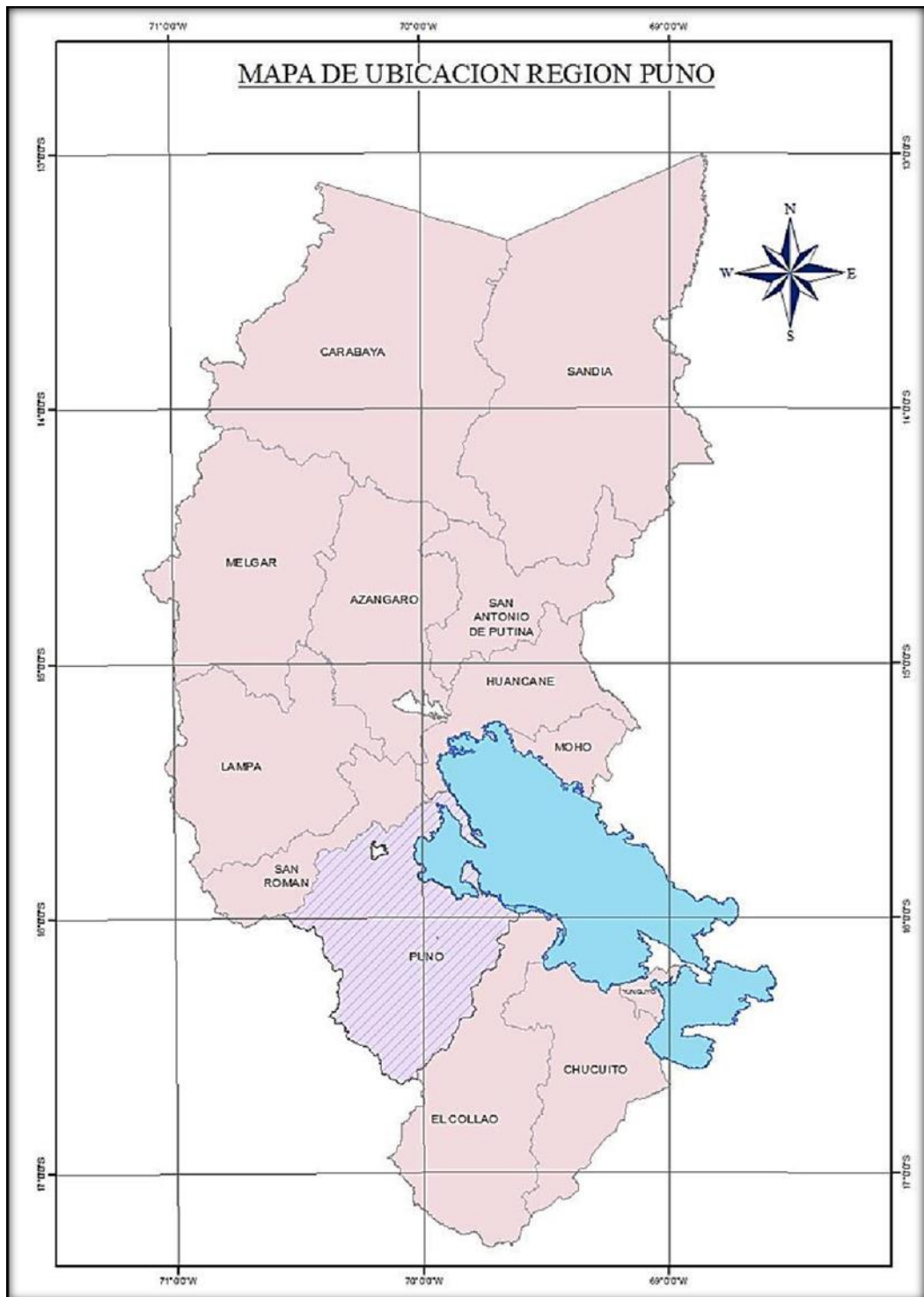
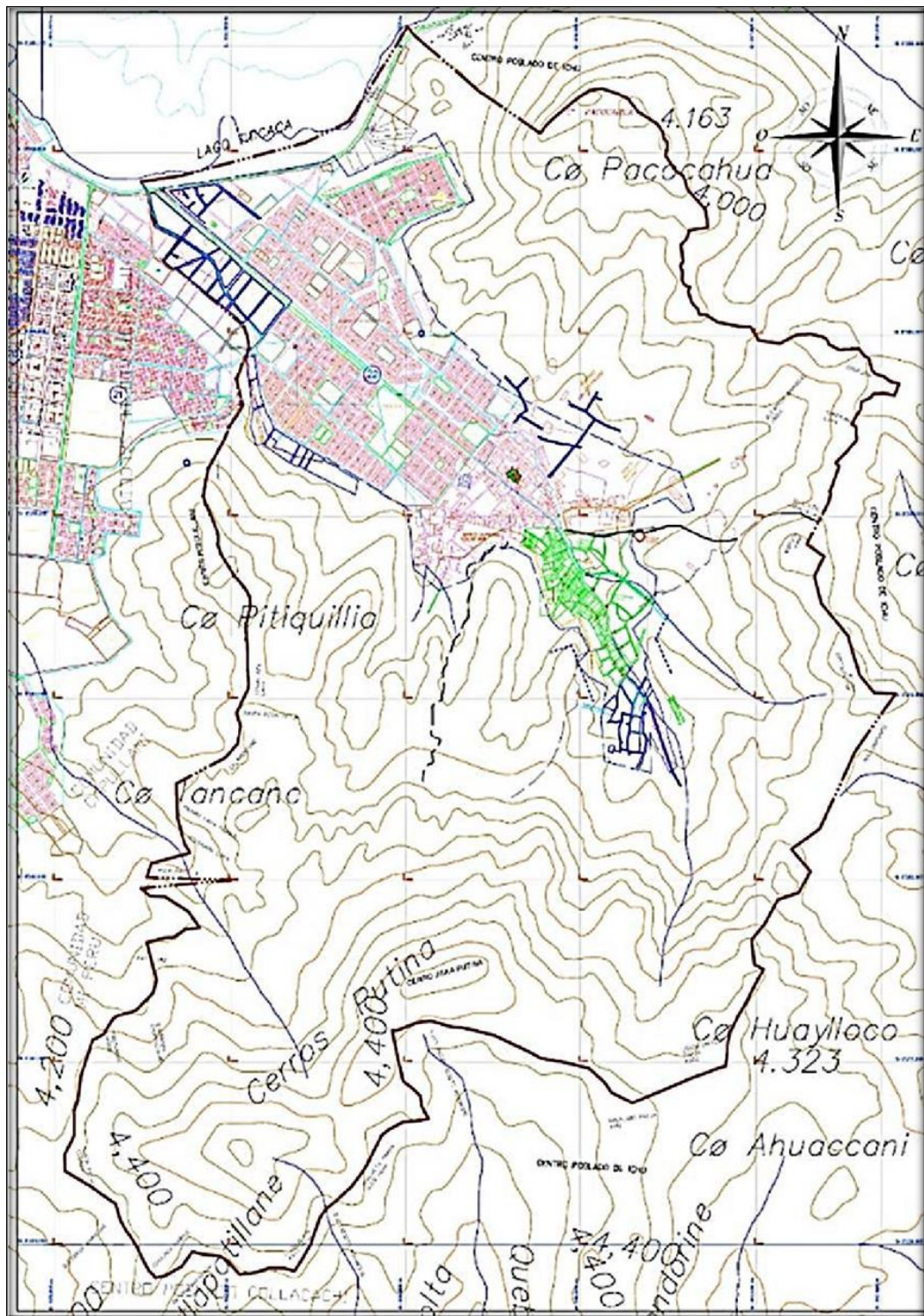


Figura 19

Mapa de ubicación de la microcuenca Jayllihuaya





3.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA MICROCUENCA JAYLLIHUAYA:

La microcuenca Jayllihuaya se encuentra en el distrito de Puno de la provincia de Puno en el departamento de Puno. La microcuenca comienza en un valle lateral entre los cerros Pitiquillani y Jichuntata, continúa hacia el sur a través de los cerros Jichuntata hasta Arichuhuani, luego gira hacia el norte hacia los cerros Apacheta y Chimú, y finalmente desagua en la bahía del lago Titicaca. En el centro poblado viven unas 5271 personas, que ocupan una superficie de unas 1581.41 hectáreas a una altitud de entre 3810 y 4496 metros sobre el nivel del mar. La gran mayoría de estas personas tienen acceso al servicio de agua a través de conexiones domiciliarias, pero algunas personas todavía tienen que beber agua de pozos y manantiales, que se pueden ver en las laderas de las colinas. Jayllihuaya es una región montañosa que alberga a la mayoría de los habitantes de la ciudad. Las temperaturas oscilan entre los 20 grados de máxima y los -1.9 grados de mínima, con una media de 9 grados. El clima es frío y semiseco, con una media anual de 700 milímetros de precipitaciones.

3.3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para realizar cualquier tipo de investigación en la materia, es útil tener un conocimiento básico de sus características, que se describen brevemente a continuación. La evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas puede verse afectada directa o indirectamente por estos factores, dependiendo del estudio que se realice.

3.3.1. Precipitación

Entre septiembre y abril cae una media de 700 milímetros de lluvia al año. Aproximadamente tres cuartas partes de este total caen entre diciembre y marzo.



3.3.2. Temperatura

Según los datos recogidos por la estación meteorológica del INIA (Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias-Salcedo), las temperaturas medias anuales en la región investigada oscilan entre los 14 y los 20 grados. Y las mínimas diarias oscilan entre -1.9 y 7 grados. La aparición de heladas puede explicarse por la cantidad de luz solar disponible.

3.3.3. Humedad relativa

Las precipitaciones y la evapotranspiración del lago Titicaca son los principales factores que contribuyen a la humedad ambiental en la región estudiada. Con una humedad relativa media anual del 56.38%, el clima es seco. Durante la estación húmeda, la humedad relativa puede alcanzar el 70.70%.

3.3.4. Evapotranspiración potencial.

La evapotranspiración promedio mensual en el centro poblado de Jayllihuaya es de 112.9 mm.

3.3.5. Relieve

Alrededor del 60% de la región investigada está formada por un sistema fisiográfico accidentado con altas montañas, y la mayor parte del relieve es pedregoso y de fuerte pendiente, con muy poca vegetación.

Además, la región presenta regiones bajas y llanas con una pendiente mínima y ondulaciones ocasionales, y afloramientos de rocas sedimentarias como la arenisca, que son las más frecuentes en la zona.



3.3.6. Geología

Cada una de las unidades geológicas de la región de estudio se describe en profundidad, incluyendo sus características litológicas, estructurales y morfológicas más notables, como las formaciones de capas rojas de areniscas arcósicas, feldespáticas, tobáceas y conglomerados superpuestos por rocas volcánicas. En la microcuenca situada sobre el centro de la ciudad es donde se encuentran estos afloramientos. Guijarros, gravas y arenas, a menudo en una matriz de arena limosa, componen los depósitos y piedemontes cuaternarios. He aquí la estratigrafía que representan.

3.3.7. Estratigrafía

Parte de la cuenca del Titicaca, que se extiende del noroeste al sureste, la región investigada se compone de rocas paleozoicas impermeables del basamento y rocas mesozoicas permeables.

Según Newell (1949). Las rocas sedimentarias y volcánicas de la cuenca de edad paleógena contribuyen a una columna estratigráfica de hasta 25.000 m de espesor; las rocas más antiguas de la cuenca son el resultado de numerosos episodios orogénicos. Se cree que el mayor espesor es de 20.000 m, aunque es imposible identificar una sección completa en la región debido a la erosión de los afloramientos.

3.3.8. Topografía

La zona de estudio, que abarca una impresionante extensión de 82.730 ha y presenta una suave pendiente desde los 3821.00 m.s.n.m. hasta las estribaciones



de las colinas vecinas a 3854.00 m.s.n.m., está situada en una topografía relativamente llana.

3.3.9. Hidrología

El núcleo urbano de Jayllihuaya se asienta dentro de la microcuenca que lleva el nombre de la propia ciudad. En épocas de crecida, descarga un caudal de escorrentía superficial de entre 6.65 y 9.46 m³/s en un área receptora de 324.20 ha, según establece la investigación "Hidrología del Drenaje Superficial de las Microcuencas Aledañas a la Ciudad de Puno" de Salas P.M. (1992). Durante las inundaciones, una gran cantidad de agua se precipita en la bahía del lago Titicaca a través de un colector natural indefinido.

3.3.10. Hidrología superficial

El agua que fluye o se almacena en la superficie terrestre se considera agua superficial, y está en constante interacción con el vapor de agua y otras aguas superficiales.

3.3.11. Drenaje

Dado que la mitad inferior de la cuenca de Jayllihuaya carece de un canal de drenaje bien definido, el sistema de drenaje es poco fiable. Así, en épocas de lluvia, cuando hay aguas turbias con elementos que son consecuencia de la erosión, sólo se utiliza realmente el 6.43% de la zona C (la zona inundable), aunque el 93.5% es inundable.

En la zona de estudio, el nivel freático sube durante los meses de precipitaciones importantes (enero, febrero, marzo y una parte de abril) debido a la escasa pendiente del terreno.



3.3.12. Energía solar

En Jayllihuaya, la gente utiliza sus electrodomésticos una media de 8.2 horas diarias. Investigaciones anteriores indican que el mes de julio tiene la mayor media del año, con 9.6 horas diarias de sol. Los meses más soleados se dan en la estación invernal, que es una época relativamente seca, y en los meses de transición. Destaca la estación húmeda del verano como la menos soleada, siendo enero el mes con menor insolación (una media de 6.2 horas al día).

3.3.13. Flora y fauna

a) Flora

El ambiente de Jayllihuaya es propicio para el crecimiento de una gran variedad de plantas, incluyendo árboles (ichu, eucalipto, chilligua, quenua, tola), arbustos (cactus, cantuta, etc.), hierbas y tubérculos.

b) Fauna

En la zona de investigación se detectaron zorros, vizcachas, reptiles, etc., y algunas aves silvestres como águilas, perdices y otras especies características de la región, todas las cuales prosperan en el clima altoandino.

3.3.14. Agricultura y ganadería

Los agricultores de la zona alta, media y baja de Jayllihuaya cultivan pequeñas parcelas de alubias, patatas, quinua, oca y cebada para su sustento debido a la falta de tierras disponibles para la agricultura comercial. Por otro lado, una considerable población depende de los ingresos procedentes de huertos e



invernaderos de hortalizas y flores, ubicados principalmente en la zona media, transportando su cosecha a los mercados locales.

Aunque la ganadería (ovina y bovina) es una de las pocas actividades económicas de Jayllihuaya, sólo un pequeño porcentaje de la población se dedica a ella.

3.3.15. Población económicamente activa

La población económicamente comprometida de Jayllihuaya trabaja en industrias extractivas, industrias transformadoras e industrias de servicios. Trabajan en campos tan diversos como la agricultura, la mano de obra cualificada, la industria manufacturera, la minería, la construcción civil, el comercio minorista, la venta ambulante y los servicios no cualificados, y sólo unos pocos ocupan puestos estables a largo plazo en organizaciones gubernamentales o del sector privado.

3.3.16. Actividad productiva

La mayoría de los habitantes de Jayllihuaya se dedican a la agricultura, cultivando hortalizas y flores en huertos e invernaderos sectorizados; otros cultivan cereales como quinua, patatas, alubias, oca y trigo para consumo personal; y otros crían aves de corral y cerdos y otro ganado menor en los escasos pastos del pueblo.

- Zona alta

En estas pequeñas parcelas pueden cultivarse patatas, quinua, trigo, judías, oca y otros productos. El resto de la región es árida y pedregosa, con escasos



pastizales para el pastoreo de animales y sin arroyos ni manantiales durante la estación seca.

- **Zona media**

El uso del suelo en el centro poblado es principalmente agrícola, con algunas zonas boscosas y el cultivo de flores y alimentos primarios. Aunque esta región tiene acceso a agua potable entubada, se ha observado que la mayor parte del crecimiento demográfico reciente ha ocurrido aquí. Esta región también cuenta con manantiales naturales de agua que se utilizan para el consumo humano, la agricultura y la preparación de alimentos. Los cultivos de hortalizas se riegan en esta región utilizando los pozos existentes en la zona.

- **Zona baja**

Se cultivan cantidades mínimas de alimentos y piensos en las minúsculas parcelas situadas bajo el centro de la aldea de Jayllihuaya. Esta región es propensa a las inundaciones durante la estación húmeda debido a la presencia de humedales naturales, pero también cuenta con una tienda de cuero y grifos.

3.3.17. Tenencia de tierras

El Decreto 185-78-AA designó una parte de Jayllihuaya como Reserva Nacional del Titicaca. Desde mayo de 2008, forma parte del Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SERNANP) del Ministerio del Ambiente, que a su vez forma parte del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SINANPE). Con el fin de fortalecer las bases del desarrollo sostenible de la nación, se encarga de supervisar la protección y el uso sostenible de los recursos naturales. Aquí, los pequeños productores (a menudo familiares directos) son los



dueños de la propiedad. El 85% de los productores del núcleo de población de Jayllihuaya tienen título legal de la tierra que cultivan. Sólo el 12% de los propietarios ha completado el procedimiento de legalización de su propiedad. El 3% está en manos de agricultores con explotaciones modestas (región de la ribera del lago).

3.3.18. Población

Jayllihuaya tiene una población de unas 5271 personas, según el censo realizado recientemente por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Sin embargo, Jayllihuaya tiene un coeficiente de crecimiento poblacional de apenas 1.5% aproximadamente (INEI, 2007). Esta expansión es lineal y se da principalmente en el núcleo urbano de Jayllihuaya. Dado que Jayllihuaya es una región obvia, sobre todo debido a la disponibilidad de propiedades allí, la población de la ciudad ha estado aumentando constantemente allí en los últimos años, contribuyendo al crecimiento demográfico general de Puno.

3.4. MATERIALES

3.4.1. Información cartográfica

La presente investigación de tesis hace uso de mapas nacionales que incluyen la ciudad de Jayllihuaya, “son las siguientes hojas de la carta nacional: 30v, 30x, 30y, 31v, 31x, 31y, a escala 1: 100.000; elaborados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), las cuales fueron digitalizadas bajo el entorno de SIG”.



3.4.2. Equipos y programas de cómputo

En este estudio se utilizaron los siguientes instrumentos y materiales para recopilar datos e información sobre el terreno:

3.4.2.1. Materiales y equipos de campo

Cuaderno de anote, Cartas nacionales, Cámara fotográfica digital, GPS Garmin, Bincha de 50 m, Marcadores.

3.4.2.2. Materiales y equipos de gabinete

Computadora coreI3, RAM 4 GB, velocidad 3.2 GHz, 500 GB memoria. 447, Impresora multifuncional Epson L380 sistema continuo, Fotografías digitalizadas, Scanner, Papel bond A4, Memoria USB 16 GB, Bibliografía necesaria, Materiales de escritorio (lapiceros, borrador, marcadores, entre otros), Registro de datos de campo, Softwares utilizados: Microsoft Office Word 2016, Microsoft Office Excel 2016, Microsoft PowerPoint 2016, AutoCAD 2016, Arcgis 10.3 y Google Heart

3.5. METODOLOGIA

3.5.1. Tipo de investigación

Este estudio se clasifica como investigación descriptiva, observacional-prospectiva porque implica la observación de primera mano y la recolección de datos de la microcuenca Jayllihuaya, seguida de un análisis para establecer el nivel de riesgo de contaminación.

3.5.2. Variables

Variable dependiente

Nivel de riesgo de contaminación del agua subterránea, se presenta en la tabla 5.

Tabla 5

Cuadro de Variables

Variable	Dimensión	Indicador	
Riesgo de contaminación del agua subterránea	Vulnerabilidad	Tipo de acuífero (G) Litología de la zona (O) Profundidad de nivel freático (D)	Hidrogeología Características litológicas Geología de la zona Profundidad del pozo
	Amenaza	Amenaza de contaminación Calidad de agua	Nota contaminante Análisis de agua

NOTA: Elaboración propia del investigador

3.5.3. Población y muestra

3.5.3.1. Población

Para el presente estudio se consideró como población de estudio al agua subterránea existente en la microcuenca de Jayllihuaya.

3.5.3.2. Muestra

El conjunto de datos recogidos en el lugar de la investigación sirvió de muestra representativa para esta investigación. Se trata de una muestra representativa tomada al azar. Se recopiló información como el tipo de acuífero, la profundidad del nivel freático, la litología de la zona no saturada, la calidad del agua y la calidad del agua.



3.5.4. Metodología seguida

Se identificaron entidades públicas y comerciales que han realizado investigaciones y proyectos de aguas subterráneas, se realizó un análisis bibliográfico y recopilación de antecedentes a nivel mundial, nacional y regional para lograr los objetivos especificados. También se identificaron 24 pozos y se recopiló información técnica de los pozos para contar con los datos necesarios, así como instituciones públicas y privadas que han realizado estudios y proyectos de aguas subterráneas para recopilar información, datos de investigaciones realizadas en la microcuenca Jayllihuaya, textos e interpretaciones sobre hidrogeología, vulnerabilidad, amenaza y riesgo de la zona en estudio.

3.5.4.1. Determinación del nivel de vulnerabilidad a la contaminación

Según la técnica GOD descrita, se establecieron los criterios necesarios para determinar la susceptibilidad de las aguas subterráneas a la contaminación (Foster & Hirata, 1987).

A continuación, se exponen los datos básicos recopilados para lograr este objetivo y obtener los parámetros necesarios:

- Identificación de pozos
- Cartografía básica de la zona
- Descripción litológica de la zona
- Mapas hidrogeológicos

a. Control del nivel freático mensual:

La mayoría de los pozos de la región investigada están situados dentro de las viviendas, lo que dificulta su acceso; por eso se seleccionaron



puntos estratégicos, es decir, se colocaron puntos de pozo en zonas de fácil acceso.

A lo largo de tres meses, durante la estación de lluvias, se hizo un seguimiento mensual de los niveles de agua subterránea en 24 pozos prototipo para ver cuánto subía y bajaba el agua subterránea en cada pozo.

Las ubicaciones y elevaciones de los pozos se registraron en un cuaderno de control del nivel freático utilizando un GPS Garmin, una cinta para la cabeza de 8 metros de longitud y la antena incorporada del GPS.

La profundidad del nivel freático se determina mediante la técnica de la cinta graduada, que consiste en bajar una cinta de acero calibrada en milímetros a un pozo mientras se mantiene recto el otro extremo de la cinta con un peso.

b. Caracterización litológica del acuífero:

Los análisis de varias publicaciones consultadas anteriormente con referencia a la microcuenca de Jayllihuaya aportan los datos necesarios para el cálculo de este parámetro (litología):

- En 1999 se realizó la zonificación geotécnica de los suelos y afloramientos de la microcuenca de Puno. Esta investigación clasifica los suelos de toda la microcuenca Jayllihuaya, ubicada en la microcuenca Puno. Mediante el análisis del perfil geológico y la geología superficial, se pudo conocer los tipos de rocas subyacentes y su composición litológica o estratigráfica.

Recorrer toda la zona de investigación con la intención de reconocer visualmente las particularidades geológicas y litológicas de la región fue esencial para dar credibilidad a la información obtenida sobre las características litológicas. Se documentó la posición del área de investigación mediante fotografías y un dibujo aproximado, indicando las características litológicas de cada sector de la subcuenca.

c. Caracterización del tipo de acuífero

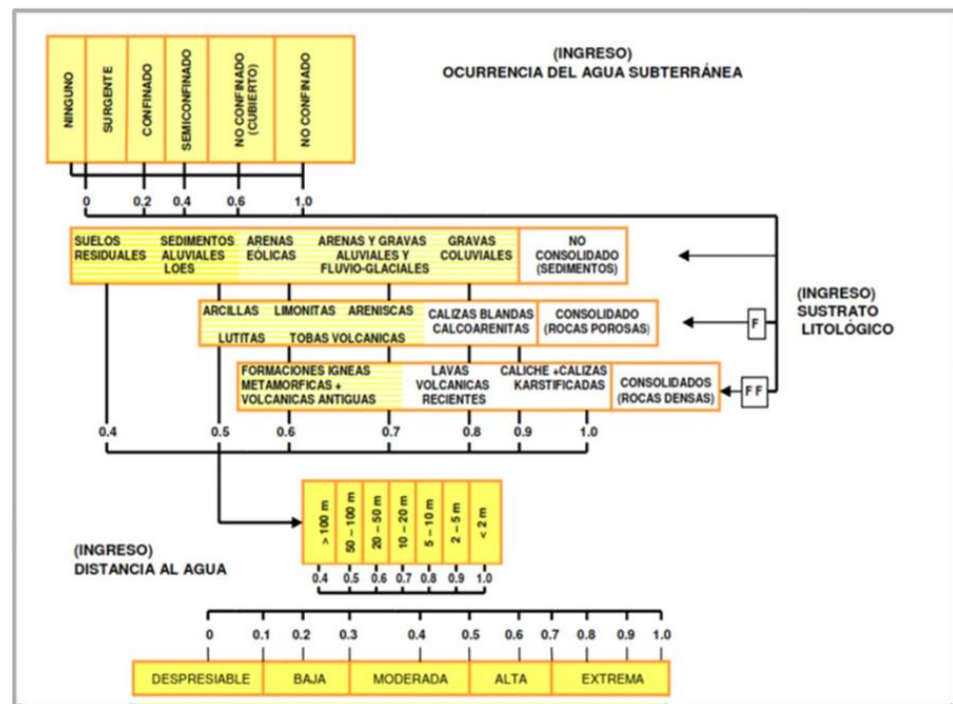
Para caracterizar el tipo de acuífero en la región de la investigación se utilizaron datos secundarios, como las definiciones de unidades hidrogeológicas del INGEMMET y el modelo geológico local. A partir de estos datos se puede determinar la composición de la microcuenca Jayllihuaya, que tiene en cuenta la posibilidad de acuíferos confinados y semiconfinados mediante el análisis de los elementos presentes en la zona no saturada.

d. Sistematización de la información del agua subterránea en la matriz de indexación GOD.

Se recopilaron los datos necesarios para calcular el índice y se creó un diagrama de indexación mediante (Foster & Hirata, 1991). Los valores de los diversos parámetros que indican la susceptibilidad a la contaminación pueden determinarse con el uso de este índice. Tras ordenar los tres índices, el valor resultante se clasifica en una escala de 0 a 1, como se ilustra en el siguiente gráfico:

Figura 20

Matriz de indexación GOD



Nota: Foster (1987).

e. Determinación de los niveles de vulnerabilidad.

Multiplicando los tres factores dados por el enfoque GOD, todos ellos variables importantes, se obtiene el nivel de vulnerabilidad global de cada zona: Clasificación del acuífero (G), geología de la zona (O) y nivel de las aguas subterráneas (D). La vulnerabilidad relativa de cada zona se determina multiplicando estos tres factores, siendo los resultados posibles extremo, alto, medio, bajo y muy bajo.

$$NV = G * O * D$$

Tabla 6

Cuadro de niveles de vulnerabilidad

nivel de vulnerabilidad		Posibilidad de contaminación
>7	Extrema	Vulnerable a la mayoría de los contaminantes del agua, con un impacto relativamente rápido en muchos escenarios de polución Vulnerable a muchos
0.5 – 0.7	Alta	contaminantes, excepto a aquellos muy absorbibles o fácilmente transformables Vulnerable a algunos
0.3 – 0.5	Moderada	contaminantes solo cuando son continuamente descargados o lixiviados.
0.1 – 0.3	Baja	Acuífero vulnerable a los polucionantes más persistentes y a largo plazo.
<0.1	Muy baja	Zona en donde las presencias de capas confinantes no permiten ningún flujo vertical significativo

Nota: Foster (1987).

3.5.4.2. Identificación y determinación del nivel de amenaza

principal de contaminación

Los Programas de Seguimiento y Control son un conjunto de procedimientos que incluyen la recogida de muestras de aguas subterráneas para su posterior análisis e interpretación con el fin de identificar y cuantificar la gravedad del peligro primario.

Los procedimientos de muestreo y análisis se llevan a cabo mediante un proceso de 4 etapas:

a. Identificación de la amenaza principal

Para la identificación de la amenaza principal, se hizo recorridos en la zona objeto de estudio tomándose los datos pertinentes, así como material fotográfico que pueda ayudar a comprender la situación y el

origen de las Notas contaminantes, de tal manera que se pueda identificar la amenaza principal de contaminación, estos pueden ser:

Tabla 7

Identificación de la amenaza en la zona de estudio

	Deslizamiento
Natural	Derrumbes
	Sismos
	Erupciones volcánicas
Antrópica	Inundaciones
	Agricultura
	Ganadería
	Industria

Nota: Elaboración propia del investigador

b. Toma de muestras de agua subterránea

El proceso de muestreo implicó una selección previa de los puntos de muestreo, que se planificó cuidadosamente en función de las características y rasgos distintivos de la zona de estudio. Esta selección se guió por una identificación inicial de la principal amenaza de contaminación de las aguas subterráneas. Durante el proceso de muestreo, se determinaron in situ tres parámetros fundamentales para caracterizar las muestras: niveles de oxígeno, pH y conductividad eléctrica. Se utilizaron equipos portátiles para medir estos parámetros. Posteriormente, las muestras se enviaron a un laboratorio para realizar los análisis físico-químicos necesarios de las aguas subterráneas. El laboratorio encargado de realizar estos análisis fue el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), ubicado en la localidad de Salcedo dentro de la provincia de Puno.



c. Identificación del parámetro más crítico

La identificación del parámetro a analizar, es en base a la identificación de la amenaza principal de contaminación de las aguas subterráneas y a los resultados del análisis de agua, en este estudio se trabajó con el parámetro más crítico, es decir, el parámetro más perjudicial para una determinada actividad; las cuales pueden ser Nitrato, cloruro, sodio, bicarbonato, etc.

d. Determinación del nivel de la amenaza principal de contaminación del agua subterránea.

Para determinar el nivel de la amenaza principal del agua subterránea se trabajó con el parámetro más crítico y representativo, según el análisis del resultado de las muestras de agua subterránea enviado al laboratorio, dicho nivel se determinará en base a los “Estándares de Calidad Ambiental (ECA), establecidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM), fijan valores máximos permitidos de contaminantes en el ambiente”.

Tabla 8

Estándares de Calidad de Agua

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido	Bebida de animales
FÍSICO – QUÍMICOS				
Aceites y grasas	mg/L		5	10
Bicarbonatos	mg/L		518	**
Cianuro Wad	mg/L		0.1	0.1
Cloruros	mg/L		500	**
Color (b)	Color verdadero Escala PT/Co		100(a)	100(a)
Conductividad	(μ S/cm)		2500	5000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L		15	15
Demanda química de Oxígeno (DBO5)	mg/L		40	40
Detergentes (SAAM)	mg/L		0.2	0.5
Fenoles	mg/L		0.002	0.01
Fluoruros	mg/L		1	**
Nitratos (NO ₃ - _N) + Nitritos (NO ₂ - _N)	mg/L		100	100
Nitritos (NO ₂ - _N)	mg/L		10	10
Oxígeno disuelto (valor mínimo)	mg/L		≥ 4	≥ 5
Potencial de Hidrogeno	Unidad de pH		6.5-8.5	6.5-8.4
Sulfatos	mg/L		1000	1000
Temperatura	°C		$\Delta 3$	$\Delta 3$
INORGANICOS				
Aluminio	mg/L		5	5
Arsénico	mg/L		0.1	0.2
Bario	mg/L		0.7	**
Berilio	mg/L		0.1	0.1
Boro	mg/L		1	5
Cadmio Cobre	mg/L		0.01	0.05
Cobalto	mg/L		0.2	0.5
Cromo total	mg/L		0.05	1
Hierro	mg/L		0.1	1
Litio	mg/L		5	**
Magnesio	mg/L		2.5	2.5
Manganeso	mg/L		**	250
Mercurio	mg/L		0.2	0.2
Níquel	mg/L		0.001	0.01
Plomo	mg/L		0.2	1
Selenio	mg/L		0.05	0.05
Zinc	mg/L		0.02	0.05

Nota: MINAM (2007).

3.5.4.3. Determinación del nivel de riesgo de contaminación del agua subterránea

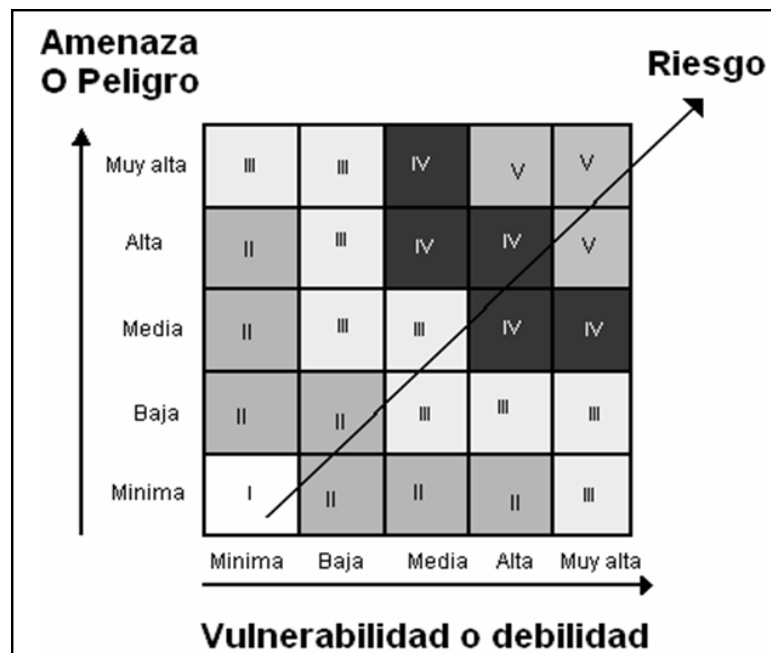
Para la determinación del nivel de riesgo de contaminación del agua subterránea, se combinan dos factores, las cuales son:

Factor interno. - Nivel de la Vulnerabilidad (V)

Factor externo. - Nivel de la Amenaza (A)

Figura 21

Esquema de identificación del Nivel de Riesgo



Nota: Foster (1987).



Tabla 9

Clasificación del riesgo de contaminación

	Nivel de Riesgo	Posibilidad de contaminación
V	Muy Alto	Contaminación temprana.
IV	Alto	Contaminación tardía.
III	Medio	Posibilidad de que pueda existir contaminación a largo plazo.
II	Bajo	Posibilidad de que no exista contaminación.
I	Inexistente	Sin contaminación

NOTA: Foster (1987).



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los cálculos y resultados finales que se dieron en la determinación del nivel de riesgo de contaminación del agua subterránea en la microcuenca Jayllihuaya dependieron de distintos factores, tanto internos como externos, siendo éstas la variación del nivel freático, litología de la zona, amenaza de contaminación, calidad del agua subterránea.

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Determinación del nivel de vulnerabilidad a la contaminación

Para la determinación del nivel de vulnerabilidad a la contaminación en la microcuenca de interés, se aplicó la metodología GOD, la misma que es propuesta por (Foster & Hirata, 1987), dicha metodología consta de la interacción de 3 factores:

$$IV=G*O*D$$

Donde:

IV: Índice de vulnerabilidad

G: Índice por condición de confinamiento del acuífero

O: Índice del substrato litológico

D: Índice por profundidad del nivel del agua

4.1.1.1. Control del nivel freático mensual

A continuación, se muestra el control del nivel freático del agua subterránea en los pozos identificados para el presente estudio:

Tabla 10

Control de nivel freático del agua subterránea

N°	Ubicación	Pozos identifica dos	Altitud	Coordenas UTM		Profundidad de pozo (m)	Lectura por meses (m)			nivel freático más crítico
				E	N		enero	febrero	marzo	
1		P-1	3894	396304	8243099	7.00	3.50	3.00	3.80	3.00
2		P-2	3892	396231	8243231	5.00	1.53	2.30	1.60	2.30
3		P-3	3890	396191	8243121	4.80	2.30	2.00	2.30	2.00
4		P-4	3883	396225	8243459	6.20	2.83	2.80	2.85	2.80
5		P-5	3876	395980	8243557	3.00	1.94	2.00	1.98	2.00
6		P-6	3874	395911	8243655	5.00	2.56	2.50	2.57	2.50
7		P-7	3878	395878	8243612	3.00	1.20	2.10	1.30	2.10
8		P-8	3867	396101	8243875	6.00	2.09	1.90	2.10	1.90
9		P-9	3860	395859	8243963	5.00	2.10	1.93	2.40	1.93
10		P-10	3859	395640	8243986	4.00	1.10	1.00	1.20	1.00
11		P-11	3858	395418	8243982	3.90	1.00	0.90	1.10	0.90
12		P-12	3855	395812	8244031	3.00	1.32	1.20	1.50	1.20
13		P-13	3861	396110	8244091	5.00	1.90	1.80	1.93	1.80
14		P-14	3862	396215	8244172	4.30	0.90	0.83	0.92	0.83
15		P-15	3862	396217	8244184	3.80	0.85	0.80	0.87	0.80
16		P-16	3852	395714	8244321	4.50	1.25	1.10	1.32	1.10
17		P-17	3851	395437	8244208	2.10	1.10	0.90	1.24	0.90
18		P-18	3843	395412	8244560	2.50	0.98	0.80	0.99	0.80
19		P-19	3837	394937	8244852	1.50	0.50	0.30	0.58	0.30
20		P-20	3833	394718	8244957	1.00	1.00	0.82	1.20	0.82
21		P-21	3832	394652	8245062	3.00	0.59	0.64	0.68	0.64
22		P-22	3832	394679	8245070	3.00	0.98	0.95	0.97	0.95
23		P-23	3831	394794	8245699	2.00	0.68	0.60	0.70	0.60
24		P-24	3825	394019	8245538	2.00	0.32	0.20	0.40	0.20

Nota: Elaboración propia del investigador.



La tabla 10, nos muestra el control del nivel freático del agua subterránea, para cual se identificó un total de 24 pozos piloto, las mismas que durante el estudio se encontraban operativos, cuyas aguas extraídas son usados para el riego de cultivos en su mayoría.

El control del nivel freático del agua subterránea se realizó en los meses de enero, febrero y marzo, tal como se muestra en la tabla 10, las mismas que están distribuidas por zonas (alta, media y baja).

De acuerdo al resultado, se observa que el mes de febrero presenta los niveles freáticos más críticos, obteniendo así los siguientes datos de acuerdo a las zonas de estudio.

Zona alta: Nivel freático está entre 1.10 m a 3 m

Zona media: Nivel freático está entre 0.80 m a 1.90 m

Zona baja: Nivel freático está entre 0.20 m a 0.80 m.

4.1.1.2. Caracterización litológica del acuífero

La región examinada consta de tres formaciones geológicas distintas.

Zona alta (3878 - 3894 m.s.n.m.)

La mayoría de las rocas de la zona alta son clastos redondeados o subredondeados de origen sedimentario, por lo que la tonalidad del suelo es indicativa de la roca madre del depósito. En esta zona predominan los depósitos de origen coluvial residual, siendo la mayor parte del suelo grueso y compuesto por gravas y arenas arcillosas (GC, SC), gravas y



arenas limosas (GM, SM), y diversas tonalidades de gris, rojo pálido y gris oscuro.

Zona media (3851 - 3867 m.s.n.m.)

La formación del suelo en la zona no saturada son depósitos fluviales y laderas escarpadas sobre depósitos aluviales; los suelos encontrados son predominantemente arenas arcillosas (SC), arenas limosas (SM), limos de alta y baja plasticidad (MH y ML), y un porcentaje menor de gravas arcillosas (GC), todos estratificados de forma inclinada; y la zona media contiene afloramientos rocosos de origen mayoritariamente sedimentario. Los suelos ricos en partículas finas son más frecuentes en las zonas más llanas.

Zona baja (3825 - 3843 m.s.n.m.)

En la zona inferior, hacia el borde del lago, los suelos tienen una profundidad de deposición de más de 4 metros y son de origen lacustre y fluvial relativamente reciente. La estratificación e intercalación en estos suelos es casi horizontal. El último tramo del río Jayllihuaya deposita limos orgánicos, plásticos y suelos arcillosos en una variedad de rellenos artificiales, algunos de los cuales han sido compactados recientemente.

4.1.1.3. Caracterización del tipo de acuífero

Poco se conoce de los sistemas acuíferos de la microcuenca Jayllihuaya ya que son muy pocos los estudios hidrológicos locales realizados; la mayoría de estudios en esta zona han sido de alcance regional o nacional, por lo que se ha realizado esta investigación.

Los acuíferos de la región investigada son en su mayoría formaciones sedimentarias de origen fluvial y lacustre, como demuestran los datos hidrogeológicos y geológicos. Los acuíferos del norte se conocen como acuíferos libres, mientras que los del sur se conocen como acuíferos libres cubiertos. Utilizando el diagrama de indexación de GOD, podemos ver que el acuífero libre cubierto es susceptible a la contaminación de las aguas subterráneas, así mismo destacan por su capacidad de captación y transporte de aguas subterráneas.

4.1.1.4. Sistematización en la matriz de indexación GOD.

Tabla 11

Índice de vulnerabilidad a la contaminación

Ubicación	Parámetros	Características	Índice G.O.D.
Zona alta	Tipo de acuífero (G)	Libre (cubierto)	0.6
	Características Litológicas (O)	Gravas coluviales	0.8
	Nivel Freático (D)	2.10 - 3.00 (2-5)	0.9
Zona media	Tipo de acuífero (G)	Libre (cubierto)	0.6
	Características Litológicas (O)	Arenas aluviales y fluviales, Arenas arcillosas y arenas limosas	0.7
	Nivel Freático (D)	0.80- 0.90 (<2)	1
Zona baja	Tipo de acuífero (G)	Libre	1
	Características Litológicas (O)	Arcillas lacustres y de estuario, Suelos residuales	0.5
	Nivel Freático (D)	0.20 - 0.95 (<2)	1

Nota: Elaboración propia del investigador.

La tabla 11. Nos muestra el índice de vulnerabilidad a la contaminación en las tres zonas de la microcuenca Jayllihuaya, teniendo,



así como resultado de acuerdo a los parámetros del índice GOD como son:
Tipo de acuífero (G), características litológicas (O) y nivel freático (D).

En la zona alta se tiene como resultado que las características del tipo de acuífero son libre cubierto con un índice de 0.6, las características litológicas son gravas aluviales con un índice de 0.8, y el índice de nivel freático es de 0.9.

En la zona media se tiene como resultado que las características del tipo de acuífero son libre cubierto con un índice de 0.6, las características litológicas son arenas aluviales y fluviales, arenas arcillosas y arenas limosas con un índice de 0.7, y el índice de nivel freático es de 1.

En la zona baja se tiene como resultado que la característica del tipo de acuífero es libre con un índice de 1, las características litológicas son arcillas lacustres y de estuario, suelos residuales con un índice de 0.75 y el índice de nivel freático es de 1.

4.1.1.5. Determinación de niveles de vulnerabilidad Zona alta

Tabla 12

Nivel de vulnerabilidad en la zona alta

Zona Alta			
VARIABLES	Factor GOD	Determinación del índice de vulnerabilidad	Nivel Vulnerabilidad adG*O*D
Tipo de acuífero (G)	Libre (cubierto)	0.6	
Sustrato litológico (O)	Gravas coluviales, Areniscas	0.8	0.4 3
Nivel Freático (D)	2-5m	0.9	

NOTA: Elaboración propia del investigador

$$NV=0.43$$

Nivel de vulnerabilidad = Moderada

Zona media

Tabla 13

Nivel de vulnerabilidad en la zona media

Zona Media			
VARIABLES	Factor GOD	Determinación del índice de vulnerabilidad	Nivel Vulnerabilidad adG*O*D
Tipo de acuífero (G)	Libre (cubierto) Arenas aluviales	0.6	
Sustrato litológico (O)	y fluviales, arenas arcillosas y arenas	0.7	0.42
Nivel Freático (D)	<2 m	1.0	

Nota: Elaboración propia del investigador

$$NV=0.42$$

Nivel de vulnerabilidad = Moderada

Zona baja

Tabla 14

Nivel de vulnerabilidad en la zona baja

Zona Baja			
Variables	Factor GOD	Determinación del índice de vulnerabilidad	Nivel Vulnerabilidad $G*O*D$
Tipo de acuífero (G)	Libre	1.0	
Sustrato litológico (O)	Arcillas lacustres y de estuario, Suelos residuales	0.55	0.55
Nivel Freático (D)	<2m	1.0	

Nota: Elaboración propia del investigador

$NV=0.55$

Nivel de vulnerabilidad = Alta

Las tablas 12, 13 y 14. Nos muestra que especialmente en las zonas media y baja de la microcuenca, el nivel freático está muy cerca de la superficie del suelo o se corresponde con ella, como demuestra la abundancia de manantiales en estas zonas. La infiltración de las precipitaciones y otras precipitaciones en el suelo crea aguas subterráneas, que luego se filtran en el acuífero. La profundidad de las aguas subterráneas en la región investigada varía tanto en el espacio como en el tiempo.

Los resultados deben interpretarse teniendo en cuenta que el trabajo en campo se realizó durante la estación de lluvias, cuando es más fácil y rápido que los hipotéticos contaminantes se infiltren en las aguas subterráneas debido a la mayor permeabilidad del suelo. Para ello se



tuvieron en cuenta las variables locales, que incluyen un nivel freático más alto durante la estación de lluvias y un claro intercambio de agua entre la superficie y el subsuelo, factores ambos que apuntan al movimiento de contaminantes desde la superficie hacia las aguas subterráneas.

4.1.2. Identificación y determinación del nivel de amenaza principal de contaminación

4.1.2.1. Identificación de la amenaza principal

La mayor preocupación sobre la contaminación de agua subterránea en la microcuenca Jayllihuaya se ha centrado en la contaminación asociada a la actividad antrópica, la población en su mayoría se dedica a la agricultura, siendo ésta su actividad principal, los mismos cuentan con invernaderos instalados en las cuales cultivan verduras y hortalizas.

Siendo así que la amenaza principal en dicha zona es la Agricultura, esto debido a que actualmente en la zona hacen uso del agua subterránea para el riego de los productos agrícolas y, además de ello los pozos de los cuales extraen agua se encuentran dentro de invernaderos.

Las actividades relacionadas a la agricultura son quizá el factor más generalizado y consecuente del deterioro de la calidad de las aguas subterráneas debido a la actividad humana

4.1.2.2. Toma de muestras de agua subterránea

A continuación, se muestra los puntos de muestreo del agua en los pozos identificados para el presente estudio:

Tabla 15*Puntos de muestreo de agua*

N°	Ubicación	Pozos de muestreo	Altitud	Coordenadas UTM	
				E	N
1	zona alta	P-2	3892	396231	8243231
2		P-4	3883	396225	8243459
3		P-8	3867	396101	8243875
4		P-10	3859	395640	8243986
5	zona media	P-12	3855	395812	8244031
6		P-15	3862	396217	8244184
7		P-17	3851	395437	8244208
8	zona baja	P-21	3832	394652	8245062
9		P-24	3825	394019	8245538

Nota: Elaboración propia del investigador

La tabla 15. Nos muestra los puntos estratégicos de muestreo de agua, para lo cual se tomó en cuenta criterios importantes, como son: Pozos que se encuentran dentro de los invernaderos, pozos que están ubicados a una distancia mínima de áreas de cultivo, donde hacen uso de fertilizantes, pozos que están en áreas no protegidas, es decir, pozos que están expuestos al peligro de contaminación.

Se seleccionó un total de 9 pozos de muestreo, tomando una (1) muestra de agua por cada pozo; en la zona alta se tomó dos muestras (P-2, P-4), en la zona media se tomó cinco muestras (P-8, P-10, P-12, P-15, P-17), y por último en la zona baja se tomó dos muestras (P-21, P-24).

Se ha tomado muestras de 15 ml de agua por muestra, que en total vendría a ser 135 ml, para esto se utilizó botellas adecuadamente limpias para su inmediato envío al laboratorio y respectivo análisis.



4.1.2.3. Identificación del parámetro más representativo y/o crítico.

Las actividades agrícolas son el factor más generalizado y consecuente del deterioro de la calidad de las aguas subterráneas debido a la actividad humana (CEDEX, 1993)

En términos de contaminación de las aguas subterráneas, los productos químicos nitrogenados que se encuentran en los fertilizantes son los nutrientes más preocupantes debido a su movilidad.

Los problemas de contaminación más acuciantes provocados por la agricultura pueden resumirse en lo siguiente (Sawyer et al., 2000).

- Los niveles de nitratos en las aguas subterráneas pueden aumentar drásticamente cuando se hace uso excesivo de fertilizantes nitrogenados.
- Las zonas con riego abundante tienen un alto índice de reciclado de las aguas subterráneas.
- Vertido descuidado de estiércol animal en lugares sensibles, aplicación inadecuada o excesiva de plaguicidas.

Se identificó que la amenaza principal de contaminación del agua subterránea en la microcuenca Jayllihuaya es la agricultura, el parámetro más representativo y/o crítico vendría a ser el nitrato, ya que es uno de los contaminantes más extendidos en las aguas subterráneas. Dado que las plantas sólo consumen aproximadamente la mitad del abono nitrogenado, el resto suele ser arrastrado por el agua que se filtra por el subsuelo y se introduce en los acuíferos, contaminando las aguas subterráneas. Muchos estudios han demostrado que el nitrato es el principal factor de

contaminación de las aguas subterráneas, y que esto se agrava cuando los cultivos se realizan en invernadero.

4.1.2.4. Determinación del nivel de la amenaza principal.

En cuanto a la determinación del nivel de la amenaza principal se trabaja en base al resultado del análisis de agua, específicamente con los valores del nitrato.

Se toma los valores más altos y/o críticos, las mismas que se evaluaron de acuerdo a los estándares de calidad del agua.

Tabla 16

Nivel de amenaza en la zona alta

Zona Alta				
Parámetro	Unidad de medida	ECA	Resultado de análisis de agua	Nivel de amenaza
Nitrato	mg/L	100	62.00	MEDIO

Nota: Elaboración propia del investigador

Tabla 17

Nivel de amenaza en la zona media

Zona Media				
Parámetro	Unidad de medida	ECA	Resultado de análisis de agua	Nivel de amenaza
Nitrato	mg/L	100	102.3	ALTO

Nota: Elaboración propia del investigador

Tabla 18

Nivel de amenaza en la zona baja

Zona Baja				
Parámetro	Unidad de medida	ECA	Resultado de análisis de agua	Nivel de amenaza
Nitrato	mg/L	100	86.80	MEDIO

Nota: Elaboración propia del investigador

Las tablas 16, 17 y 18. Nos muestra que en el resultado obtenido se puede verificar que, de las tres zonas del área de estudio, la zona media presenta un nivel alto de amenaza de contaminación; el nivel permitido de acuerdo al ECA es de 100 mg/l y el resultado según análisis de agua fue 102.3 mg/l, en ese sentido, el nivel de amenaza principal es alta (Tabla 17).

La zona alta y baja, presentan un nivel medio de amenaza de contaminación, ya que el resultado del análisis de agua es menor a 100mg/l (Tabla 16 y 18)

4.1.3. Determinación del nivel de riesgo de contaminación

La determinación del nivel del riesgo de contaminación se da en base a la interacción de los niveles de la Vulnerabilidad (V) y amenaza (A).

Tabla 19

Nivel de riesgo de contaminación zona alta

Zona Alta						
N.A.						
Muy alta	III	III	IV	V	V	
Alta	II	III	IV	IV	V	
Media	II	III	III	IV	IV	
Baja	II	II	III	III	III	
Minima	I	II	II	II	III	
	Minima	Baja	Media	Alta	Muy alta	N.V.

Nota: Elaboración propia del investigador

En esta zona se tiene un nivel de vulnerabilidad media y un nivel de amenaza media, y la interacción de estos dos factores tiene como resultado el nivel de riesgo.

NR = III

Nivel de Riesgo = Medio

Posibilidad de que pueda existir contaminación a largo plazo.

Tabla 20

Nivel de riesgo de contaminación zona media

Zona Media						
N.A.						
Muy alta	III	III	IV	V	V	
Alta	II	III	IV	IV	V	
Media	II	III	III	IV	IV	
Baja	II	II	III	III	III	
Mínima	I	II	II	II	III	
	Mínima	Baja	Media	Alta	Muy alta	N.V.

Nota: Elaboración propia del investigador

En esta zona se tiene un nivel de vulnerabilidad media y un nivel de amenaza alta, y la interacción de estos dos factores nos tiene como resultado el nivel de riesgo.

NR = IV

Nivel de Riesgo = Alto

Contaminación tardía

Tabla 21

Nivel de riesgo de contaminación zona baja

Zona Baja						
N.A.						
Muy alta	III	III	IV	V	V	
Alta	II	III	IV	IV	V	
Media	II	III	III	IV	IV	
Baja	II	II	III	III	III	
Mínima	I	II	II	II	III	
	Mínima	Baja	Media	Alta	Muy alta	N.V.

Nota: Elaboración propia del investigador

En esta zona se tiene un nivel de vulnerabilidad alta y un nivel de amenaza media, y la interacción de estos dos factores nos tiene como resultado el nivel de riesgo.

NR = IV

Nivel de Riesgo = Alto

Contaminación tardía

Las tablas 19, 21 y 21, nos muestra la interacción realizada entre los niveles de Vulnerabilidad (V) y niveles de amenaza (A), factor interno y externo respectivamente; la zona baja y media presenta un nivel de riesgo de contaminación IV (nivel alto) y según la clasificación de riesgo de contaminación (Tabla 9) es una contaminación tardía.

La zona alta dio como resultado un nivel de riesgo de contaminación III (nivel medio) y según la clasificación de riesgo de contaminación (Tabla 9) implica que la posibilidad de que pueda existir contaminación a largo plazo.



4.2. DISCUSIÓN

De acuerdo a los resultados recabados, se ha obtenido que el nivel de vulnerabilidad en la microcuenca Jaillihuaya en las tres zonas de estudio son: Zona alta se obtuvo un $NV=0.43$ = nivel de vulnerabilidad media; en la zona media se obtuvo un $NV=0.42$ = nivel de vulnerabilidad moderada; en la zona baja se obtuvo un $NV=0.55$ = nivel de vulnerabilidad alta. Estos resultados comparados con Cabrera (2017) coinciden en dos zonas de estudio, zona media y zona baja, pero difieren en la zona alta; según Cabrera, (2017) los índices para las tres zonas del acuífero de Jayllihuaya fueron los siguientes: Vulnerabilidad baja en la zona alta (0.384), vulnerabilidad moderada en la zona central (0.504) y vulnerabilidad alta en la zona baja (0.55). Para lograr los objetivos de estos estudios se utilizaron métodos paramétricos de superposición e índices GOD.

De acuerdo a los resultados obtenidos en identificación y determinación del nivel de amenaza principal de contaminación del agua subterránea aceptamos la hipótesis alternativa específica que la amenaza principal de contaminación del agua subterránea en la microcuenca Jayllihuaya es de nivel medio por la actividad agrícola.

En la zona de estudio aún no se realizaron investigaciones respecto a la amenaza principal de contaminación del agua subterránea; sin embargo, este resultado coincide con CEDEX (1993) que refiere que las actividades agrícolas son el factor más generalizado y consecuente del deterioro de la calidad de las aguas subterráneas debido a la actividad humana; y según Figueroa (2010) quien realizó un estudio de evaluación del peligro potencial de contaminación de las aguas subterráneas en la provincia de Talagante-Chile, donde se identificó las actividades potencialmente contaminantes del agua subterránea, que resultaron incluir tanto actividades industriales como agrícolas a



una escala bastante grande, es decir, coincide en referir que la actividad agrícola es un contribuyente de la contaminación del agua subterránea.

A partir de los resultados encontrados aceptamos la hipótesis alternativa general que el nivel de riesgo varía en función a la contaminación del agua subterránea en la microcuenca Jayllihuaya. La determinación del nivel del riesgo de contaminación se da en base a la interacción de los niveles de la Vulnerabilidad (V) y amenaza (A), la interacción realizada entre los niveles de Vulnerabilidad (V) y niveles de amenaza (A), factor interno y externo respectivamente; la zona baja y media presenta un nivel de riesgo de contaminación IV (nivel alto) y según la clasificación de riesgo de contaminación es una contaminación tardía, la zona alta dio como resultado un nivel de riesgo de contaminación III (nivel medio) y según la clasificación de riesgo de contaminación implica que la posibilidad de que pueda existir contaminación a largo plazo. En el resultado obtenido se puede verificar que, de las tres zonas del área de estudio, la zona media presenta un nivel alto de amenaza de contaminación; el nivel permitido de acuerdo al ECA es de 100 mg/l y el resultado según análisis de agua fue 102.3 mg/l, en ese sentido, el nivel de amenaza principal es alta; la zona alta y baja, presentan un nivel medio de amenaza de contaminación, ya que el resultado del análisis de agua es menor a 100 mg/l.



V. CONCLUSIONES

- Las aguas subterráneas en la microcuenca Jayllihuaya, presenta un alto nivel de riesgo de contaminación en la zona baja y zona media, esto debido a que el nivel de vulnerabilidad o el nivel de la amenaza presenta un nivel alto y la interacción de estos dos factores nos da como resultado un nivel IV, en un 67 % del área de estudio. Este alto nivel de riesgo de contaminación disminuye a un nivel medio hacia la zona alta, esto debido a que el nivel de contaminación de la vulnerabilidad y el nivel de contaminación de la amenaza son de nivel medio y la interacción de estos factores nos da como resultado III, en un 33%.
- El nivel de vulnerabilidad de contaminación del agua subterránea en la microcuenca Jayllihuaya, es alto en la zona baja. Este alto nivel de vulnerabilidad disminuye a un nivel moderado hacia la zona media y alta respectivamente, estos resultados se obtuvieron de acuerdo al tipo de acuífero, litología, y la profundidad del nivel freático.
- La amenaza principal identificada en la zona de estudio es la agricultura, debido a que en la microcuenca Jayllihuaya, en su mayoría utilizan el agua subterránea para riego de los cultivos, determinando así al nitrato como el parámetro más crítico, con un nivel alto de contaminación en la zona media, y un nivel moderado de contaminación en la zona baja y alta.



VI. RECOMENDACIONES

- En función al resultado obtenido del nivel de riesgo de contaminación del agua subterránea en la microcuenca Jayllihuaya, se recomienda realizar un plan de gestión de recursos hídricos subterráneos, para que puedan ser utilizadas por las entidades encargadas del manejo de dicho recurso hídrico y de esta forma promover una cultura de preservación e implementar estrategias de control y manejo adecuado.
- Para prevenir el establecimiento o la continuación de actividades humanas que puedan contaminar las aguas subterráneas en zonas de riesgo de aguas subterráneas y para evaluar hacia dónde pueden migrar o han migrado los contaminantes que ya han entrado en las aguas subterráneas, se recomienda realizar un estudio litológico.
- Se recomienda una evaluación más exhaustiva y oportuna de los factores que afectan a la introducción y propagación de contaminantes en el subsuelo, distinguiendo entre cada actividad contaminante y el propio contaminante, debido a la compleja interacción entre los diversos componentes del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.
- Se recomienda realizar un estudio en la misma zona, utilizando otro método para la determinación del nivel de contaminación del riesgo, el cual tendrá como base el resultado del nivel de riesgo de contaminación obtenidas en el presente estudio.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albert, (1999). *Diccionario de la contaminación*. Centro de Ecología y Desarrollo. ECODES. Colombia.
- Aguilar R. (2010). *Evaluación de la calidad del agua de uso doméstico y agrícola en la microcuenca de Jayllihuaya*. Tesis Universidad Nacional de Ingeniería.
- Auge, M. (1995). *Primer Curso de Posgrado de Hidrogeología Ambiental*. Universidad de Buenos Aires, (inédito): 1-65, Buenos Aires.
- APHA (American Public Health Association) (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association. Washington DC.
- Aller, L; Bennet, T; Lehr, J; Petty, R; & G, Hackett (1987). *DRASTIC astandardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. U.S. EPA. Oklahoma.
- Bellindo, I. (2012). *Aguas Subterráneas, Conocimiento y Explotación*. Buenos Aires: Instituto de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ingeniería.
- Bredehoeft, J (1992). *Much contaminated ground water can't be cleaned up, Groundwater*.
- Cabrera A. S. (2017). *Evaluación del riesgo de contaminación del acuífero del centro poblado Jayllihuaya-Puno mediante la técnica GOD*. Tesis Universidad Nacional de Ingeniería. Repositorio institucional.
- Candela Lledó. (2002). *La contaminación de las aguas subterráneas por las actividades agrarias en España*.
- Castany, G. (1971). *Tratado práctico de las aguas subterráneas*. Ediciones Omega. p. 347-348.



- Cedex. (1993). *Estudio de la contaminación de origen agrícola en las aguas subterráneas de zonas detríticas*. Cuenca del Duero.
- Cepis (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas*, 2da edición. Lima Perú.
- Civita, M.; Chiappone, A. y Falco, M. (1990). E P: Jarre. *Preparazione della carta di vulnerabilita per la rilocalizzazione di un impianto pozzi dell aquedotto di Torino*. Proc. 1st. Marano sul Parnano.
- Collazo M., Montaña, J. (2012). *Manual de agua subterránea*. Montevideo, UY. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección General de Desarrollo Rural. 121 p.
- Comisión Económica Para Europa (1995.). *Protection and Sustainable USE of Waters: Recommendations to ECE Governments*. Ginebra.
- Comision Europea (2008). *Protección de las aguas subterráneas*. Europa Comisión tecnica multisectorial (2009) *Política y Estrategia Nacional re Recursos Hídricos del Perú*. Lima-Perú
- Custodio, E. y Llamas, M. R. (2001). *Hidrología subterránea*. 2ª Edición. Ediciones Omega S.A.
- Davis, M. (2005). *Ingeniería y ciencias ambientales*. 1a Edición. Editorial McGraw Hill / Interamericana de México.
- Deutsch, W.J. (1963). *Groundwater Geochemistry: Fundamentals and Applications to Contamination*, CRC Press.
- Fetter, C. W. (1999). *Contaminant Hydrogeology*. Prentice-Hall, 2ª edición
- Figuroa, G. A. (2010). *Evaluación del peligro potencial de contaminación de las aguas subterráneas en la provincia de Talagante*.



- Fonseca, V. (2009). *Evaluación de los Riesgos de Contaminación de los acuíferos pertenecientes al municipio de Mosquera.*
- Foster S; Hirata, R. (1988). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas, una metodología basada en datos existentes.* Organización Panamericana de la Salud.
- Foster, S. Hirata, R. (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes.* Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. 2a ed.
- Foster, S; Ventura M; Hirata R. (1987). *Contaminación de las aguas subterráneas. Un enfoque de la situación en América Latina y el Caribe en relación con el suministro de agua potable.* OMS. OPS-HPE. CEPIS.
- Freeze, R.A. y Cherry, J.A. (1979). *Groundwate.* Prentice Hall, 604 pp.
- Gramajo P.(2004). *Determinación de la calidad del agua para consumo humano y uso industrial, obtenida de pozos mecánicos en la zona 11, Mixco, Guatemala.*
- Guerra, F. D.; (1979). *Edafología General,* Editorial DAP, La Habana.
- Granel C; Gález H; y Foster S. (2002). *Deterioro de la calidad de agua subterránea por el desarrollo poblacional.* Ingeniería, Cancún, Quintana Roo.
- Hirata, R., & Rebouças, A. (2001). *La protección de los recursos hídricos subterráneos: Una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos.*
- Kerns,W.R. (1977). *Public Policy on Groundwater Quality Protection. Proceedings of a National Conference.* Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Llamas Madurga, Manuel Ramón (1996). *Los embalses subterráneos en la planificación hidráulica.* Revista de obras públicas, núm. 3016, pp. 571-604



- Maderey Rascon, L. (2005). *Principios de hidrogeografía Estudio del Ciclo Hidrológico*, Instituto de Geografía, Universidad Autónoma de México.
- María V. Vélez O. (1999). *Hidráulica de aguas subterráneas*. 2da edición. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellin.
- Mena G. & Montes J., (2010). *Evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada al antiguo botadero de desechos sólidos de mariona, departamento de san salvador*. Universidad de San Salvador. El salvador.
- Metcalf & Eddy (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales*. Tratamiento, Vertido y Reutilización, 3ª ed. Mc Graw-Hill, Madrid.
- Muñoz, H., Armienta, A., Vera, A., y Cenicerros, N. (2004). *Nitrato en el agua subterránea del valle de Uamantla, Tlaxcala, México*.
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS) (2003). *Total dissolved solids in drinking-water*. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable. Ginebra (Suiza), Organización Mundial de la Salud. (WHO/SDE/WSH/03.04/16).
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (2006). *Guías para la calidad del agua potable primer apéndice a la tercera edición Volumen1*
Recomendaciones Organización Mundial de la Salud.
- Organización panamericana de la salud (OPS) (2004). *Técnicas para la construcción de captaciones de aguas superficiales*.
- Palomino, S. (2012). *Análisis de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero Aguascocha*. Tesis Universidad Nacional de Ingeniería Lima Perú.
- P. Medellín Milan, (2002). *Industria y Agua*. San Luis Potosi Mexico. PNUMA, 2002.
Estado del Medio Ambiente y Medidas Normativas. S.l.:s.n.



- Ramos, R. (2005). *Análisis de riesgo dentro del marco de la gestión integral del recurso hídrico en la microcuenca del río Pansalic.*, Mixco, Guatemala.
- Rojas, R. (2002). *Elementos de vigilancia y control*. Guía para la vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano. Lima, CEPIS/OPS.
- Sáenz, F. (1999). *Identificación de áreas críticas para el manejo de la cuenca del río Pacuare, Costa Rica*. Tesis Mag. Se. Turrialba, CR, CATIE.
- Santayana, V. S. (2000). *Curso de actualización profesional de Aguas Subterráneas*.
- Sawyer, C; McCarty, L; Parkin, G. (2000). *Química para Ingeniería Ambiental*. Editorial McGraw Hill, Cuarta edición.
- Serruto, C.R. (2001). *Riego y Drenaje*. Universidad Nacional del Altiplano Puno. Facultad de Ciencias Agrarias.
- Severiche C. y González U. (2012). *Evaluación analítica para la determinación de sulfatos en aguas por método turbidimétrico modificado*. Aguas de Cartagena SA ESP Ing. USBMed.
- Schmoll, O. et al., (2006). *Protecting groundwater for health: managing the quality of drinking-water sources*, Geneva, Switzerland: World Health Organization (WHO).
- <https://www.ircwash.org/sites/default/files/Schmoll-2006>
- Skinner, A. Ch. (1985). *Groundwater Protection in Fissured Rocks*. In *Theoretical Background. Hydrogeology and Practice of Groundwater Protection Zones*. Vol 6. International Contributions to Hydrogeology. International Association of Hydrogeologists. Ed Heise.



Terán, P. (2003). *Comparación de métodos para determinación de perímetros de protección de pozos y su aplicabilidad en algunos pozos del sistema de abastecimiento de agua potable en la ciudad de El Vigia*. Mérida-Venezuela.

Vélez, M. (1999). *Hidráulica de aguas subterráneas*. 2a ed. Universidad Nacional de Colombia.

<http://www.bdigital.unal.edu.co/4993/>

Wilson A. (1991). *Environmental Risk, Identification and Management*. Lewis Publisher Inc.



ANEXOS



ANEXO A: Diagrama GOD

ANEXO B: Diagrama de Riesgos

ANEXO C: Identificación de pozos

ANEXO D: Ubicación de pozos

ANEXO E: Estratigrafía de la microcuenca Jayllihuaya

ANEXO F: Control del nivel freático mensual

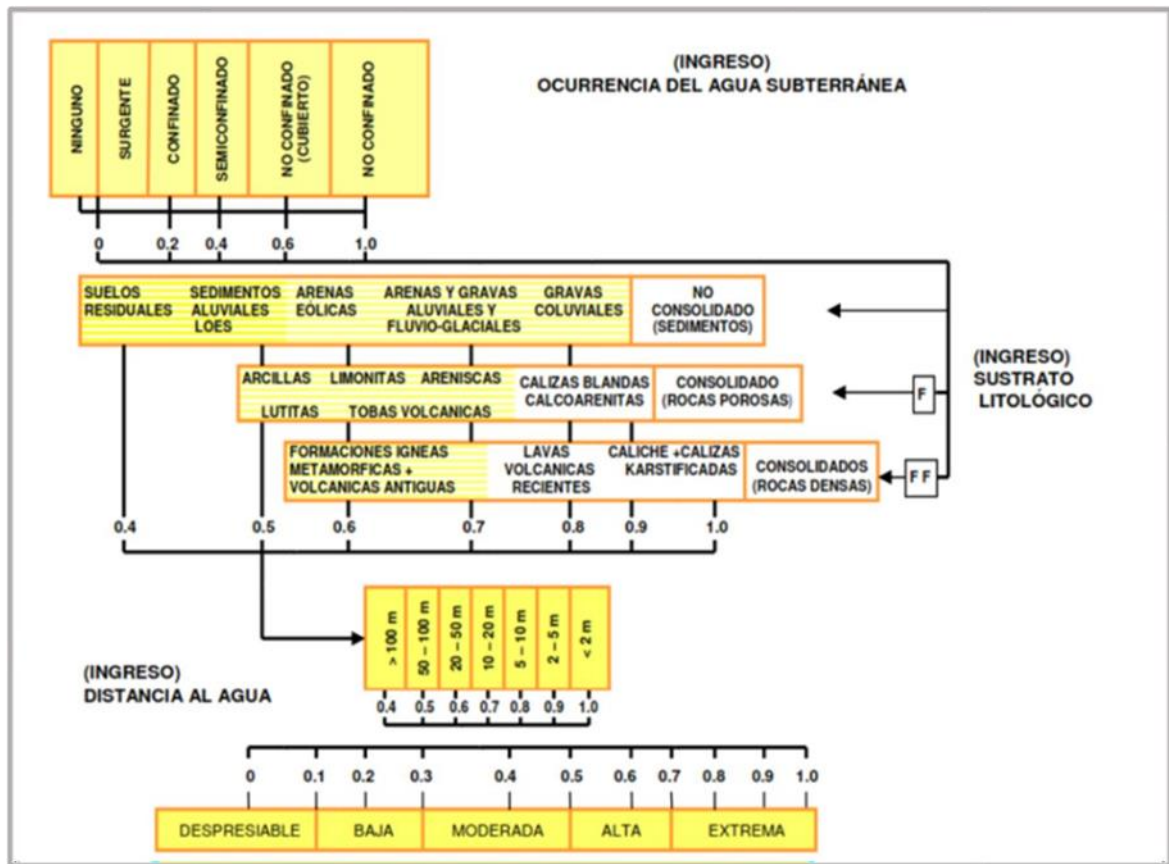
ANEXO G: Análisis de agua

ANEXO H: Estándares de Calidad de Agua

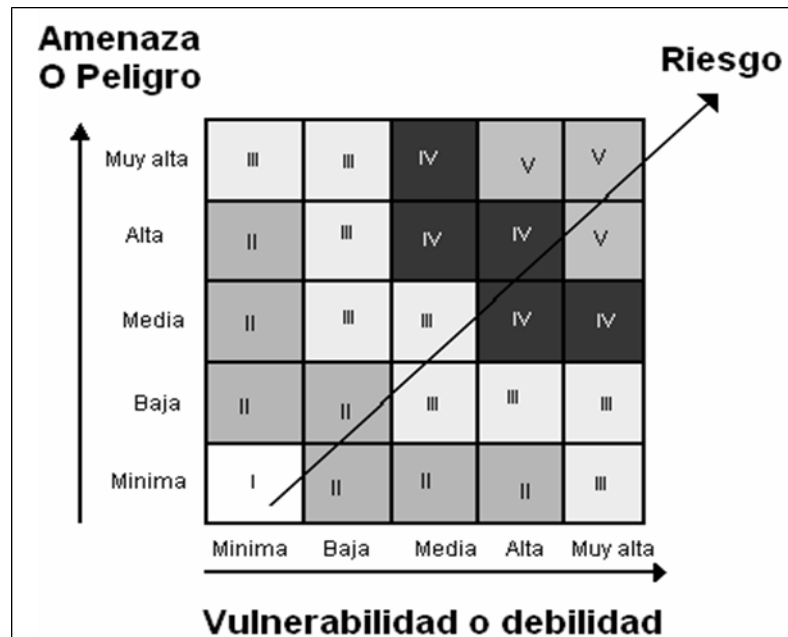
ANEXO I: Registros fotográficos

ANEXO J: Mapas

ANEXO A: Diagrama GOD



ANEXO B: Diagrama de Riesgos



ANEXO C: Identificación de pozos

ZONAS	NÚMERO DE POZOS IDENTIFICADOS	FECHA
ALTA	7	06/01/2018
		06/01/2018
		06/01/2018
		06/01/2018
MEDIA	10	06/01/2018
		06/01/2018
		06/01/2018
		07/01/2018
		07/01/2018
BAJA	7	07/01/2018
		07/01/2018
		07/01/2018
		07/01/2018
		07/01/2018

ANEXO D: Ubicación de pozos

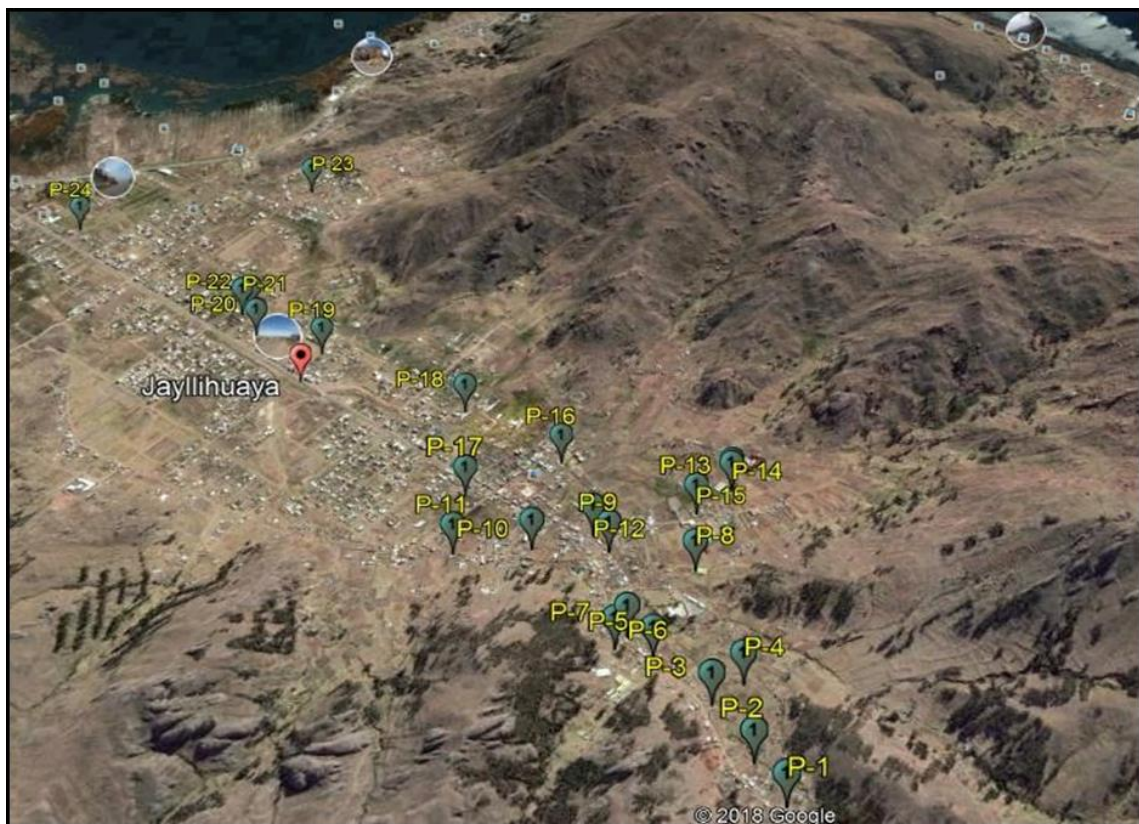


Imagen 1: Pozos identificados



Imagen 2: Puntos de pozos para muestreo de agua

ANEXO E: Estratigrafía de la microcuenca Jayllihuaya

ZONA	CONSOLIDACION DE LA ZONA NO SATURADA	CARACTERISTICAS LITOLÓGICAS
Baja	No consolidada (sedimentos)	Arcillas lacustres y de estuario
		Suelos residuales
Media	No consolidada (sedimentos)	Arenas aluviales y fluviales
		Arenas arcillosas y arena limosas
Alta	No consolidada (sedimentos)	Gravas coliviales
	Consolidado (rocas porosas)	Areniscas

ANEXO F: Control del nivel freático mensual

ENERO

N°	Pozos identificados	Zona	Coordenadas (UTM)		Altitud (m.s.n.m.)	Profundidad de los pozos (m)	Lectura mensual del nivel freático (m)
			E	N			
1	P-1	zona alta	396304	8243099	3894	7.00	3.50
2	P-2		396231	8243231	3892	5.00	1.53
3	P-3		396191	8243121	3890	4.80	2.30
4	P-4		396225	8243459	3883	6.20	2.83
5	P-5		395980	8243557	3876	3.00	1.94
6	P-6		395911	8243655	3874	5.00	2.56
7	P-7		395878	8243612	3878	3.00	1.20
8	P-8		396101	8243875	3867	6.00	2.09
9	P-9	zona media	395859	8243963	3860	5.00	2.10
10	P-10		395640	8243986	3859	4.00	1.10
11	P-11		395418	8243982	3858	3.90	1.00
12	P-12		395812	8244031	3855	3.00	1.32
13	P-13		396110	8244091	3861	5.00	1.90
14	P-14		396215	8244172	3862	4.30	0.90
15	P-15		396217	8244184	3862	3.80	0.85
16	P-16		395714	8244321	3852	4.50	1.25
17	P-17	zona baja	395437	8244208	3851	2.10	1.10
18	P-18		395412	8244560	3843	2.50	0.98
19	P-19		394937	8244852	3837	1.50	0.50
20	P-20		394718	8244957	3833	1.00	1.00
21	P-21		394652	8245062	3832	3.00	0.59
22	P-22		394679	8245070	3832	3.00	0.98
23	P-23		394794	8245699	3831	2.00	0.68
24	P-24		394019	8245538	3825	2.00	0.32

FEBRERO

N°	Pozos identificados	Zona	Corrdenadas (UTM)		Altitud (m.s.n.m.)	Profundidad de los pozos (m)	Lectura mensual del nivel freático (m)	
			E	N			Febrero	Febrero
1	P-1	zona alta	396304	8243099	3894	7.00	3.00	3.00
2	P-2		396231	8243231	3892	5.00	2.30	2.30
3	P-3		396191	8243121	3890	4.80	2.00	2.00
4	P-4		396225	8243459	3883	6.20	2.80	2.80
5	P-5		395980	8243557	3876	3.00	2.00	2.00
6	P-6		395911	8243655	3874	5.00	2.50	2.50
7	P-7		395878	8243612	3878	3.00	2.10	2.10
8	P-8	zona media	396101	8243875	3867	6.00	1.90	1.90
9	P-9		395859	8243963	3860	5.00	1.93	1.93
10	P-10		395640	8243986	3859	4.00	1.00	1.00
11	P-11		395418	8243982	3858	3.90	0.90	0.90
12	P-12		395812	8244031	3855	3.00	1.20	1.20
13	P-13		396110	8244091	3861	5.00	1.80	1.80
14	P-14		396215	8244172	3862	4.30	0.83	0.83
15	P-15		396217	8244184	3862	3.80	0.80	0.80
16	P-16		395714	8244321	3852	4.50	1.10	1.10
17	P-17		395437	8244208	3851	2.10	0.90	0.90
18	P-18	zona baja	395412	8244560	3843	2.50	0.80	0.80
19	P-19		394937	8244852	3837	1.50	0.30	0.30
20	P-20		394718	8244957	3833	1.00	0.82	0.82
21	P-21		394652	8245062	3832	3.00	0.64	0.64
22	P-22		394679	8245070	3832	3.00	0.95	0.95
23	P-23		394794	8245699	3831	2.00	0.60	0.60
24	P-24		394019	8245538	3825	2.00	0.20	0.20

MARZO

N°	Pozos identificados	Zona	Coordenadas (UTM)		Altitud (m.s.n.m.)	Profundidad de los pozos (m)	Lectura mensual del nivel freático (m)		
			E	N				Marzo	
1	P-1	zona alta	396304	8243099	3894	7.00		3.80	
2	P-2		396231	8243231	3892	5.00		1.60	
3	P-3		396191	8243121	3890	4.80		2.30	
4	P-4		396225	8243459	3883	6.20		2.85	
5	P-5		395980	8243557	3876	3.00		1.98	
6	P-6		395911	8243655	3874	5.00		2.57	
7	P-7		395878	8243612	3878	3.00		1.30	
8	P-8	zona media	396101	8243875	3867	6.00		2.10	
9	P-9		395859	8243963	3860	5.00		2.40	
10	P-10		395640	8243986	3859	4.00		1.20	
11	P-11		395418	8243982	3858	3.90		1.10	
12	P-12		395812	8244031	3855	3.00		1.50	
13	P-13		396110	8244091	3861	5.00		1.93	
14	P-14		396215	8244172	3862	4.30		0.92	
15	P-15		396217	8244184	3862	3.80		0.87	
16	P-16		395714	8244321	3852	4.50		1.32	
17	P-17		395437	8244208	3851	2.10		1.24	
18	P-18		395412	8244560	3843	2.50		0.99	
19	P-19		394937	8244852	3837	1.50		0.58	
20	P-20		394718	8244957	3833	1.00		1.20	
21	P-21		zona baja	394652	8245062	3832	3.00		0.68
22	P-22			394679	8245070	3832	3.00		0.97
23	P-23			394794	8245699	3831	2.00		0.70
24	P-24			394019	8245538	3825	2.00		0.40

N°	Ubicación	Pozos identificados	Altitud	Coordenas UTM		profundidad de pozo (m)	Lectura por meses (m)			nivel freatico más crítico
				E	N		enero	febrero	marzo	
1		P-1	3894	396304	8243099	7	3.5	3	3.8	3
2		P-2	3892	396231	8243231	5	1.53	2.3	1.6	2.3
3		P-3	3890	396191	8243121	4.8	2.3	2	2.3	2
4		P-4	3883	396225	8243459	6.2	2.83	2.8	2.85	2.8
5	zona alta	P-5	3876	395980	8243557	3	1.94	2	1.98	2
6		P-6	3874	395911	8243655	5	2.56	2.5	2.57	2.5
7		P-7	3878	395878	8243612	3	1.2	2.1	1.3	2.1
8		P-8	3867	396101	8243875	6	2.09	1.9	2.1	1.9
9		P-9	3860	395859	8243963	5	2.1	1.93	2.4	1.93
10		P-10	3859	395640	8243986	4	1.1	1	1.2	1
11		P-11	3858	395418	8243982	3.9	1	0.9	1.1	0.9
12		P-12	3855	395812	8244031	3	1.32	1.2	1.5	1.2
13		P-13	3861	396110	8244091	5	1.9	1.8	1.93	1.8
14	zona media	P-14	3862	396215	8244172	4.3	0.9	0.83	0.92	0.83
15		P-15	3862	396217	8244184	3.8	0.85	0.8	0.87	0.8
16		P-16	3852	395714	8244321	4.5	1.25	1.1	1.32	1.1
17		P-17	3851	395437	8244208	2.1	1.1	0.9	1.24	0.9
18		P-18	3843	395412	8244560	2.5	0.98	0.8	0.99	0.8
19		P-19	3837	394937	8244852	1.5	0.5	0.3	0.58	0.3
20		P-20	3833	394718	8244957	1	1	0.82	1.2	0.82
21		P-21	3832	394652	8245062	3	0.59	0.64	0.68	0.64
22	zona baja	P-22	3832	394679	8245070	3	0.98	0.95	0.97	0.95
23		P-23	3831	394794	8245699	2	0.68	0.6	0.7	0.6
24		P-24	3825	394019	8245538	2	0.32	0.2	0.4	0.2



ANEXO G: Análisis de agua



MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA-INIA
SERVICIO NACIONAL DE LABORATORIOS
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA – PUNO
ANEXO SALCEDO
Of. Principal: Av. La Molina 1981 – La Molina Lima



CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE AGUA

Análisis N°: 1181
Fecha de Entrada: 04 de Mayo del 2018
Fecha de Certificación: 07 de Mayo del 2018
Sistema de Riego:

Localización: M-1 MARITHZA APAZA PINO

Determinaciones		
pH	7,68	
C.E.	2,34	25*(mS/cm)
Sales Totales	808,00	(mg/l)
Dureza Total	150,20	CaCO ₃ (G.H.F.)
Alcalinidad total	80,00	CaCO ₃
R.A.S.	9,64	
S.C.R.	9,91	
Índice de Scott		
Boro		(ppm)
CATIONES	meq/l	mg/l
Calcio	20,10	400,80
Magnesio	10,00	121,60
Potasio	4,90	191,59
Sodio	37,30	857,90
TOTAL	72,20	
ANIONES	meq/l	mg/l
Cloruros	6,40	226,94
Sulfatos	1,62	77,80
Carbonatos	0,00	0,00
Bicarbonatos	0,08	4,88
TOTAL	8,10	

Representación grafica	Muy baja	Bajo	Normal	Alto	Muy alto
pH	_____				
C.E.	_____				
Sales Totales	_____				
Dureza Total	_____				
R.A.S.	_____				
S.C.R.	_____				
Índice de Scott	_____				
Boro	_____				
Sodio	_____				
Nitratos	_____				
Cloruros	_____				
Bicarbonatos	_____				

Otras Determinaciones	Resultado	
	meq/l	mg/l
Nitratos (N de NO ₃)	0,70	41,40
Nitrito (N de NO ₂)		



INIA
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA – PUNO

Ing° JORGE CANHUA ROJAS
Jefe Laboratorio Analisis
SALCEDO

Clasificación Riverside: C4S2
R.A.S: Agua no recomendable a dudosa. Aguas utilizables con cierta precaución por ser agua estancada se recomienda drenar si es pozo
S.C.R: Agua no recomendable
Tipo de Agua: Muy Dura.
Diagnóstico y Recomendaciones (Normas de L.V. Wilcox, Diagrama): Agua Dudosa a no válida.

www.inia.gob.pe

Rinconada de Salcedo s/n
Puno. Puno. Perú
T: (051)363-812



MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA-INIA
SERVICIO NACIONAL DE LABORATORIOS
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
ANEXO SALCEDO
Of. Principal: Av. La Molina 1981 - La Molina Lima



CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE AGUA

Análisis N°: 1182
Fecha de Entrada: 04 de Mayo del 2018
Fecha de Certificación: 07 de Mayo del 2018
Sistema de Riego:

Localización: M-2 MARITHZA APAZA PINO

Determinaciones		
pH	7,94	
C.E.	0,242	25*(mS/cm)
Sales Totales	84,00	(mg/l)
Dureza Total	15,72	CaCO ₃ (G.H.F.)
Alcalinidad total	20,00	CaCO ₃
R.A.S.	5,02	
S.C.R.	0,00	
Índice de Scott		
Boro		(ppm)
CACIONES	meq/l	mg/l
Calcio	1,56	31,26
Magnesio	1,58	19,21
Potasio	20,20	789,82
Sodio	6,30	144,90
TOTAL	29,64	
ANIONES	meq/l	mg/l
Cloruros	0,90	31,91
Sulfatos	1,52	73,00
Carbonatos	0,00	0,00
Bicarbonatos	0,02	1,22
TOTAL	2,44	

Representación grafica	Muy baja	Bajo	Normal	Alto	Muy alto
pH					
C.E.					
Sales Totales					
Dureza Total					
R.A.S.					
S.C.R.					
Índice de Scott					
Boro					
Sodio					
Nitratos					
Cloruros					
Bicarbonatos					

Otras Determinaciones	Resultado	
	meq/l	mg/l
Nitratos (N de NO ₃)	1,00	62,00
Nitrito (N de NO ₂)		



INIA
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
Ing° JORGE CANIHUA ROJAS
Jefe Laboratorio Análisis
SALCEDO

Clasificación Riverside: C2S1
R.A.S: Agua de buena calidad a aceptable.
S.C.R: Agua poco recomendable a aceptable
Tipo de Agua: Semi Blanda.
Diagnóstico y Recomendaciones (Normas de L.V. Wilcox, Diagrama): Agua de Excelente a Buena.

www.inia.gob.pe
Rinconada de Salcedo s/n
Puno. Puno. Perú
T: (051)363-812



MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA-INIA
SERVICIO NACIONAL DE LABORATORIOS
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
ANEXO SALCEDO
Of. Principal: Av. La Molina 1981 - La Molina Lima



CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE AGUA

Análisis N°: 1183
Fecha de Entrada: 04 de Mayo del 2018
Fecha de Certificación: 07 de Mayo del 2018
Sistema de Riego:

Localización: M-3 MARITHA APAZA PINO

Determinaciones		
pH	7,66	
C.E.	2,34	25°(mS/cm)
Sales Totales	806,00	(mg/l)
Dureza Total	150,29	CaCO ₃ (G.H.F.)
Alcalinidad total	80,00	CaCO ₃
R.A.S.	9,63	
S.C.R.	9,92	
Índice de Scott		
Boro		(ppm)
CATIONES	meq/l	mg/l
Calcio	20,00	400,80
Magnesio	10,00	121,60
Potasio	4,90	191,59
Sodio	37,30	857,90
TOTAL	72,20	
ANIONES	meq/l	mg/l
Cloruros	6,40	226,94
Sulfatos	1,62	77,80
Carbonatos	0,00	0,00
Bicarbonatos	0,08	4,88
TOTAL	8,10	

Representación grafica	Muy baja	Bajo	Normal	Alto	Muy alto
pH					
C.E.					
Sales Totales					
Dureza Total					
R.A.S.					
S.C.R.					
Índice de Scott					
Boro					
Sodio					
Nitratos					
Cloruros					
Bicarbonatos					

Otras Determinaciones	Resultado	
	meq/l	mg/l
Nitratos (N de NO ₃)	0,70	43,40
Nitrito (N de NO ₂)		



INIA
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO

Jefe Laboratorio Análisis
Ing° JORGE CANHUA ROJAS
SALCEDO

Clasificación Riverside: C4S2
R.A.S: Agua no recomendable a dudosa. Aguas utilizables con cierta precaución por ser agua estancada se recomienda drenar si es pozo
S.C.R: Agua no recomendable
Tipo de Agua: Muy Dura.
Diagnóstico y Recomendaciones (Normas de L.V. Wilcox, Diagrama): Agua Dudosa a no válida.

www.inia.gob.pe
Rinconada de Salcedo s/n
Puno. Puno. Perú
T: (051)363-812



MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA-INIA
SERVICIO NACIONAL DE LABORATORIOS
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
ANEXO SALCEDO
Of. Principal: Av. La Molina 1981 - La Molina Lima



CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE AGUA

Análisis N°: 1184
Fecha de Entrada: 04 de Mayo del 2018
Fecha de Certificación: 07 de Mayo del 2018
Sistema de Riego:

Localización: M-4 MARITHA APAZA PINO

Determinaciones		
pH	7,16	
C.E.	0,267	25*(mS/cm)
Sales Totales	92,00	(mg/l)
Dureza Total	14,52	CaCO ₃ (G.H.F.)
Alcalinidad total	120,00	CaCO ₃
R.A.S.	3,70	
S.C.R.	0,92	
Índice de Scott		
Boro		(ppm)
CACIONES	meq/l	mg/l
Calcio	1,94	38,87
Magnesio	0,96	11,67
Potasio	2,60	101,66
Sodio	4,60	105,80
TOTAL	10,10	
ANIONES	meq/l	mg/l
Cloruros	1,80	63,82
Sulfatos	1,29	61,95
Carbonatos	0,00	0,00
Bicarbonatos	0,06	3,66
TOTAL	3,15	

Representación grafica	Muy baja	Bajo	Normal	Alto	Muy alto
pH	_____				
C.E.	_____				
Sales Totales	_____				
Dureza Total	_____				
R.A.S.	_____				
S.C.R.	_____				
Índice de Scott	_____				
Boro	_____				
Sodio	_____				
Nitratos	_____				
Cloruros	_____				
Bicarbonatos	_____				

Otras Determinaciones	Resultado	
	meq/l	mg/l
Nitratos (N de NO ₃)	1,40	102,03
Nitrito (N de NO ₂)		



ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO

Ing. JORGE PANIHUA ROJAS
Jefe Laboratorio Análisis

Clasificación Riverside: C2S1
R.A.S: Agua recomendable a aceptable.
S.C.R: Agua recomendable.
Tipo de Agua: Semi Blanda.
Diagnóstico y Recomendaciones (Normas de L.V. Wilcox, Diagrama): Agua de Excelente a Buena.

www.inia.gob.pe

Rinconada de Salcedo s/n
Puno. Puno. Perú
T: (051)363-812



MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA-INIA
SERVICIO NACIONAL DE LABORATORIOS
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
ANEXO SALCEDO
Of. Principal: Av. La Molina 1981 - La Molina Lima



CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE AGUA

Análisis N°: 1185
Fecha de Entrada: 04 de Mayo del 2018
Fecha de Certificación: 07 de Mayo del 2018
Sistema de Riego:

Localización: M-5 MARITHZA APAZA PINO

Determinaciones		
pH	7,41	
C.E.	0,299	25'(mS/cm)
Sales Totales	103,00	(mg/l)
Dureza Total	21,53	CaCO ₃ (G.H.F.)
Alcalinidad total	40,00	CaCO ₃
R.A.S.	6,00	
S.C.R.	0,14	
Índice de Scott		
Boro		(ppm)
CATIONES	meq/l	mg/l
Calcio	2,24	44,88
Magnesio	2,06	25,04
Potasio	20,20	789,82
Sodio	8,80	202,40
TOTAL	33,30	
ANIONES	meq/l	mg/l
Cloruros	2,60	92,19
Sulfatos	1,02	48,99
Carbonatos	0,00	0,00
Bicarbonatos	0,04	2,44
TOTAL	3,66	

Representación grafica	Muy baja	Bajo	Normal	Alto	Muy alto
pH	_____				
C.E.	_____				
Sales Totales	_____				
Dureza Total	_____				
R.A.S.	_____				
S.C.R.	_____				
Índice de Scott	_____				
Boro	_____				
Sodio	_____				
Nitratos	_____				
Cloruros	_____				
Bicarbonatos	_____				

Otras Determinaciones	Resultado	
	meq/l	mg/l
Nitratos (N de NO ₃)	1,40	85,80
Nitrito (N de NO ₂)		



INIA
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
Ing° JORGE CARRERA ROJAS
Jefe Laboratorio Análisis
SALCEDO

Clasificación Riverside: C2S1
R.A.S: Agua poco recomendable a aceptable.
S.C.R: Agua recomendable.
Tipo de Agua: Semi Blanda.
Diagnóstico y Recomendaciones (Normas de L.V. Wilcox, Diagrama): Agua de Excelente a Buena.

www.inia.gob.pe

Rinconada de Salcedo s/n
Puno. Puno. Perú
T: (051)363-812



MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA-INIA
SERVICIO NACIONAL DE LABORATORIOS
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
ANEXO SALCEDO
Of. Principal: Av. La Molina 1981 - La Molina Lima



CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE AGUA

Análisis N°: 1186
Fecha de Entrada: 04 de Mayo del 2018
Fecha de Certificación: 07 de Mayo del 2018
Sistema de Riego:

Localización: M-6 MARITHA APAZA PINO

Determinaciones		
pH	7,11	
C.E.	0,267	25*(mS/cm)
Sales Totales	92,00	(mg/l)
Dureza Total	18,83	CaCO ₃ (G.H.F.)
Alcalinidad total	218,00	CaCO ₃
R.A.S.	4,95	
S.C.R.	3,74	
Índice de Scott		
Boro		(ppm)
CATIONES	meq/l	mg/l
Calcio	2,30	460,92
Magnesio	1,46	17,75
Potasio	9,10	355,81
Sodio	6,80	156,40
TOTAL	12,86	
ANIONES	meq/l	mg/l
Cloruros	0,90	31,91
Sulfatos	1,33	63,87
Carbonatos	0,00	0,00
Bicarbonatos	0,02	1,22
TOTAL	2,25	

Representación grafica	Muy baja	Bajo	Normal	Alto	Muy alto
pH					
C.E.					
Sales Totales					
Dureza Total					
R.A.S.					
S.C.R.					
Índice de Scott					
Boro					
Sodio					
Nitratos					
Cloruros					
Bicarbonatos					

Otras Determinaciones	Resultado	
	meq/l	mg/l
Nitratos (N de NO ₃)	1,40	87,80
Nitrito (N de NO ₂)		



INIA
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
Ing° JORGE CANIHUA ROJAS
Jefe Laboratorio Análisis
SALCEDO

Clasificación Riverside: C2S1
R.A.S: Agua recomendable a aceptable.
S.C.R: Agua no recomendable
Tipo de Agua: Semi Blanda.
Diagnóstico y Recomendaciones (Normas de L.V. Wilcox, Diagrama): Agua de Excelente a Buena.

www.inia.gob.pe
Rinconada de Salcedo s/n
Puno. Puno. Perú
T: (051)363-812



MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA-INIA
SERVICIO NACIONAL DE LABORATORIOS
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
ANEXO SALCEDO
Of. Principal: Av. La Molina 1981 - La Molina Lima



CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE AGUA

Análisis N°: 1187
Fecha de Entrada: 04 de Mayo del 2018
Fecha de Certificación: 07 de Mayo del 2018
Sistema de Riego:

Localización: M-7 MARITHZA APAZA PINO

Determinaciones		
pH	7,21	
C.E.	0,265	25*(mS/cm)
Sales Totales	91,00	(mg/l)
Dureza Total	18,83	CaCO ₃ (G.H.F.)
Alcalinidad total	218,00	CaCO ₃
R.A.S.	4,95	
S.C.R.	3,74	
Índice de Scott		
Boro		(ppm)
CATIONES	meq/l	mg/l
Calcio	2,30	460,92
Magnesio	1,46	17,75
Potasio	9,10	355,81
Sodio	6,80	156,40
TOTAL	12,86	
ANIONES	meq/l	mg/l
Cloruros	0,90	31,91
Sulfatos	1,33	63,87
Carbonatos	0,00	0,00
Bicarbonatos	0,02	1,22
TOTAL	2,25	

Representación grafica	Muy baja	Bajo	Normal	Alto	Muy alto
pH					
C.E.					
Sales Totales					
Dureza Total					
R.A.S.					
S.C.R.					
Índice de Scott					
Boro					
Sodio					
Nitratos					
Cloruros					
Bicarbonatos					

Otras Determinaciones	Resultado	
	meq/l	mg/l
Nitratos (N de NO ₃)	1,40	86,80
Nitrito (N de NO ₂)		



INIA
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO

Ing° JORGE CANIHUA ROJAS
Jefe Laboratorio Análisis
SALCEDO

Clasificación Riverside: C2S1
R.A.S: Agua recomendable a aceptable.
S.C.R: Agua no recomendable
Tipo de Agua: Semi Blanda.
Diagnóstico y Recomendaciones (Normas de L.V. Wilcox, Diagrama): Agua de Excelente a Buena.

www.inia.gob.pe

Rinconada de Salcedo s/n
Puno. Puno. Perú
T: (051)363-812



MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA-INIA
SERVICIO NACIONAL DE LABORATORIOS
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
ANEXO SALCEDO
Of. Principal: Av. La Molina 1981 - La Molina Lima



CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE AGUA

Análisis N°: 1188
Fecha de Entrada: 04 de Mayo del 2018
Fecha de Certificación: 07 de Mayo del 2018
Sistema de Riego:

Localización: M-8 MARITHA APAZA PINO

Determinaciones		
pH	7,94	
C.E.	0,242	25*(mS/cm)
Sales Totales	84,00	(mg/l)
Dureza Total	15,72	CaCO ₃ (G.H.F.)
Alcalinidad total	20,00	CaCO ₃
R.A.S.	5,02	
S.C.R.	0,00	
Índice de Scott		
Boro		(ppm)
CACIONES	meq/l	mg/l
Calcio	1,56	31,26
Magnesio	1,58	19,21
Potasio	20,20	789,82
Sodio	6,30	144,90
TOTAL	29,64	
ANIONES	meq/l	mg/l
Cloruros	0,90	31,91
Sulfatos	1,52	73,00
Carbonatos	0,00	0,00
Bicarbonatos	0,02	1,22
TOTAL	2,44	

Representación grafica	Muy baja	Bajo	Normal	Alto	Muy alto
pH					
C.E.					
Sales Totales					
Dureza Total					
R.A.S.					
S.C.R.					
Índice de Scott					
Boro					
Sodio					
Nitratos					
Cloruros					
Bicarbonatos					

Otras Determinaciones	Resultado	
	meq/l	mg/l
Nitratos (N de NO ₃)	1,00	63,00
Nitrito (N de NO ₂)		



INIA
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
Ing° JORGE CANIHUA ROJAS
Jefe Laboratorio Análisis
SALCEDO

Clasificación Riverside: C2S1
R.A.S: Agua de buena calidad a aceptable.
S.C.R: Agua poco recomendable a aceptable
Tipo de Agua: Semi Blanda.
Diagnóstico y Recomendaciones (Normas de L.V. Wilcox, Diagrama): Agua de Excelente a Buena.

www.inia.gob.pe
Rinconada de Salcedo s/n
Puno. Puno. Perú
T: (051)363-812



MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACION AGRARIA-INIA
SERVICIO NACIONAL DE LABORATORIOS
ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO
ANEXO SALCEDO
Of. Principal: Av. La Molina 1981 - La Molina Lima



CERTIFICADO DE ANÁLISIS DE AGUA

Análisis N°: 1189
Fecha de Entrada: 04 de Mayo del 2018
Fecha de Certificación: 07 de Mayo del 2018
Sistema de Riego:

Localización: M-9 MARITHZA APAZA PINO

Determinaciones		
pH	7,24	
C.E.	0,267	25*(mS/cm)
Sales Totales	92,00	(mg/l)
Dureza Total	14,52	CaCO ₃ (G.H.F.)
Alcalinidad total	120,00	CaCO ₃
R.A.S.	3,70	
S.C.R.	0,92	
Índice de Scott		
Boro		(ppm)
CACIONES	meq/l	mg/l
Calcio	1,94	38,87
Magnesio	0,96	11,67
Potasio	2,60	101,66
Sodio	4,60	105,80
TOTAL	10,10	
ANIONES	meq/l	mg/l
Cloruros	1,80	63,82
Sulfatos	1,29	61,95
Carbonatos	0,00	0,00
Bicarbonatos	0,06	3,66
TOTAL	3,15	

Representación grafica	Muy baja	Bajo	Normal	Alto	Muy alto
pH	_____				
C.E.	_____				
Sales Totales	_____				
Dureza Total	_____				
R.A.S.	_____				
S.C.R.	_____				
Índice de Scott	_____				
Boro	_____				
Sodio	_____				
Nitratos	_____				
Cloruros	_____				
Bicarbonatos	_____				

Otras Determinaciones	Resultado	
	meq/l	mg/l
Nitratos (N de NO ₃)	1,40	83,80
Nitrito (N de NO ₂)		



ESTACION EXPERIMENTAL ILLPA - PUNO

Ing° JORGE SANHUA ROJAS
Jefe Laboratorio Análisis
SALCEDO

Clasificación Riverside: C2S1
R.A.S: Agua recomendable a aceptable.
S.C.R: Agua recomendable.
Tipo de Agua: Semi Blanda.
Diagnóstico y Recomendaciones (Normas de L.V. Wilcox, Diagrama): Agua de Excelente a Buena.

www.inia.gob.pe
Rinconada de Salcedo s/n
Puno. Puno. Perú
T: (051)363-812

ANEXO H: Estándares de Calidad de Agua

Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
FÍSICOS- QUÍMICOS				
Aceites y Grasas	mg/L	5		10
Bicarbonatos	mg/L	518		**
Cianuro Wad	mg/L	0,1		0,1
Cloruros	mg/L	500		**
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	100 (a)		100 (a)
Conductividad	(μ S/cm)	2 500		5 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	15		15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	40		40
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,2		0,5
Fenoles	mg/L	0,002		0,01
Fluoruros	mg/L	1		**
Nitratos (NO ₃ -N) + Nitritos (NO ₂ -N)	mg/L	100		100
Nitritos (NO ₂ -N)	mg/L	10		10
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4		≥ 5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5		6,5 – 8,4
Sulfatos	mg/L	1 000		1 000
Temperatura	°C	Δ 3		Δ 3

ANEXO I: PANEL FOTOGRAFICO



FOTOGRAFIA N° 1	COMENTARIO: Control de nivel freático de pozo, ubicado en la Zona Alta de la microcuenca
EVENTO: Salida de campo	
LUGAR: Microcuenca Jayllihaya-pozo N°07	



FOTOGRAFIA N° 2	COMENTARIO: Control de nivel freático de pozo, ubicado en la Zona media de la microcuenca
EVENTO: Salida de campo	
LUGAR: Microcuenca Jayllihaya-pozo N°12	



FOTOGRAFIA N° 3

EVENTO: Salida de campo

LUGAR: Microcuenca Jayllihaya-pozo N°03

COMENTARIO: Toma de muestra de agua, pozo ubicado en la zona alta de la microcuenca.



FOTOGRAFIA N° 4

EVENTO: Salida de campo

LUGAR: Microcuenca Jayllihaya-pozo N°06

COMENTARIO: Toma de muestra de agua, pozo ubicado en la Zona media de la microcuenca



FOTOGRAFIA N° 5

EVENTO: Salida de campo

LUGAR: Microcuenca Jayllihaya-pozo N°19

COMENTARIO:Control del nivel freático, pozo ubicado en la Zona baja de la microcuenca



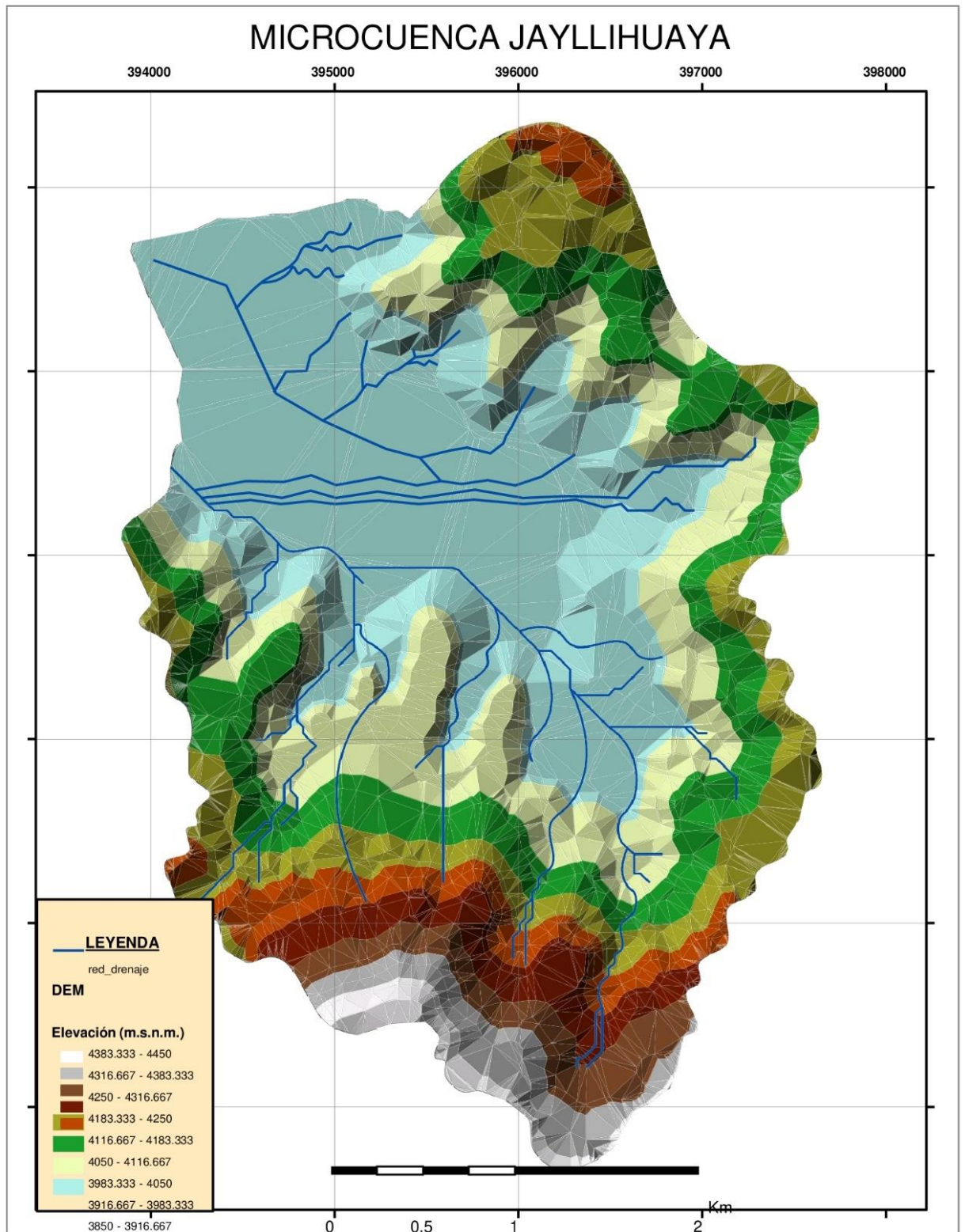
FOTOGRAFIA N° 6

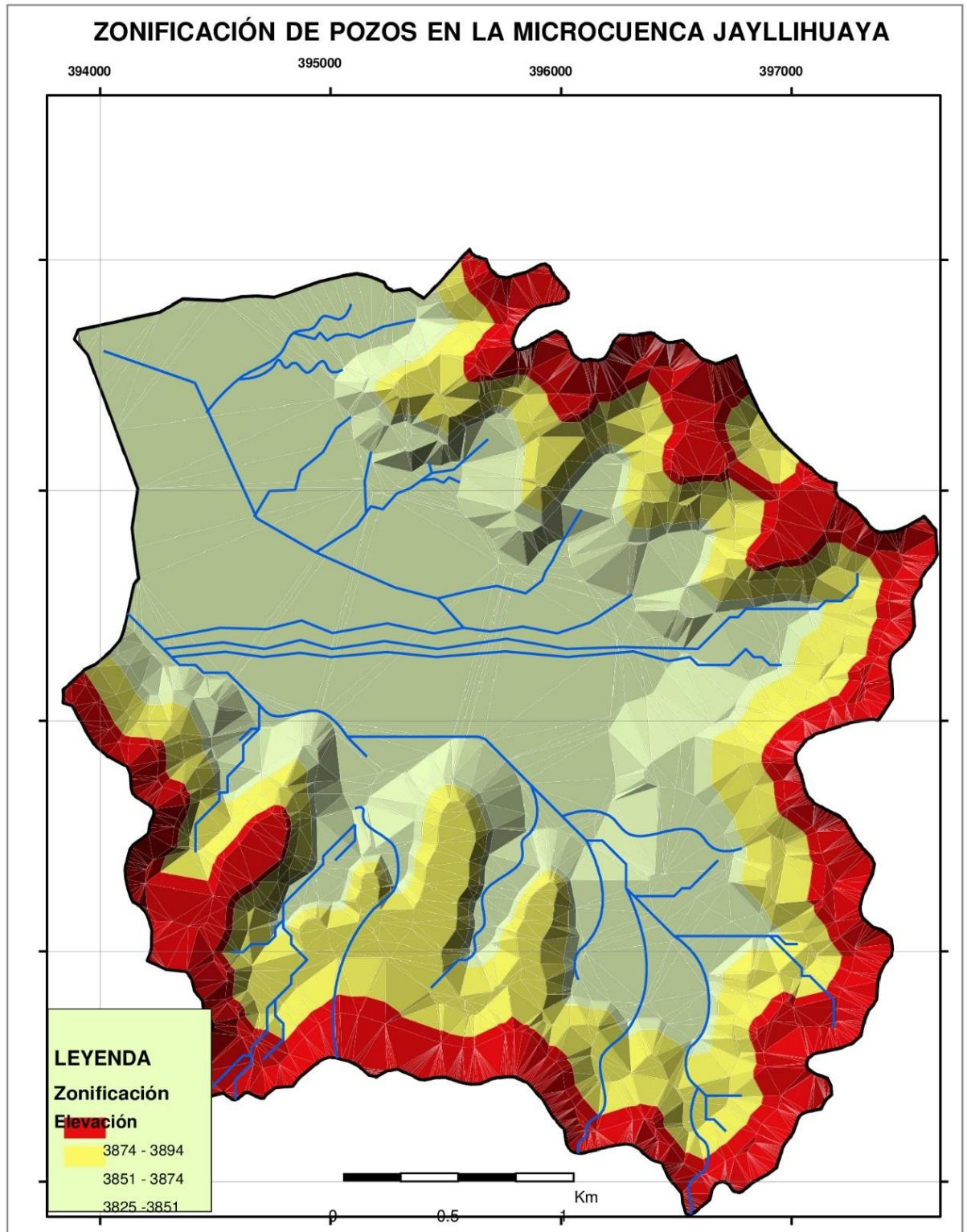
EVENTO: Salida de campo

LUGAR: Microcuenca Jayllihaya-pozo N°17

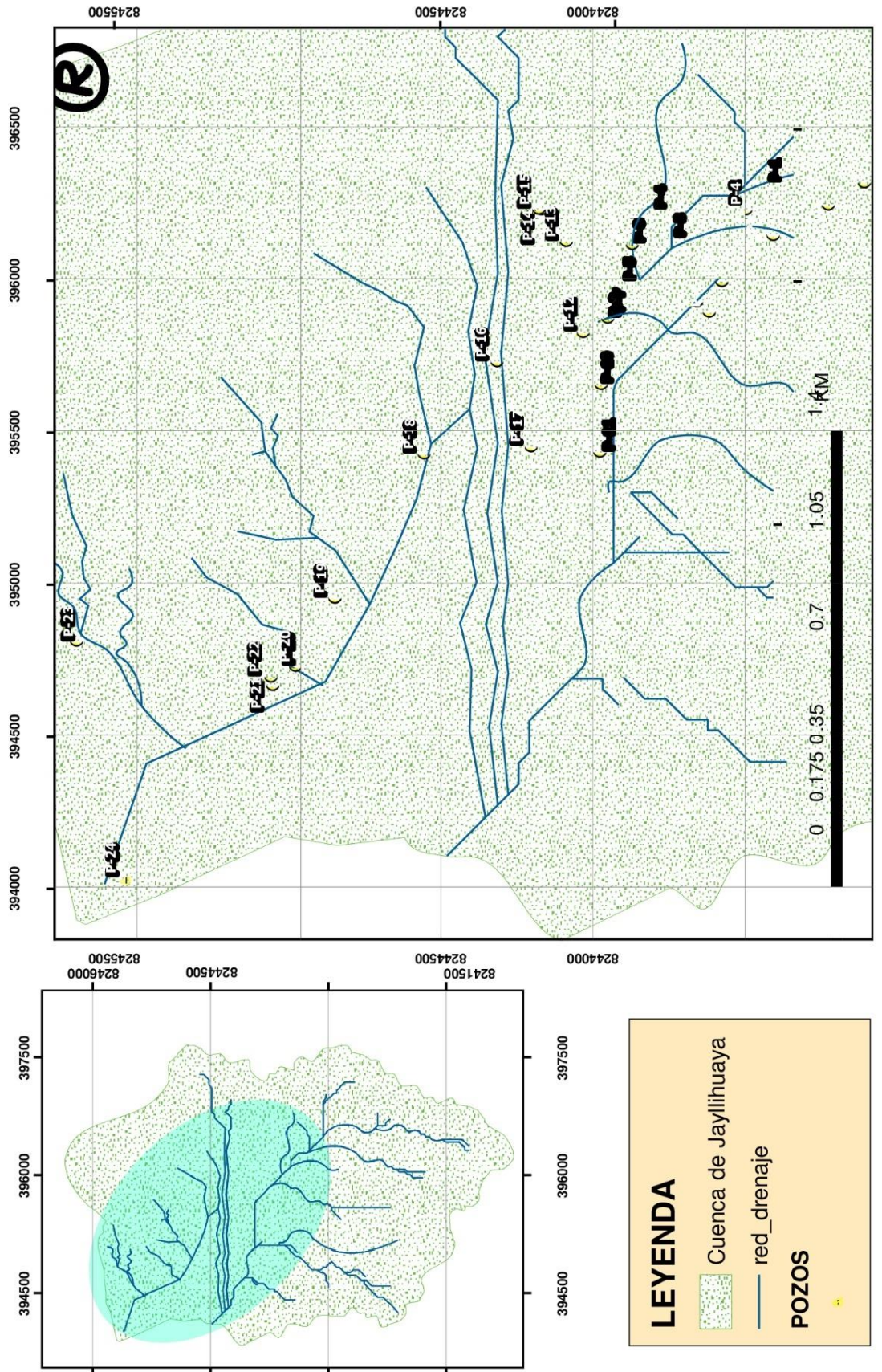
COMENTARIO:Control del nivel freático en época de estiaje, pozo ubicado en la Zona media de la microcuenca

ANEXO J: MAPAS

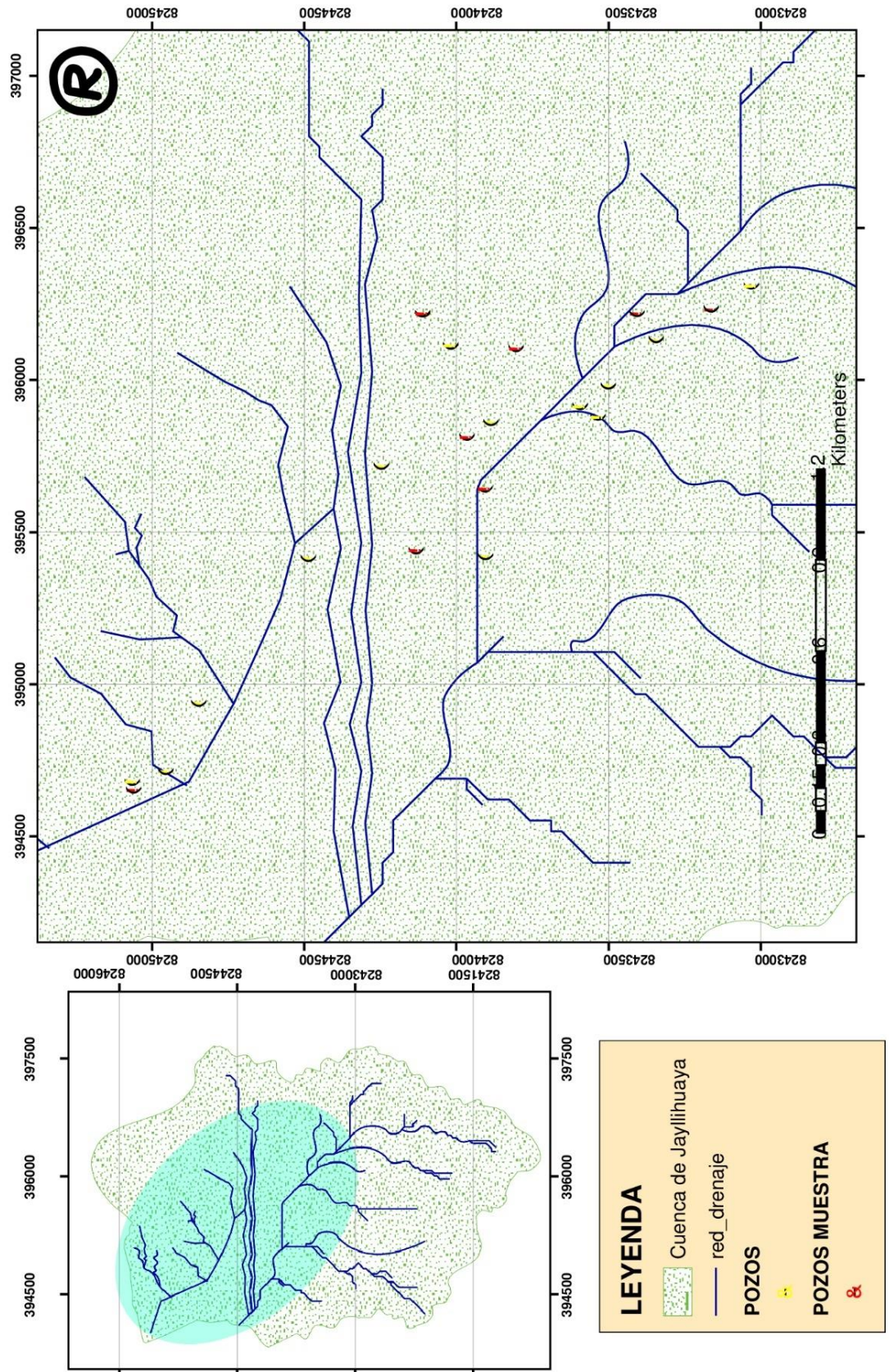




MAPA I.2: UBICACIÓN DE POZOS EN LA MICROCUENCA JAYLLIHUAYA



MAPA I.4: UBICACIÓN DE POZOS MUESTRA EN LA MICROCUENCA JAYLLIHUAYA





DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo MARITZA SPAZA PINO,
identificado con DNI 47120955 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERIA AGRÍCOLA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
“DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO DE CONTAMINACIÓN
DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA MICROCUENCA JAYLLI HUAYA -
PUNO 2018.”

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 11 de DICIEMBRE del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo MARITZA APOZA PISO
identificado con DNI 47120955 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA AGRÍCOLA
informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA MICROCUENCA JAYLLIHUAYA-PUNO 2018 ”

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 11 de DICIEMBRE del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella