



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Titulación: Grado en Ciencias Ambientales

Título del trabajo: Evolución histórica y espacial de las características de las aguas de abastecimiento de Used, Zaragoza.

English title: Historical and spatial evolution of the characteristics of the drinking water supply in Used, Zaragoza.

Autor/es

Lorién Barcos Abanto

Director/es

Jesús Antonio Causapé Valenzuela

Natividad Miguel Salcedo

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Año 2025



AGRADECIMIENTOS

Quería agradecer la contribución de la analista Nadia Larumbe encargada de realizar los análisis de *E. coli*, así como su ayuda a lo largo de los periodos de análisis en laboratorio. Por otra parte agradecer al IPE por su implicación en otros análisis realizados para lograr los objetivos deseados.



Universidad de Zaragoza
Escuela Politécnica Superior de Huesca
Grado en Ciencias Ambientales

DECLARACIÓN RESPONSABLE DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

Yo, D. Lorién Barcos Abanto, con DNI/NIE 73162483N, estudiante del Grado en Ciencias Ambientales de la Escuela Politécnica Superior de Huesca de la Universidad de Zaragoza, DECLARO bajo mi responsabilidad que el Trabajo Fin de Grado titulado «Evolución histórica y espacial de las características de las aguas de abastecimiento de Used, Zaragoza» que presento para su exposición y defensa es original y que todas las fuentes utilizadas han sido debidamente citadas y referenciadas.

Asimismo, declaro que el trabajo no ha sido presentado previamente para la obtención de otro título o evaluación académica y que cumple con la normativa vigente de Trabajos Fin de Estudio de la EPS de Huesca y de la Universidad de Zaragoza.

En Huesca, a 11 de Noviembre de 2025.

Firma del/de la estudiante:

Lorién Barcos Abanto a 24 de Noviembre de 2025.



Evolución histórica y espacial de las características de las aguas de abastecimiento de Used, Zaragoza.

RESUMEN:

Este Trabajo Fin de Grado analiza la evolución histórica y espacial de la calidad del agua de abastecimiento en Used (Zaragoza) mediante dos campañas de muestreo (08/08/2024 y 25/09/2024) y análisis de pH, Conductividad Eléctrica (CE) a 25°C, Sólidos Disueltos Totales (SDT), Sólidos Suspendedos Totales (SST), Materia Orgánica (MO), Carbonatos (CO_3^{2-}), Bicarbonatos (HCO_3^-), Sulfatos (SO_4^{2-}), Cloruros (Cl^-), Nitratos (NO_3^-), Nitritos (NO_2^-), Fosfatos (PO_4^{3-}), Fluoruros (F⁻), Bromuros (Br⁻), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na), Potasio (K), Amonio (NH_4^+). En el primer muestreo se añadió la determinación de *E. coli*. Como parámetro microbiológico. Los resultados se procesan con INAQUAS V1 (IGME), diagramas Piper/Stiff, relaciones iónicas, índices de D'Amore y de Cambio de Bases, y se contrasta con el Real Decreto 3/2023 por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y su suministro. Predominan facies bicarbonatadas cálcicas con vulnerabilidades locales: Pozo Casa presenta nitratos superiores al valor paramétrico, cloruros elevados y señal de aporte agrario; Pozo Cuartel registra contaminación fecal. El resto de las captaciones cumplen los parámetros determinantes. Para riego, todas las aguas son aptas (RAS y %Na bajos; Wilcox excelente-buena), con manejo puntual de salinidad en Pozo Casa. La variabilidad post-evento exige gestión adaptativa: Plan de Seguridad del Agua con triggers tras lluvia, protección perimetral de captaciones, ajuste agronómico (N/K), tratamiento específico (desnitrificación/ósmosis) y mezclas controladas, aportando hoja de ruta reproducible para reducir riesgo sanitario y mejorar la resiliencia del abastecimiento local.

Palabras clave: Calidad del agua; RD 3/2023; nitratos; intercambio catiónico; Plan de Seguridad del Agua; Wilcox.



Historical and spatial evolution of the characteristics of the supply water of Used, Zaragoza.

ABSTRACT:

This Final Degree Project analyses the historical and spatial evolution of the quality of the drinking water supply in Used (Zaragoza) through two sampling campaigns (08/08/2024 and 25/09/2024) and the analysis of pH, Electrical Conductivity (EC) at 25 °C, Total Dissolved Solids (TDS), Total Suspended Solids (TSS), Organic Matter (OM), Carbonate (CO_3^{2-}), Bicarbonate (HCO_3^-), Sulphate (SO_4^{2-}), Chloride (Cl^-), Nitrate (NO_3^-), Nitrite (NO_2^-), Phosphate (PO_4^{3-}), Fluoride (F^-), Bromide (Br^-), Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Sodium (Na^+), Potassium (K^+), and Ammonium (NH_4^+). In the first sampling campaign, the determination of *E. coli* was added as the main microbiological parameter. The results are processed using *INAQUAS V1* (IGME), Piper/Stiff diagrams, ionic ratios, D'Amore indices, and the Base Exchange Index, and are compared with Royal Decree 3/2023, which establishes the technical and sanitary criteria for drinking water quality, its monitoring and supply. Calcium–bicarbonate facies predominate, with local vulnerabilities: Casa well shows nitrates above the parametric value, elevated chlorides and evidence of agricultural inputs; Cuartel well records faecal contamination. The remaining abstraction points comply with the determinant parameters. For irrigation, all waters are suitable (low SAR and %Na; Wilcox excellent–good), with specific salinity management at Casa well. Post-event variability requires adaptive management: a Water Safety Plan with rainfall *triggers*, perimeter protection of abstraction points, agronomic adjustment (N/K), specific treatment (denitrification/osmosis) and controlled mixing, providing a reproducible roadmap to reduce health risk and improve the resilience of the local water supply.

Keywords: Water quality; Royal Decree 3/2023; nitrates; cation exchange; Water Safety Plan; Wilcox.



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	8
2. OBJETIVO.....	11
3. ÁREA DE ESTUDIO.....	12
4. METODOLOGÍA.....	14
4.1. Análisis e identificación de los puntos de abastecimiento históricos y actuales.....	14
4.2. Recogida de muestras de agua.....	15
4.2.1. Preparación previa al muestreo.....	15
4.2.2. Procedimiento in situ.....	15
4.2.3. Conservación, transporte y procesos posteriores.....	16
4.3. Determinaciones analíticas.....	21
4.3.1. Determinación de Escherichia coli.....	21
4.3.2. Determinación de pH.....	22
4.3.3. Determinación de Conductividad Eléctrica (CE) a 25°C.....	22
4.3.4. Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	22
4.3.5. Determinación de Materia Orgánica (MO).....	23
4.3.6. Determinación de Sólidos Disueltos Totales (SDT).....	23
4.3.7. Determinación de Iones Disueltos.....	23
4.4. Análisis de datos.....	24
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
5.1. Resultados del análisis de los parámetros físico-químicos.....	25
5.3. Comparación datos obtenidos con legislación vigente.....	29
5.4. Caracterización de aguas.....	36
5.4.1. Caracterización de aguas: Diagrama de Piper.....	36
5.5. Resultados del análisis hidroquímico de INAQUAS V1; índices hidroquímicos y facies.....	38
5.5.1. Balance iónico.....	38
5.5.2. Índices D'Amore.....	40
5.5.3. Relaciones iónicas entre compuestos.....	42
5.5.4. Índice de Cambio de Bases (ICB).....	44
5.5.5. Sólidos Totales Disueltos (TSD).....	46
5.5.6. Dureza mg/L de CaCO ₃	47
5.6. Clasificación de aguas para consumo humano.....	49
5.7. Clasificación de aguas para uso agrícola.....	51
5.7.1. Diagrama de Wilcox.....	53
5.8. Comparativa de los parámetros analizados en las diferentes campañas de muestreo.....	54



6. CONCLUSIONES.....	57
6.1. Conclusión hidrogeoquímica: procesos que gobiernan la calidad	57
6.2. Conclusión normativa y de salud pública: qué fuentes sirven hoy y por qué	58
6.3. Variabilidad y cambio climático: riesgos emergentes y respuesta	59
6.4. Evaluación sanitaria integrada y medidas correctoras/preventivas	60
6.5. Buenas prácticas y Plan de Seguridad del Agua (PSA)	61
6.6. Transferibilidad, limitaciones y próximos pasos	62
7. REFERENCIAS	63
8. ANEXOS	66
ANEXO I- Fotografías de campo de los puntos de captación y toma de muestras.....	66
ANEXO II- Protocolos seguidos en el muestreo y fichas de campo.....	70
ANEXO III- Ejemplo de aplicación del programa INAQUAS V1	78
ANEXO IV- Comparativa legal entre RD 3/2023 y RD 140/2003.....	82
ANEXO V- Clasificación de aguas según su aptitud para consumo humano y riego	83

1. INTRODUCCIÓN

El agua potable segura y el saneamiento son fundamentales para la salud humana, el medio ambiente y el desarrollo sostenible (Naciones Unidas, s.f.-a). Sin embargo, en 2022, aproximadamente 2.200 millones de personas carecían de servicios de agua potable gestionados de forma segura, y más de 3.500 millones no disponían de servicios de saneamiento adecuados (UNESCO, 2023). La Organización Mundial de la Salud (OMS) advierte que el consumo de agua contaminada y la falta de saneamiento contribuyen significativamente a la propagación de enfermedades como el cólera, la disentería y la fiebre tifoidea, causando cerca de un millón de muertes anuales (OMS, 2022).

En Europa continúa la preocupación. La Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) señala que aproximadamente una cuarta parte de las aguas subterráneas de la Unión Europea presentan contaminación química, y cerca del 10% están sujetas a una extracción insostenible (AEMA, 2023). Por otro lado, la situación actual del Cambio Climático está exacerbando los retos relativos al agua, aumenta la intensidad y frecuencia de las sequías, así como de las inundaciones, lo que repercute directamente en la disponibilidad y calidad del recurso (ONU, 2022).

La correcta gestión de los recursos hídricos es crucial en este contexto. Tratamientos como la potabilización, esencial para el consumo, no asegura la completa eliminación de los contaminantes, sobre todo, cuando los puntos de extracción están comprometidos. Las largas temporadas de sequía reducen los niveles freáticos, concentrando los contaminantes. Así, la dependencia de un único punto de abastecimiento multiplica la vulnerabilidad de las poblaciones ante casos de contaminación o posibles fallos (UNESCO, 2024).

El municipio de Used, en Zaragoza, no es ajeno a esta problemática. Entender y comprender la evolución histórica y espacial de las características de las aguas de abastecimiento y la red de distribución de esta, es de suma importancia para asegurar la seguridad hídrica de la población, planificando medidas y estrategias de adaptación frente a las nuevas necesidades y cambio climático. En este estudio se analiza y compara los factores y patrones que influyen en la calidad del agua, con el deseo de proporcionar información valiosa, que sirva de base para una gestión sostenible del recurso en toda la zona.

Used alberga hoy en día un total de 5 puntos de extracción de agua históricos, estos han ido evolucionando, acaeciendo el desuso de unos y la creación de otros a lo largo de los años. Con la puesta en marcha de la obra de construcción de la red de distribución, los habitantes de Used obtuvieron más opciones y facilidades de acceso al agua. Como todo, la red de abastecimiento ha ido evolucionando según las necesidades y los avances técnicos y tecnológicos; pero ¿quién concibe hoy en día la vida sin agua corriente?

Estudiar la evolución histórica de su extracción y distribución va a aportar una visión más amplia de las necesidades locales en una escala temporal. De esta manera, se logrará entender la lógica que se aplica hoy en día en Used a la hora de cambiar el punto de extracción de agua según las necesidades de la población y las condiciones climáticas cambiantes.

Una caracterización total de las aguas de abastecimiento ayudará a comprender mejor las características del recurso, por medio del análisis de distintas variables físico-químicas y microbiológicas. Se analizará los posibles riesgos que, según la composición de cada tipo de agua, pueden afectar al municipio, tanto para consumo humano como para cualquier consumo, la agricultura, por ejemplo.

No se tiene constancia de estudios previos en esta área, por ello, este proyecto trata de cubrir un servicio para el municipio y aportar información de calidad para sus habitantes.

La despoblación es la mayor preocupación actual en todo el municipio, la precariedad de los servicios y control sobre el agua son dos de las múltiples consecuencias de esta problemática.



Este proyecto enmarca claramente distintos puntos de la agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, establecida por la Asamblea General de las Naciones Unidas de 2015, con especial énfasis en cuatro Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y sus metas específicas, subrayando la importancia de la gestión responsable, equitativa y adaptativa del consumo de agua en el contexto actual con los desafíos ambientales existentes.

El ODS 6: Agua limpia y saneamiento, enmarca la mayor parte. Este objetivo busca garantizar la disponibilidad de agua y la gestión sostenible para todo el mundo. El estudio de las características fisicoquímicas de las aguas y su evolución histórica tiene como meta aportar información técnica y local que respalde las decisiones relacionadas con la mejora continua de la calidad del agua y de la seguridad de su abastecimiento (Naciones Unidas, s.f.-a).

Meta 6.1: Lograr el acceso universal y equitativo al agua potable segura y asequible.
Meta 6.3: Mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, la eliminación del vertido y la minimización de la emisión de productos químicos peligrosos.
Meta 6.6: Proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos acuíferos y zonas de recarga.

En segundo lugar, el ODS 13: Acción por el clima, directamente relacionado con los fenómenos climáticos extremos, como las sequías prolongadas, cada vez más frecuentes por causa del Cambio Climático. Estas han influido y siguen influyendo en la disponibilidad y calidad de agua subterránea almacenada en acuíferos, cuyo nivel freático disminuye en gran medida cuando se da este suceso. Estudiar la evolución temporal de las diferentes fuentes de abastecimiento nos permite identificar vulnerabilidades y amenazas climáticas con el fin de proponer medidas de adaptación local, alineándose así, con las metas de este objetivo (Naciones Unidas, s.f.-b).

Meta 13.1: Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima.
Meta 13.3: Mejorar la educación y la concienciación sobre mitigación y adaptación al cambio climático a escala local.

Por otra parte, el ODS 3: Salud y Bienestar involucra el presente estudio, siendo el acceso seguro al agua de calidad un factor determinante en la salud pública. El análisis de las características de composición del agua y los posibles riesgos que puede conllevar a su consumo deficiente puede prevenir enfermedades provocadas por la baja calidad del agua, contribuyendo así a mejorar la calidad de vida de la población (Naciones Unidas, s.f.-c).

Meta 3.9: Reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades causadas por productos químicos peligrosos y por la contaminación del aire, el agua y el suelo.

Finalmente, el ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles, considera la oportunidad de optar a múltiples puntos de abastecimiento y de poseer una estructura hídrica resiliente, que garantiza el suministro en un contexto de presiones ambientales y sociales que no cesan de crecer. La dualidad funcional que integra la visión territorial y comunitaria del recurso impulsa la construcción de municipios más inclusivos, sostenibles y seguros (Naciones Unidas, s.f.-d).

Meta 11.3: Aumentar la urbanización inclusiva y la capacidad de planificación participativa e integrada.
Meta 11.b: Desarrollar y aplicar políticas de gestión del riesgo de desastres y resiliencia local ante fenómenos climáticos extremos.

Además, la evaluación de las aguas de abastecimiento en este proyecto es realizada según los criterios técnico-sanitarios del Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los actuales criterios técnico-sanitarios de la calidad de agua de consumo, su control y suministro en España. Esta normativa deroga el anterior Real Decreto 140/2003 y transcribe la legislación europea "Directiva (UE) 2020/2184" al ámbito nacional, incorporando nuevos parámetros de control y apoyando un enfoque basado en riesgos,



cuyo objetivo es garantizar un agua segura, saludable y accesible para toda la población (Gobierno de España, 2023).

Por todo ello, este estudio no tiene el único objetivo de responder ante una necesidad técnica y local, sino que, contribuye del mismo modo, desde un enfoque científico y aplicado, a la cumplimentación de las metas globales para el bienestar social y la sostenibilidad del medio ambiente.



2. OBJETIVO

El objetivo general de este trabajo es estudiar la evolución que ha tenido el municipio de Used en relación a los puntos de captación de aguas para abastecimiento urbano, tanto temporal como espacial, con el objetivo final de contribuir a la generación de información que sirva para mejorar la gestión del recurso hídrico y a la protección de la salud pública en el municipio de Used.

Para lograr el objetivo general anteriormente mencionado, es necesario desarrollar los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar la evolución histórica y espacial de los puntos de captación en Used.
2. Evaluar la calidad físico-química y microbiológica de las aguas de abastecimiento.
3. Comprobar el grado de cumplimiento normativo respecto al Real Decreto 3/2023 por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y su suministro.
4. Identificar riesgos sanitarios y ambientales asociados a los abastecimientos.
5. Proponer recomendaciones para la gestión sostenible del recurso hídrico.



3. ÁREA DE ESTUDIO

El presente trabajo se desarrolla en el municipio de Used, se sitúa en el sector suroriental de la provincia de Zaragoza. Used forma parte de la comarca del Campo de Daroca y se caracteriza por estar ubicado a pie de la Sierra de Santa Cruz (Sistema Ibérico) y su término municipal (70 km²) se extiende hacia un altiplano a más de 1000 m sobre el nivel del mar donde se desarrolla una agricultura de secano con cultivos de trigo, cebada y girasol.

El clima de Used es característico de un clima de tipo continental semiárido, con largos y fríos inviernos, así como cálidos y secos veranos. La distribución de las precipitaciones es irregular, se concentran en otoño y primavera, oscilando entre los 400 y 500 mm. Las temperaturas extremas de invierno descienden por debajo de los -10 °C, por el contrario, las temperaturas del verano suelen superar los treinta grados centígrados en las horas centrales del día (AEMET, 2025). Esta aridez unida a la gran evapotranspiración potencial junto con los largos episodios de sequía, cada vez más comunes, limita la recarga de acuíferos y hace que la gestión eficiente del agua esté a la orden del día como prioridad ambiental.

Geológicamente hablando, el municipio está asentado sobre materiales del Terciario y del Cuaternario, con una importante presencia de margas, arcillas, yesos y conglomerados. Esta formación litológica impulsa la formación de acuíferos locales de baja permeabilidad, vulnerables a la contaminación y con una limitada capacidad de carga (IGME, s.f.). En segundo lugar, predominan los suelos de tipo pardo calizos, con textura franco-arenosa, baja profundidad y moderado contenido de materia orgánica. Lo que limita su capacidad de retención hídrica, obstaculizando la infiltración de agua hacia los acuíferos tanto como el desarrollo agrícola predominante en su extensión (CHE, 2011).

Este entorno ofrece un especial interés por su diversidad geológica y edafológica, que condiciona directamente la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos subterráneos utilizados de forma histórica para el abastecimiento humano.

Por otra parte, el sistema de abastecimiento de agua potable en Used se ha basado históricamente en acuíferos subterráneos de carácter local, por medio de manantiales y pozos situados en casas particulares. La presencia de suelos con poca capacidad de infiltración unido a la escasa pluviometría confluye en la extremada dificultad de recarga natural de acuíferos. Aparte de esto, la inexistencia de cursos de agua constantes tiene como consecuencia que el agua subterránea tenga un gran peso como fuente potencial de suministro (CHE, 2011).

Según estudios cartográficos elaborados por el Gobierno de Aragón se conoce que Used dispone de varias captaciones históricas, algunas actualmente están en desuso, mientras que a otras se les han aplicado estrategias adaptativas a las normativas sanitarias y medioambientales más recientes. Estos puntos de captura de agua han sido objeto de actuaciones periódicas de mejora de potabilización, almacenamiento y distribución, en especial ante períodos extremos de sequías prolongadas (Gobierno de Aragón, 2015), como se ha comentado con anterioridad.

Esta localidad ha experimentado en las últimas décadas episodios de gran cambio socioeconómico, acentuados por una marcada tendencia a la despoblación, que iniciaba a mediados del siglo XX de forma progresiva hasta la actualidad. Esta evolución de la sociedad ha conllevado cambios en los usos del suelo, derivando a un paisaje fragmentado que inicialmente fue un modelo agrícola extensivo, dejando campos abandonados y una menor presión sobre los recursos hídricos. Por el contrario, una menor presión no implica una menor preocupación, ya que el envejecimiento general de la población y el cambio climático han traído consigo nuevas vulnerabilidades en la gestión del agua (CHE, 2011).

En resumen y desde una perspectiva ambiental, el suelo poco fértil unido con el clima árido, acuíferos frágiles y la presión demográfica en decadencia convierte a Used en el sujeto representativo de los



desafíos que presencian los municipios menores del interior peninsular para garantizar un abastecimiento hídrico sostenible y seguro.

Desde sus inicios, Used ha dependido de manantiales y pozos para el abastecimiento de agua. Se utilizaban fuentes públicas y pequeños pozos excavados en las casas, en ocasiones demasiado cercanos a puntos de vertido (pozos negros). Las limitaciones de estas infraestructuras se tradujeron en un suministro insuficiente y sanitariamente inseguro.

Como respuesta a estas necesidades se llevaron a cabo diferentes proyectos de mejora. En 1928, se construyeron dos fuentes públicas para garantizar el acceso seguro y constante al agua, pero no fue hasta 1956 cuando se acometió la construcción del pozo de las fuentes (Plazas de la Obra, Solanar, los Chatos y Ayuntamiento – década de los 70 la de Barrio Bajo) en el cruce entre carreteras de Torralba y Atea junto a la fuente Vieja, que mejoró la capacidad de extracción y distribución de agua y disminuyó la dependencia a las fuentes naturales.

En 1975, se llevó a cabo el proyecto del agua corriente desde el pozo de la carretera de Atea (poco más arriba del cuartel), una obra clave que permitió la distribución de agua corriente a todas las casas. En la curva de la carretera de Atea se construyó el depósito potabilizador de 250 m³ de capacidad, así como una estación depuradora a las afueras de la localidad (camino Carrazaida), que trataría las aguas residuales para adecuar sus condiciones antes de ser vertidas a la “acequia”.

Tras varios años de sequía, que provocaron un abastecimiento insuficiente, se construyó en 1983 el embalse de las Fuentecillas que con una capacidad de 41.482 m³ se alimenta del barranco de la Almenara. El recrecimiento del mismo en 1987 elevó su capacidad hasta 61.215 m³ convirtiéndolo en un embalse plurianual que permitiese asegurar el suministro.

No obstante, nuevos periodos de sequía y la baja calidad del agua del pantano procedente de escorrentías superficiales con alta turbidez aconsejaron la construcción de los pozos de las Fuentecillas y del Castillo de los que actualmente se abastece el pueblo tras su potabilización en los nuevos depósitos instalados bajo el pantano junto a la carretera de Atea.

Finalmente, en 2008 se construyó una nueva estación depuradora (EDAR) a kilómetro y medio del pueblo siguiendo el camino de Zaida.

4. METODOLOGÍA

4.1. ANÁLISIS E IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS DE ABASTECIMIENTO HISTÓRICOS Y ACTUALES

Se ha realizado una revisión de documentación de proyectos de obra y construcciones realizados a lo largo del tiempo en el municipio de Used, junto con una serie de entrevistas, aproximadamente 8, en las que se preguntaban características de las infraestructuras, antigüedad, comienzo y final de obras, características sobre el proyecto y mejoras a partir de ellas a diferentes habitantes de la localidad.

Ha sido un trabajo arduo de búsqueda de información física en las oficinas y almacén del ayuntamiento de Used, debido a la falta de documentación. La pérdida de los proyectos de obra históricos evocó la necesidad de preguntar cara a cara a los habitantes de esta localidad para conocer cómo han evolucionado temporalmente los puntos de captación utilizados.

De esta manera se llegó a un total de 5 puntos de captación utilizados a lo largo de la vida con agua corriente en el municipio.

A continuación, se muestra en la Figura 1 los diferentes puntos de captación históricos y de interés.

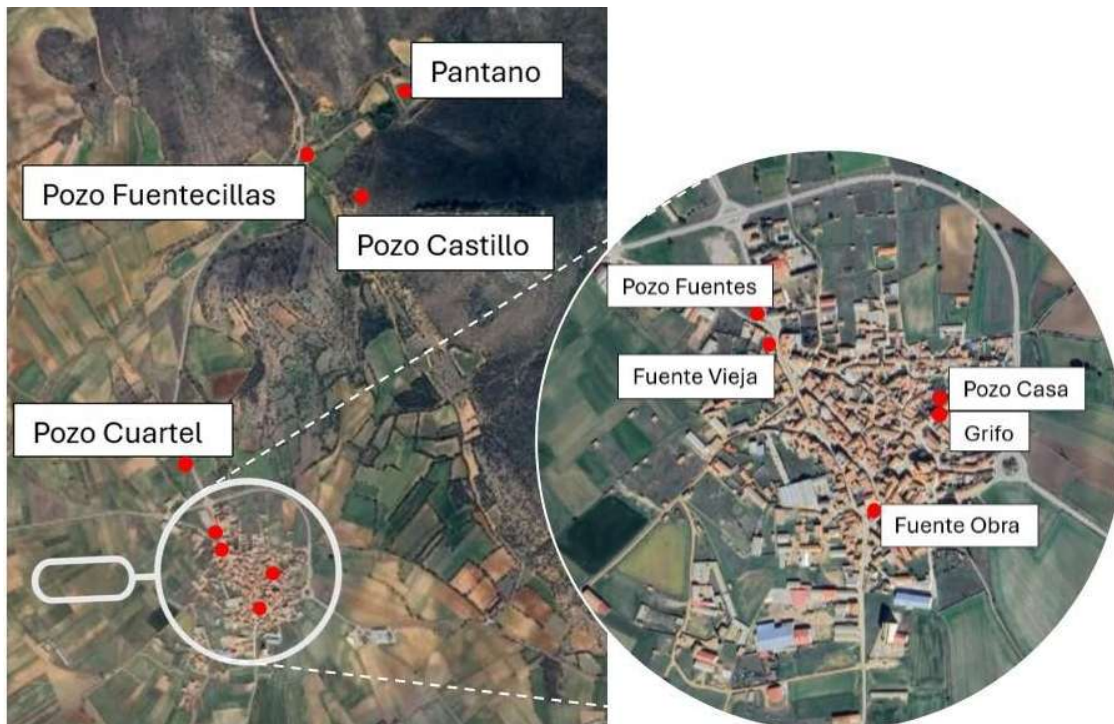


Figura 1. Distribución de los puntos.

4.2. RECOGIDA DE MUESTRAS DE AGUA

Las muestras recogidas corresponden a los puntos de abastecimiento identificados en el anterior apartado. Fueron recogidas los días 08/08/2024 y 25/09/2024.

El procedimiento seguido en la recogida de muestras se realizó siguiendo los criterios definidos en el Real Decreto 3/2023, así como las recomendaciones de muestreo establecidas en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017) y las normas UNE aplicables. El procedimiento se estructuró en tres fases: preparación previa, toma de muestras in situ y procesado y conservación posterior.

4.2.1. PREPARACIÓN PREVIA AL MUESTREO

Antes de cada campaña se llevaron a cabo las siguientes acciones:

-Planificación y selección de puntos de muestreo:

Basada en la identificación y verificación de accesibilidad de las captaciones históricas y actuales (manantiales, pozos, pantano y grifo de distribución).

También se realizó una comprobación de coordenadas UTM mediante GPS y una revisión de la cartografía (IGN e IAA).

-Preparación del material:

Se aseguró la limpieza y esterilización de todo el material reutilizable.

El material utilizado fueron botellas de polietileno de 500 mL para análisis físico-químico y botellas estériles de 250 mL para microbiología.

Se realizó un etiquetado previo con códigos de muestra, fecha, hora y punto de origen.

-Calibración de instrumentos portátiles

Se calibraron los equipos necesarios para mediciones medición in-situ.

También se verificó el correcto estado de baterías y sensores.

-Condiciones de limpieza y control de contaminación:

Se usaron guantes, neveras isotérmicas limpias y bolsas estériles para transporte y se evitó cualquier contacto entre los recipientes y superficies no estériles.

4.2.2. PROCEDIMIENTO IN SITU

En cada punto de muestreo se siguió un protocolo uniforme siguiendo estos pasos:

-El purgado del punto de agua

En fuentes y grifos, se flambeó la boca y se dejó circular el agua aproximadamente 5 minutos hasta alcanzar estabilidad de parámetros (pH $\pm 0,05$; CE $\pm 2-3 \mu\text{S/cm}$).

En manantiales y puntos naturales se tomó agua directamente del flujo principal, evitando remansos o zonas con sedimentos.

-Mediciones in situ:

Se registraron pH y temperatura siguiendo los métodos APHA. Todas las mediciones se realizaron por duplicado.

-Observaciones ambientales:

Se tomó nota y se tuvo en cuenta a la hora de realizar la revisión acerca de los resultados de los parámetros muestreados, asegurándose su coherencia. Se resumen en:

Condiciones meteorológicas y del entorno, estado agrícola o ganadero próximo y presencia de escorrentías, materiales o vertidos.

-Toma de muestra físico-química:

Para la toma de muestra para análisis parámetros se sistematizó el siguiente método:

Enjuague del envase con la propia agua tres veces, llenado hasta el borde para evitar presencia de aire y cierre inmediato y verificación de hermeticidad.

-Toma de muestra microbiológica (*E. coli*):

Para la toma de muestra para análisis parámetros se sistematizó el siguiente método:

Uso obligatorio de botellas estériles de un solo uso (no se disponía de envases con tiosulfato), llenado sin enjuague previo (se dejó un pequeño volumen de aire en el frasco (≈ 1 cm) para permitir la agitación posterior) y la manipulación únicamente con guantes y sin contacto con el interior del envase.

-Registro de datos de campo:

Se recogieron: Hora exacta, coordenadas UTM, temperatura ambiente, observaciones, anomalías y fotografía del punto.

4.2.3. CONSERVACIÓN, TRANSPORTE Y PROCESOS POSTERIORES

Una vez recogidas, las muestras se sometieron al siguiente proceso:

En primera parte, a su conservación inmediata, las muestras se depositaron en una nevera isotérmica a 4 °C y se mantuvieron protegidas de la luz solar directa.

El transporte al laboratorio se realizó en menos de 4 horas desde la toma asegurando que las muestras para microbiología se procesaron antes de 24 h, tal como recomienda APHA (2017) para el método 9222 B.

En la recepción en laboratorio se llevó a cabo la verificación del estado de los envases (roturas, pérdida de volumen, contaminación visible), llevando consigo un registro de entrada con código de trazabilidad.

Cómo último se conservaron duplicados de cada muestra durante 7 días a 4 °C por si era necesario repetir análisis.

En el Anexo II, se reflejan las fichas técnicas de las diferentes muestras.

Seguidamente se muestran las diferentes imágenes que reflejan las características de la zona y la metodología en la recogida de muestras.



Figura 2. Fuente vieja.

Fuente Vieja - Manantial.



Figura 3. Pozo casa.

Pozo Casa - Captación subterránea, uso doméstico.



Pozo Fuentes - Figura 4. Pozo fuentes.

Captación subterránea, actualmente en uso.



Figura 5. Pozo cuartel.

Pozo Cuartel -

Captación subterránea, actualmente en desuso.



Figura 6. Pantano de las Fuentecillas.

Pantano -

Captación superficial, actualmente en desuso.

Pozo Fuentecillas – En depósito, captación subterránea, en uso.



Figura 7. Pozo Castillo.

Pozo Castillo - Captación subterránea, en uso.

Fuente Obra – Suministro de agua público.

Grifo Casas – Suministro de agua particular.

La metodología que se ha seguido para lograr la caracterización físico-química de las aguas de abastecimiento histórico del municipio de Used se ha llevado a cabo mediante dos muestreos de campo y su posterior análisis físico-químico en el laboratorio.

El primer muestreo se realizó el 8 de agosto de 2024 tras un extenso periodo de sequía (227 mm desde el 1 de enero) mientras que el segundo fue efectuado el 25 de septiembre de 2024. Entre ambos transcurrieron 48 días y hubo una precipitación acumulada de 285 mm (Figura 8) lo que permitió obtener la variabilidad físico-química entre periodo seco y húmedo.

Para cada punto de muestreo se recolectaron 500 mililitros de muestra por duplicado, siguiendo protocolos de conservación y transporte hasta el laboratorio con el fin de asegurar la integridad de las características biológicas y físico-químicas de las muestras para su posterior análisis.

Las muestras fueron recogidas en recipientes estériles aislándolas del contacto con el ambiente hasta su almacenamiento en frío en laboratorio del Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC) donde fueron analizadas, así como en el laboratorio del grupo de investigación Agua y Salud Ambiental.

Más adelante se puede observar el patrón de precipitaciones enmarcadas entre las dos fechas de muestreo, este patrón es ilustrado en la figura 8.

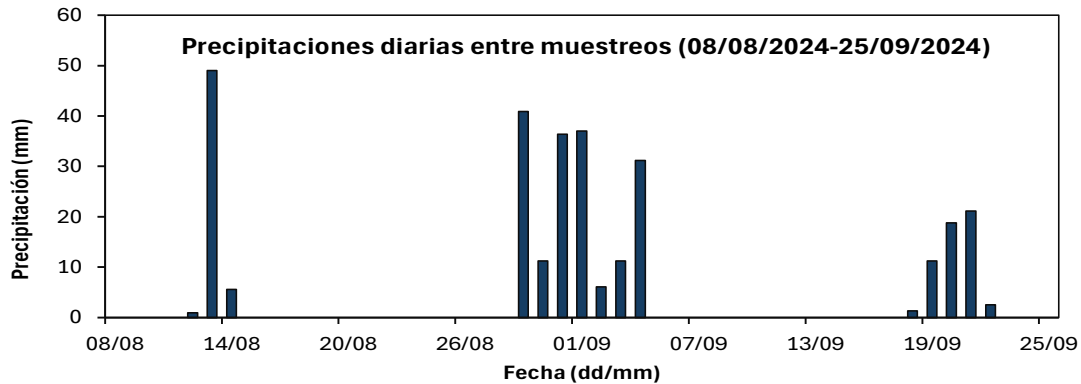


Figura 8. Precipitaciones diarias entre campañas de muestreo.

En el primer muestreo se tomaron 6 muestras de los 7 puntos de abastecimiento históricos (recogidos en la próxima Tabla 1) ya que no se pudo tener acceso al denominado pozo del cuartel (1975).

Tabla 1. Distribución de los puntos de abastecimiento, y suministros históricos.

Nombre	Coordenadas UTM		Tipo	Año	Fecha muestreo	
	X (m)	Y (m)			08/08	25/09
Fuente Vieja	620882	4546012	Manantial	1928	XX	XX
Pozo Casas	621176	4545954	Subterránea	-	XX	XX
Pozo Fuentes	620888	4546039	Subterránea	1956	XX	XX
Pozo Cuartel	620715	4546328	Subterránea	1975	XX	
Pantano	621702	4548147	Superficial	1983	X	X
Pozo Fuentecillas	621264	4547849	Subterránea	1997	X	X
Pozo Castillo	621469	4547612	Subterránea	1997	X	X
Fuente Obra	621054	4545725	Suministro	-		X
Grifo Casas	621170	4545891	Suministro	-		X

En el segundo muestreo del 25 de septiembre de 2024 ya se tuvo acceso al pozo del cuartel y adicionalmente se muestreó el agua del grifo de una casa y de una fuente para estudiar posibles variaciones en la calidad del agua una vez introducida en las redes de abastecimiento.

4.3. DETERMINACIONES ANALÍTICAS

Los parámetros analizados en las muestras por duplicado, se dieron lugar en los laboratorios del IPE fueron pH, Conductividad Eléctrica (CE) a 25°C, Sólidos Disueltos Totales (SDT), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Materia Orgánica (MO), Carbonatos ($\text{CO}_3^{=}$), Bicarbonatos (HCO_3^-), Sulfatos (SO_4^{-2}), Cloruros (Cl^-), Nitratos (NO_3^-), Nitritos (NO_2^-), Fosfatos ($\text{PO}_4^{=}$), Fluoruros (F), Bromuros (Br), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na), Potasio (K), Amonio (NH_4^+).

A las determinaciones del primer muestreo se añadió el análisis del parámetro microbiológico más significativo, cómo es la determinación de *E. coli*.

4.3.1. DETERMINACIÓN DE ESCHERICHIA COLI.

El análisis de *E. coli* se realiza por los métodos de siembra en superficie y filtración por membrana, sobre placas de agar MacConkey incubadas en posición invertida en la estufa a 44°C durante 24 horas, como inicialmente la concentración esperada en cada muestra es desconocida, se aplica el método de diluciones seriadas con el objetivo de poder contar las colonias, “Membrane Filtration Technique for Coliforms, Standard Methods: APHA Standard Methods 9222 B (APHA, 2017) “. Por tanto, la metodología de análisis consta de los siguientes pasos:

-Método de diluciones seriadas: A partir de la muestra líquida (D0), para obtener la dilución -1 (D-1) se añaden en un microtubo 100 μL de muestra sobre 900 μL de solución salina estéril. Para realizar el resto de las diluciones (D-2, D-3 y D-4), se repite el mismo procedimiento: se adicionan 100 μL de la dilución previa sobre 900 μL de solución salina estéril.

-Método de siembra en superficie: Para realizar el método de siembra en superficie se toma un volumen conocido (100 μL) de las diluciones a analizar y se siembra por duplicado en placas de Petri (90 mm \varnothing) con ayuda de un asa de Drigalski estéril, de forma que la muestra quede uniformemente extendida en la superficie del agar.

-Método de filtración de membrana: Para las muestras que se espera una baja concentración de bacterias se realiza también el análisis por el método de filtración por membrana. Para ello, en presencia de una atmósfera estéril y con ayuda de unas pinzas previamente flameadas se coloca un filtro de membrana estéril de 0,45 μm de poro sobre el soporte de filtración. Se adapta el embudo y se humedece el filtro con agua desionizada estéril. A continuación, se añaden alrededor de 30 mL de solución salina estéril y se adiciona el volumen deseado de la muestra a filtrar. Finalmente, se pasa un pequeño volumen de agua desionizada estéril para asegurar que se filtra toda la muestra, se retira el embudo y se coloca la membrana sobre las placas de Petri pequeñas (55 mm \varnothing), procurando que no queden burbujas. Se filtra un volumen de 10 mL de cada muestra para alcanzar el límite de detección de 10 UFC por 10mL.

-Recuento e inactivación: Una vez finalizado el periodo de incubación se procede al recuento de las placas. Para evitar estimaciones erróneas, se cuentan las placas cuyo número de colonias está entre 30 y 300 para las placas de Petri de 90 mm \varnothing y entre 15 y 150 para las placas de 55 mm \varnothing . La concentración de bacterias en la muestra se calcula a partir del recuento de colonias aplicando la siguiente ecuación, siendo el factor de dilución (F_d) la inversa de la dilución analizada:

$$\frac{UFC}{100\text{mL}} = \frac{UFC \cdot F_d \cdot 100}{\text{mL muestra analizados}}$$

4.3.2. DETERMINACIÓN DE PH

El pH de las muestras de agua se realizó mediante pH metro calibrado, asegurando mediciones in situ (realizadas por duplicado) para evitar alteraciones indebidas al almacenamiento. La metodología seguida corresponde al “Electrometric Method, Standard Methods: 4500-H⁺ B (APHA, 2017)”.

4.3.3. DETERMINACIÓN DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE) A 25°C

La determinación de la conductividad de las muestras fue llevada a cabo mediante conductímetro de precisión en laboratorio, ex situ, calibrado previamente con solución patrón de conductividad conocida (asegurando el valor mediante mediciones por duplicado). La metodología fue “Conductivity Method, Standard Methods: 2510 B (APHA, 2017)”.

La conductividad que presenta una disolución se define como su capacidad para transportar una corriente eléctrica, su valor es expresado en microsiemens por centímetro, el conductímetro posee un termopar para controlar la temperatura, ya que la conductividad varía con ella.

4.3.4. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

La determinación de Sólidos Suspendidos Totales se llevó a cabo siguiendo la Norma UNE-EN 872:2006 para la cuantificación de sólidos en suspensión mediante filtración en membrana (AENOR, 2006).

Así como el procedimiento descrito por la “American Organization of Analytical Chemists (AOAC, 2005)”. Se basa en:

-Filtrado de muestra: Filtrado de 100ml de muestra (por duplicado) a través de filtros de celulosa previamente pesados.

-Secado de filtros: Tras el filtrado de muestras a través de los filtros de celulosa, se introducen durante una hora en la estufa a 105°C, previamente calentada y a temperatura constante.

-Enfriamiento de filtros: Una vez transcurrido el tiempo dentro de la estufa, se retiran los filtros y se dejan enfriar en un recipiente aislado del exterior, denominado desecador, durante otra hora.

-Pesaje de filtros secos: Tras haber transcurrido el tiempo estipulado, se pesan los filtros completamente secos en balanza de precisión para obtener el peso total de Sólidos Suspendidos para cada muestra, siguiendo la expresión:

$$\text{SST (mg/L)} = \frac{(m_2 - m_1) \times 1000}{V}$$

Donde:

- m_1 = masa del filtro seco antes de la filtración en miligramos (mg)
- m_2 = masa del filtro después del secado final en miligramos (mg)
- V = volumen de muestra filtrado en mililitros (mL)
- 1000 = factor de conversión de mL a litros (L)

Unidad final: mg/L

4.3.5. DETERMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA (MO)

Las muestras tomadas mediante el mismo procedimiento se mandaron a analizar a laboratorio por parte del Instituto Geológico y Minero de España (IGME). adelante.

La metodología de análisis adoptada por este es la “High-Temperature Combustion Method, Standard Methods: 5310 B (APHA, 2017)”.

Que sigue los siguientes pasos:

La filtración previa de la muestra a través de un filtro de 0,45µm, después se introduce un volumen conocido en el analizador de TOC, la muestra se oxida a alta temperatura y el CO₂ generado se mide mediante detector infrarrojo, de esta manera la concentración de TOC se calcula automáticamente a partir de la señal detectada.

4.3.6. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT)

La determinación de los SDT también fue llevada a cabo por el laboratorio del IGME, quienes siguen el procedimiento normalizado de “Total Dissolved Solids Dried at 180 °C, Standard Methods: 2540 D (APHA, 2017)”.

Que sigue los siguientes pasos: La filtración previa de la muestra a través de un filtro, después se introduce un volumen conocido y se evapora en un crisol previamente tratado. El residuo obtenido se seca en una estufa a 180°C hasta masa constante, se pasa a crisol seco y se calcula la masa de los sólidos disueltos.

Se aplica la siguiente fórmula:

$$\text{SDT (mg/L)} = \frac{(m_2 - m_1) \times 1000}{V}$$

Donde m_1 = crisol vacío, m_2 = crisol con residuo seco, y V = volumen evaporado (mL).

4.3.7. DETERMINACIÓN DE IONES DISUELTOS

Para la determinación de iones disueltos, se seleccionaron los que se consideraron más importantes para la caracterización de las aguas y los más relevantes atendiendo a la normativa.

Los elegidos fueron: Carbonatos (CO₃²⁻), Bicarbonatos (HCO₃⁻), Sulfatos (SO₄⁻), Cloruros (Cl⁻), Nitratos (NO₃⁻), Nitritos (NO₂⁻), Fosfatos (PO₄²⁻), Fluoruros (F⁻), Bromuros (Br⁻), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na), Potasio (K), Amonio (NH₄⁺).

Para su análisis se siguió el método “Ion Chromatography with Chemical Suppression, Standard Method: 4110 B (APHA, 2017)”.

El procedimiento consiste en:

La muestra se filtra (0,45 µm) para eliminar partículas, se inyecta un volumen exacto en un sistema de cromatografía iónica (CI). Los aniones se separan en una columna aniónica por afinidad iónica, seguidamente el supresor reduce la conductividad del eluyente, aumentando la sensibilidad, así, los aniones se detectan mediante conductividad y las concentraciones se determinan comparando con curvas de calibración multianalito.

4.4. ANÁLISIS DE DATOS

El análisis e interpretación de los datos se ha realizado a través de la herramienta digital automatizada INAQUAS V1 (Moreno *et al.*, 2023), que consiste en un programa con formato Excel que desarrollaron investigadores del Instituto Geológico y minero de España (IGME).

Permite la caracterización hidroquímica de aguas de manera automática y estandarizada. Genera un amplio rango de índices e interpretaciones basados en la composición iónica del agua. Este programa se basa en un marco normativo como es el vigente Real Decreto 3/2023 por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y su suministro.

INAQUAS V1 se apoya en ecuaciones y criterios de clasificación internacionalmente aceptados, permitiendo el cálculo de diversos Índices, Diagramas, Gráficos y Balances de máxima importancia y representatividad para evaluar las facies hidroquímicas y calidad de aguas, cómo son:

-Diagramas de Piper y Stiff para la identificación de facies hidroquímicas.

-Índice de la calidad de agua de riego según el SAR (Relación de adsorción de Sodio), también se apoya en los valores de CE (Conductividad Eléctrica) y en el porcentaje de sodio presente.

-La clasificación de las aguas para consumo humano en relación con los valores paramétricos pautados por el Real Decreto 3/2023 en vigor.

-Analíticas del balance iónico y cálculo de errores para el control de la calidad del análisis.

Los resultados de estas operaciones se mostrarán de manera gráfica y visual. Los diagramas son reflejados in situ en las mismas plantillas comúnmente utilizadas por la comunidad científica, así como los gráficos. El resto de las operaciones aparecen en forma de tablas, de modo que, los resultados obtenidos se pueden observar de forma muy clara.

Este conjunto de operaciones quedaría obsoleto sin una comparativa real de los valores paramétricos obtenidos con los establecidos por la normativa vigente cómo es el RD 3/2023, por ello se realizó esta acción y se reflejó de nuevo, en forma de tablas comparativas.

Para la implementación de los datos obtenidos previamente, se ha realizado una selección y filtrado de las muestras contenidas en la hoja de cálculo del análisis original. Se han incluido aquellas con valor ambiental e histórico destacable, que poseen información suficiente para caracterizar la composición iónica, excluyendo aquellas con parámetros incompletos o carencias analíticas.

Los datos de las muestras introducidos corresponden a los valores de: pH, Conductividad Eléctrica (CE) a 25°C, Sólidos Disueltos Totales (SDT), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Materia Orgánica (MO), Carbonatos (CO_3^{2-}), Bicarbonatos (HCO_3^-), Sulfatos (SO_4), Cloruros (Cl^-), Nitratos (NO_3^-), Nitritos (NO_2^-), Fosfatos (PO_4^{2-}), Fluoruros (F^-), Bromuros (Br^-), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na), Potasio (K), Amonio (NH_4^+).

-Una vez cargado el conjunto de datos, el programa genera automáticamente:

-Diagramas de Piper, como representación visual de la composición catiónica y aniónica.

-Diagramas de Stiff, como comparación de la forma característica de cada agua.

-Gráficas de clasificación para riego, diagrama Wilcox.

-Resumen de las facies hidroquímicas según los porcentajes que predominan.

-Tablas de idoneidad para el consumo humano, comparando cada parámetro de referencia establecidos por el RD 3/2023, establecidos en su configuración.

-Resumen estadístico y errores del balance iónico.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del conjunto de analíticas recogidas entre las fechas 08/08/2024 y 25/09/2024, se han analizado 15 muestras representativas de los puntos de abastecimiento significativos del municipio de Used atendiendo a varios aspectos que se desarrollan a continuación.

5.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Se ha realizado un análisis de 15 muestras diferentes (Tabla 2), en los que se reflejan diferentes parámetros clave, de interés normativo y para poder efectuar la caracterización físico-química de estas.

Estos parámetros son: pH, Conductividad Eléctrica (CE) a 25°C, Sólidos Disueltos Totales (SDT), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Materia Orgánica (MO), Carbonatos (CO_3^{2-}), Bicarbonatos (HCO_3^-), Sulfatos (SO_4^{2-}), Cloruros (Cl^-), Nitratos (NO_3^-), Nitritos (NO_2^-), Fosfatos (PO_4^{2-}), Fluoruros (F), Bromuros (Br^-), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na), Potasio (K), Amonio (NH_4^+).

En términos de pH, las aguas presentan valores comprendidos aproximadamente entre 6,7 y 8,3. Durante el muestreo de agosto predominan pH alcalinos (en torno a 8,0–8,3 en la mayoría de los pozos), mientras que en septiembre descienden hacia valores próximos a la neutralidad ($\approx 6,7-7,2$). Este patrón es coherente con una base hidroquímica carbonatada, donde la alcalinidad se ve reforzada en situaciones de sequía (concentración de carbonatos y bicarbonatos) y se atenúa tras episodios de lluvia por efecto de dilución y recarga.

La conductividad eléctrica (CE) a 25 °C y los sólidos disueltos totales (SDT) muestran con claridad los contrastes de mineralización entre puntos. En general, las captaciones subterráneas se sitúan en un rango de mineralización baja a media (CE $\approx 450-600 \mu\text{S}/\text{cm}$; SDT $\approx 350-500 \text{ mg}/\text{L}$ en Fuente Vieja, Pozo Fuentes, Pozo Fuentecillas y Pozo Castillo), mientras que el Pantano presenta los valores más bajos de todo el sistema (CE $\approx 117-75 \mu\text{S}/\text{cm}$; SDT $\approx 120-100 \text{ mg}/\text{L}$), propios de un agua superficial poco mineralizada y muy sensible a los episodios de precipitación. El caso más extremo es Pozo Casa, con CE y SDT claramente más elevados que el resto ($\approx 880-1.376 \mu\text{S}/\text{cm}$; $\approx 736-1.316 \text{ mg}/\text{L}$), lo que indica una alta mineralización asociada a tiempos de residencia mayores y/o a aportes adicionales de sales, coherentes con la señal agraria detectada en otros parámetros (nitratos, cloruros).

En cuanto a los sólidos suspendidos totales (SST) y la materia orgánica (MO), la diferencia entre aguas superficiales y subterráneas es muy marcada. Las aguas de pozo presentan SST bajos (del orden de 1–6 mg/L) y contenidos reducidos de materia orgánica, lo que refleja filtración natural en el acuífero y baja carga particulada. Por el contrario, el Pantano muestra los valores de SST y MO más altos de la serie en el primer muestreo (agosto), con SST $>40 \text{ mg}/\text{L}$ y mayor materia orgánica, consistentes con un comportamiento típico de agua de escorrentía superficial sometida a procesos de erosión de suelos, arrastre de partículas finas y materia orgánica asociada. Tras las lluvias de septiembre se observa una disminución de SST en el Pantano, lo que indica una fase de dilución posterior al episodio de tormentas.

Los aniones mayoritarios, fundamentalmente bicarbonato (HCO_3^-) y cloruro (Cl^-), junto con sulfato (SO_4^{2-}), configuran el esqueleto químico de estas aguas. Los bicarbonatos se sitúan en torno a 200–330 mg/L en la mayor parte de puntos subterráneos, lo que refuerza la facies bicarbonatada cálcica típica de medios carbonatados. El Pantano, con HCO_3^- en torno a 50 mg/L, presenta una alcalinidad menor, coherente con su menor grado de equilibrio con la roca. En cuanto a los cloruros, la mayoría de captaciones se mantienen en valores moderados ($\approx 200-260 \text{ mg}/\text{L}$ o inferiores), pero Pozo Casa destaca por presentar Cl^- elevados y crecientes ($\approx 263-300 \text{ mg}/\text{L}$), lo que, junto con el incremento simultáneo de SDT y sulfatos ($\text{SO}_4^{2-} \approx 109-237 \text{ mg}/\text{L}$), apunta a una presión combinada de mineralización natural y aportes agrarios (fertilizantes, sales de riego, escorrentía concentrada hacia la captación).



Los nitratos (NO_3^-) son el parámetro químico que mejor revela las diferencias de presión antrópica entre captaciones. Mientras que la mayoría de puntos se mantienen dentro de rangos moderados y compatibles con el uso potable según el RD 3/2023 (valores <50 mg/L), Pozo Casa registra concentraciones significativamente superiores (≈ 72 y 84 mg/L) en ambas campañas. Esta recurrencia y su incremento tras las lluvias indican una fuerte carga difusa de origen agrícola, con lixiviación de nitrógeno desde suelos cultivados y alta conectividad suelo-acuífero. En contraste, nitritos (NO_2^-), fosfatos (PO_4^{3-}), fluoruro (F^-) y bromuro (Br^-) se mantienen en niveles muy bajos o próximos al límite de detección, sin diferencias reseñables entre captaciones, lo que sugiere que los procesos dominantes están ligados a la gestión del nitrógeno y a la mineralización inorgánica más que a aportes puntuales industriales o urbanos.

En el grupo de cationes, el calcio (Ca^{2+}) es claramente dominante (≈ 70 – 130 mg/L en la mayoría de pozos, con valores superiores en Pozo Casa y Pozo Fuentes), seguido por magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+). Este patrón refuerza el control de rocas carbonatadas y, localmente, dolomíticas sobre la composición del agua. Destaca el comportamiento de Pozo Cuartel, con Mg^{2+} anómalo (≈ 34 mg/L) y una dureza elevada, que ya anticipa la facies bicarbonatada magnésica descrita posteriormente en los apartados hidrogeoquímicos. Los valores de sodio son, en general, moderados, coherentes con la baja sodicidad observada en la evaluación agrícola. El potasio muestra valores discretos, con ligeros aumentos en captaciones como Fuente Obra, compatibles con aportes puntuales de origen agrícola o doméstico. El amonio (NH_4^+) se mantiene en concentraciones muy bajas o nulas en casi todas las muestras, lo que indica ausencia de contaminación orgánica reciente y respalda la buena calidad desde el punto de vista de cargas nitrogenadas reducidas.

El balance de cargas calculado por INAQUAS V1, reflejados en la tabla 7, ofrece valores inferiores al 10% generalmente, existiendo dos desviaciones claras en las dos muestras tomadas del Pantano de las Fuentecillas (Muestra: Pantano), dando valores de 14,7% y 20,9%.

Estas desviaciones reflejan una descompensación en las cargas de aniones y cationes que contienen estas muestras, pudiendo ser causa del periodo largo de sequía y consecuencia de las fuertes tormentas, respectivamente. Los periodos de sequía causan a los acuíferos superficiales, de carga por escorrentía y lluvia, procesos largos de evaporación concentrando las sales disueltas. Al contrario, las temporadas de lluvias o tormentas provocan un rápido y fuerte lavado de las aguas, diluyendo los compuestos que estas contienen.

En conjunto, la lectura detallada de la Tabla 2 pone de manifiesto que el sistema de Used se caracteriza por una mineralización globalmente baja-moderada y facies bicarbonatadas cálcicas, con tres comportamientos diferenciados: (i) el Pantano, como agua superficial poco mineralizada pero con mayor carga de SST y materia orgánica y fuerte variabilidad climática; (ii) la mayoría de pozos, con composición relativamente homogénea y estable; y (iii) Pozo Casa y Pozo Cuartel, como puntos singulares por su mayor mineralización, elevadas concentraciones de nitratos y cloruros (Pozo Casa) y magnesio (Pozo Cuartel), que señalan una mayor vulnerabilidad a presiones agrarias y a procesos hidrogeoquímicos más avanzados.



Tabla 2. Resultados de los análisis de parámetros físico-químicos

Fuente: IGME, elaboración propia.

	Nombre	pH	CE 25°C	SDT	SST	MO	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ²⁻	F ⁻	Br ⁻	Ca	Mg	Na	K	NH ₄ ⁺	Error*	
	08/08/2024		μS/cm	mg/l	mg/l	g/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
02	Fuente Vieja	8.15	454	351	3.1	2.1	10	268	24	259	34	0.00	0.00	0.19	0.26	74	18	12	3	0.01	-5.1	
01	Pozo Casa	8.04	882	736	5.7	2.9	10	273	109	263	72	0.22	0.65	0.14	0.30	132	22	23	51	0.00	1.2	
03	Pozo Fuentes	8.05	576	439	5.2	2.6	12	329	37	317	36	0.00	0.00	0.21	0.26	102	17	13	9	0.01	-4.8	
UF	Pozo Cuartel																					
04	Pantano	7.8	117	122	44.7	8.4	0	51	10	51	5	0.00	0.00	0.07	0.07	21	3	4	4	0.00	14.7	
05	Pozo Fuentecillas	8.3	509	381	1.8	1.8	12	234	38	222	40	0.00	0.00	0.19	0.36	85	19	15	3	0.00	3.0	
06	Pozo Castillo	7.86	453	354	1.0	1.0	0	201	29	203	39	0.00	0.00	0.12	0.35	77	17	9	2	0.00	4.8	
	25/09/2024																					
08	Fuente Vieja	6.74	447	378	1.3	1.3	0	210	23	210	34	0.00	0.25	0.19	0.26	74	17	12	3	0.02	4.5	
07	Pozo Casa	6.84	1376	1316	8.8	4.1	0	300	237	300	84	0.07	0.85	0.11	0.45	209	36	31	92	0.00	3.7	
09	Pozo Fuentes	7.06	568	483	2.0	2.0	0	277	34	277	29	0.00	0.23	0.19	0.22	103	17	13	8	0.00	4.1	
11	Pozo Cuartel	7.94	364	240	3.3	3.3	6	248	8	242	9	0.05	0.00	0.16	0.07	38	34	6	6	0.03	5.2	



	Nombre	pH	CE 25°C	SDT	SST	MO	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ²⁻	F ⁻	Br ⁻	Ca	Mg	Na	K	NH ₄ ⁺	Error*	
	25/09/2024		μS/cm	mg/l	mg/l	g/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
12	Pantano	7.15	75	97	17.8	5.4	0	30	6	30	3	0.02	0.00	0.03	0.04	14	3	3	3	0.01	20.9	
13	Pozo Fuentecillas	6.73	500	387	0.9	0.9	0	239	35	239	38	0.00	0.24	0.18	0.34	83	19	14	2	0.00	4.2	
14	Pozo Castillo	6.66	448	372	0.9	0.9	0	191	27	191	40	0.00	0.24	0.12	0.35	76	17	9	4	0.00	6.5	
10	Fuente Obra	7.88	663	556	1.9	1.9	12	308	59	296	32	0.00	0.23	0.29	0.23	130	13	15	12	0.00	2.5	
15	Grifo	7.04	460	384	0.4	0.4	0	201	28	201	39	0.00	0.00	0.12	0.70	76	17	12	2	0.00	5.6	

*Error= $[\sum(\text{Cationes}-\text{Aniones}) / \sum(\text{Cationes}+\text{Aniones})] \cdot 200$ (Unidades en miliequivalente/Litro, meq/L)

5.3. COMPARACIÓN DATOS OBTENIDOS CON LEGISLACIÓN VIGENTE

A continuación, se mostrará en la Tabla 3 una comparación de los valores paramétricos de los nitratos, dónde se observa el valor obtenido, el que marca la legislación vigente y una comparativa con la derogada.

Tabla 3. Comparación de los parámetros físico-químicos: Nitratos, los obtenidos, el valor límite legal y derogado.

Fuente: Gobierno de España RD 140/2003, RD 3/2023, elaboración propia.

Muestra	Nitratos (mg/L)	Límite RD 3/2023 - Nitratos (mg/L)
Pozo Casa	72	50
08/08 y 25/09	84	

Tras la potabilización, se debe cumplir al menos la condición $[\text{nitrato}] / 50 + [\text{nitrito}] / 3 \leq 1$, donde los corchetes significan las concentraciones en mg/L para nitrato (NO_3) y nitrito (NO_2), y que el valor de 0,10 mg/L para nitritos se cumple a la salida de la ETAP (RD 3/2023).

Existe una superación del límite legal de nitratos en las dos tomas de muestra de Pozo Casa, lo que sugiere una posible contaminación difusa por fertilizantes o provenientes de origen agrícola. Esta agua no se podría consumir sino que tendría que pasar un proceso que redujera los nitratos, el más extendido es la dilución con agua potable.

La presencia de nitratos en cantidades elevadas en agua potable tiene asociada consigo una serie de riesgos para la salud. En bebés menores de 6 meses de edad, se le asocia el riesgo de sufrir metahemoglobinemia (coloquialmente, el síndrome del niño azul), que dificulta el transporte de oxígeno en la sangre.

Por otra parte, en adultos, la exposición a largo plazo se ha relacionado con una serie de ciertos cánceres como el de colon, próstata y ovario, debido a la formación de compuestos cancerígenos como las nitrosaminas.

Una posible solución, en caso de ser todavía un punto de captación y consumo de agua, sería la utilización de un desnitrificador como medida correctora. También se recomendaría llevar a cabo un estudio del terreno que lo rodea y los productos fertilizantes utilizados en esa zona, para posterior diagnóstico.

A continuación, se mostrará en la Tabla 4 una comparación de los valores paramétricos de los nitritos, dónde se observa el valor obtenido, el que marca la legislación vigente y una comparativa con la derogada.

Tabla 4. Comparación de los parámetros físico-químicos: Nitritos, los obtenidos, el valor límite legal y derogado.

Fuente: Gobierno de España RD 140/2003, RD 3/2023, elaboración propia.

Muestra	Nitritos (mg/L)	Límite RD 3/2023 - Nitritos (mg/L)
Pozo Casa 25/09	0.07	0.50



Tras la potabilización, se debe cumplir al menos la condición $[\text{nitrato}] / 50 + [\text{nitrito}] / 3 \leq 1$, donde los corchetes significan las concentraciones en mg/L para nitrato (NO_3) y nitrito (NO_2), y que el valor de 0,10 mg/L para nitritos se cumple a la salida de la ETAP (RD 3/2023).

Este valor paramétrico es para red de distribución y depósito de distribución o regulación. En el caso de salida de ETAP o salida de depósito de cabecera el valor paramétrico será de 0,10 mg/L (RD 3/2023).

Esta agua no se podría consumir a no ser que se tratase hasta llegar al nivel de nitritos permitidos.

Al igual que en los nitratos, los nitritos en el agua potable pueden causar problemas de salud graves, principalmente la metahemoglobinemia. En lactantes, que afecta la capacidad de la sangre para transportar oxígeno y puede ser fatal. En adultos y fetos, la metahemoglobinemia puede presentarse, aunque los bebés son más vulnerables. La exposición prolongada también podría aumentar el riesgo de algunos tipos de cáncer.

A continuación, se mostrará en la Tabla 5 una comparación de los valores paramétricos del Amonio, dónde se observa el valor obtenido, el que marca la legislación vigente y una comparativa con la derogada.

Tabla 5. Comparación de los parámetros físico-químicos: Amonio, los obtenidos, valor límite legal y derogado.

Fuente: Gobierno de España RD 140/2003, RD 3/2023, elaboración propia.

Muestra	Amonio (mg/L)	Límite RD 3/2023 – Amonio (mg/L)
TODAS	0.00-0.20	0.50

“En el caso de emplear productos en los que se libere o genere cloro activo libre, una elevada concentración de amonio reduce la eficacia de la desinfección, por lo que en ningún momento debe sobrepasar 1,00 mg/L.

En el caso de emplear monocloraminas se medirá el amonio, como indicador de contaminación, antes de añadir el amoniaco necesario para generar la monocloramina. En el caso de presencia de valores superiores a 0,7 mg/L, se recomienda que las medidas correctoras sean de rápida aplicación.

El valor de no aptitud será 1,00 mg/L.” (RD 3/2023).

Su presencia en niveles altos puede provocar problemas de irritabilidad en ojos, piel, y vías respiratorias, también su ingesta de forma prolongada podría ser perjudicial.

En niveles bajos es un indicador de posible contaminación cruzada, puede ser precursor de nitritos y nitratos.



A continuación, se mostrará en la Tabla 6 una comparación de los valores paramétricos de los fluoruros, dónde se observa el valor obtenido, el que marca la legislación vigente y una comparativa con la derogada.

Tabla 6. Comparación de los parámetros físico-químicos: Fluoruros, los obtenidos, el valor límite legal y derogado.

Fuente: Gobierno de España RD 140/2003, RD 3/2023, elaboración propia.

Muestra	Fluoruro (mg/L)	Límite RD 3/2023 – Fluoruro (mg/L)
TODAS	0.03-0.29	1.50

En el conjunto de muestras de Used, los resultados muestran concentraciones de fluoruros muy bajas, con valores comprendidos entre 0,03 y 0,29 mg/L, muy por debajo del límite paramétrico de 1,5 mg/L establecido por el RD 3/2023. Estas cifras indican que ningún punto de captación presenta riesgo sanitario asociado a este parámetro, lo que es coherente con la geología de la zona, dominada por materiales margosos y calcáreos, con escasa presencia de minerales fluorados.

La ingesta de este tipo de compuestos puede causar problemas como la fluorosis dental y esquelética, que afectan, respectivamente, en el esmalte de los dientes causando manchas o corrosión, y la esquelética provoca dolor en las articulaciones y limita el movimiento de estas.

Las ingestas excesivas podrían llegar a provocar problemas en los sistemas endocrino, neurológico o excretor.

A continuación, se mostrará en la Tabla 7 una comparación de los valores de los parámetros indicadores de calidad, dónde se observa el valor obtenido, el que marca la legislación vigente y una comparativa con la derogada.

Se reflejan los valores de pH, Sodio, Sulfatos, Cloruros.



Tabla 7. Comparación de parámetros de indicadores de calidad: los valores obtenidos, valor límite legal y derogado. Donde se miden pH, Sodio, Sulfatos, Cloruros. Fuente: Gobierno de España RD 140/2003, RD 3/2023, elaboración propia.

Muestra	pH	Límite RD 3/2023 - pH	Sodio (mg/L)	Límite RD 3/2023 - Sodio (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Límite RD 3/2023 - Sulfatos (mg/L)	Cloruro (mg/L)	Límite RD 3/2023 - Cloruro (mg/L)
Fuente Vieja 08/08	8.15	6.5-9.5	12	200	24	250	259	250
Pozo Casa 08/08	8.04	6.5-9.5	23	200	109	250	263	250
Pozo Fuentes 08/08	8.05	6.5-9.5	13	200	37	250	317	250
Pozo Casa 25/09	6.84	6.5-9.5	31	200	237	250	300	250
Pozo Fuentes 25/09	7.06	6.5-9.5	13	200	34	250	277	250
Fuente Obra 25/09	7.88	6.5-9.5	15	200	59	250	296	250

Todos los valores de pH analizados se encuentran dentro del rango permitido por la legislación, presentan una neutralidad y una ligera tendencia a la basicidad, propia de sistemas hidrogeológicos carbonatados. Los valores de sodio y sulfatos también se encuentran por debajo de los límites establecidos, teniendo en cuenta el valor analizado de sulfatos en Pozo Casa siendo 237 mg/L, pudiendo considerarse como un indicador de cierta contaminación difusa debida a la sulfatación de suelos agrícolas; se recomienda seguimiento.



Las concentraciones de cloruros oscilaron entre 51 y 317 mg/L, destacando varias muestras que superaron el límite establecido (Fuente Vieja, Pozo Casa, Pozo Fuentes y Fuente de la Obra). La presencia de cloruros se vincula principalmente a procesos de disolución de sales, infiltraciones difusas de origen agrícola (fertilizantes potásicos y clorurados) o muy puntualmente a origen antrópico como aguas residuales o lixiviados. Estos valores comprometen la calidad organoléptica del agua otorgándole sabor salado y aumentando la corrosividad de las redes de distribución metálicas.

Los cloruros no representan riesgos en la salud, ya que son minerales esenciales. Sin embargo, una alta concentración de estos, junto con el sodio, pueden acarrear problemas para las personas que sufren enfermedades como hipertensión, enfermedades cardíacas, arteriales o úlceras de estómago.

Se requieren estrategias preventivas de gestión y protección de acuíferos, así como el cuidado de las redes de distribución.

A continuación, se mostrará en la Tabla 8 una comparación de los valores de los parámetros de caracterización del agua potable. Dónde se observa el valor obtenido, el que marca la legislación vigente ya que el obsoleto Real Decreto 140/2003 no contemplaba estos valores

Tabla 8. Comparación de los parámetros de caracterización de aguas. Los obtenidos y los valores límite legales, se miden Calcio, Magnesio, Dureza. Fuente: Gobierno de España RD 140/2003, RD 3/2023, elaboración propia.

Muestra	Calcio (mg/L)	Límite RD 3/2023 - Calcio (mg/L)	Magnesio (mg/L)	Límite RD 3/2023 - Magnesio (mg/L)	Potasio (mg/L)	Límite RD 3/2023 - Potasio (mg/L)	Dureza (mg/L CaCO ₃)	Límite RD 3/2023 -Dureza (mg/L CaCO ₃)
Pozo Casa 08/08	131.915	100	22.262	30	51	10	421.0	500
Pozo Fuentes 08/08	101.837	100	17.115	30	9	10	324.7	500
Pozo Casa 25/09	209.426	100	36.243	30	92	10	672.0	500
Pozo Fuentes 25/09	103.015	100	16.638	30	8	10	325.7	500
Pozo Cuartel 25/09	37.648	100	34.403	30	6	10	235.7	500
Fuente Obra 25/09	129.77	100	13.082	30	12	10	377.79	500

Las concentraciones de Calcio oscilan entre 13 y 210 mg/L, superando en 5 ocasiones el límite establecido en 100 mg/L (Pozo Casa, Pozo Fuentes y Fuente de la Obra). Evidencia una mineralización intensa asociada a la disolución de materiales carbonatados. El predominio de calcio es coherente con las facies de aguas bicarbonatadas cálcicas, dominantes en Used. La presencia de Calcio contribuye a la dureza y genera problemas de incrustación en conducciones, depósitos y electrodomésticos.

El magnesio presentó valores inferiores al límite establecido, salvo en Pozo Cuartel, actualmente en desuso, que otorgó un valor de 34 mg/L. Sugiere la influencia de materiales dolomíticos y yesíferos magnesianos.

El Potasio presentó en general valores inferiores al umbral establecido por el RD 3/2023, destacando dos superaciones en Fuente de la Obra (12 mg/L) y un despunte en Pozo Casa en las dos tomas de muestras (51 y 92 mg/L). Apunta a un aporte antrópico asociado al uso agrícola de fertilizantes potásicos, indica vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación difusa de origen agrícola. Es un claro indicador de presión antrópica sobre los recursos hídricos.

La dureza osciló entre los 46 y 672 mg/L, clasificando las aguas en categorías que van desde blandas (<75 mg/L) (ej. Pantano) hasta muy duras (>300 mg/L) (Pozo Casa, Fuente de la Obra). El límite de referencia del RD 3/2023 es de 500 mg/L, superado únicamente en el Pozo Casa, confirmando la problemática de esa captación. La dureza se debe al aporte de Calcio, y en menor medida de Magnesio. Condiciona la calidad del agua, aumentando la incrustación en instalaciones y disminuyendo la eficiencia en sistemas de distribución y potabilización, si se diera el caso.

Las aguas duras o muy duras generalmente no presentan riesgos para la salud graves. En casos aislados o extremos pueden causar problemas en la piel como sequedad, irritación o eccema, debilitar el cabello y en casos puntuales puede producir un efecto laxante en personas muy sensibles.

Por lo contrario, puede aportar minerales muy beneficiosos como el calcio y el magnesio.



A continuación, se mostrará en la Tabla 9 una comparación de los valores de los parámetros microbiológicos, *Escherichia coli*. Dónde se observa el valor obtenido, el que marca la legislación vigente y derogada.

- Tabla 9. Comparación de parámetros microbiológicos, *Escherichia coli*: Los obtenidos, valores límite legales y derogados, se mide *Escherichia coli* (*E. coli*).

Fuente: Gobierno de España RD 140/2003, RD 3/2023, elaboración propia.

Muestra	E.coli (UFC/100mL) ± Desviación estándar (UFC/100mL)	Límite RD 3/2023
Pozo Cuartel 25/09	$3,4 \cdot 10^3 \pm 1,3 \cdot 10^3$	0

De las muestras que fueron analizadas, ocho de ellas presentaron valores inferiores al límite de detección de colonias de *Escherichia coli* (<10 UFC/100 mL), por lo que se considera en conformidad con los requisitos legales del RD 3/2023, estableciendo una ausencia total. La muestra de Pozo Cuartel superó este límite con colonias de entre 3.400 ± 1.300 UFC/100 mL, incumpliendo totalmente los límites establecidos.

La presencia de esta bacteria en aguas potables puede causar serios problemas para la salud, desde un malestar intestinal, diarreas o fiebre y fatiga hasta graves complicaciones como insuficiencia Renal o el Síndrome Urémico Hemolítico (especialmente grave en niños, puede provocar la insuficiencia renal y anemia).

En el caso de ser todavía, Pozo Cuartel, una captación activa debería de implementarse un procedimiento de desinfección, la dilución de hipoclorito sódico en el agua es el más común y económica.

5.4. CARACTERIZACIÓN DE AGUAS

5.4.1. CARACTERIZACIÓN DE AGUAS: DIAGRAMA DE PIPER

A continuación, en la figura 9, se mostrará un diagrama que refleja la clasificación de las diferentes aguas analizadas.

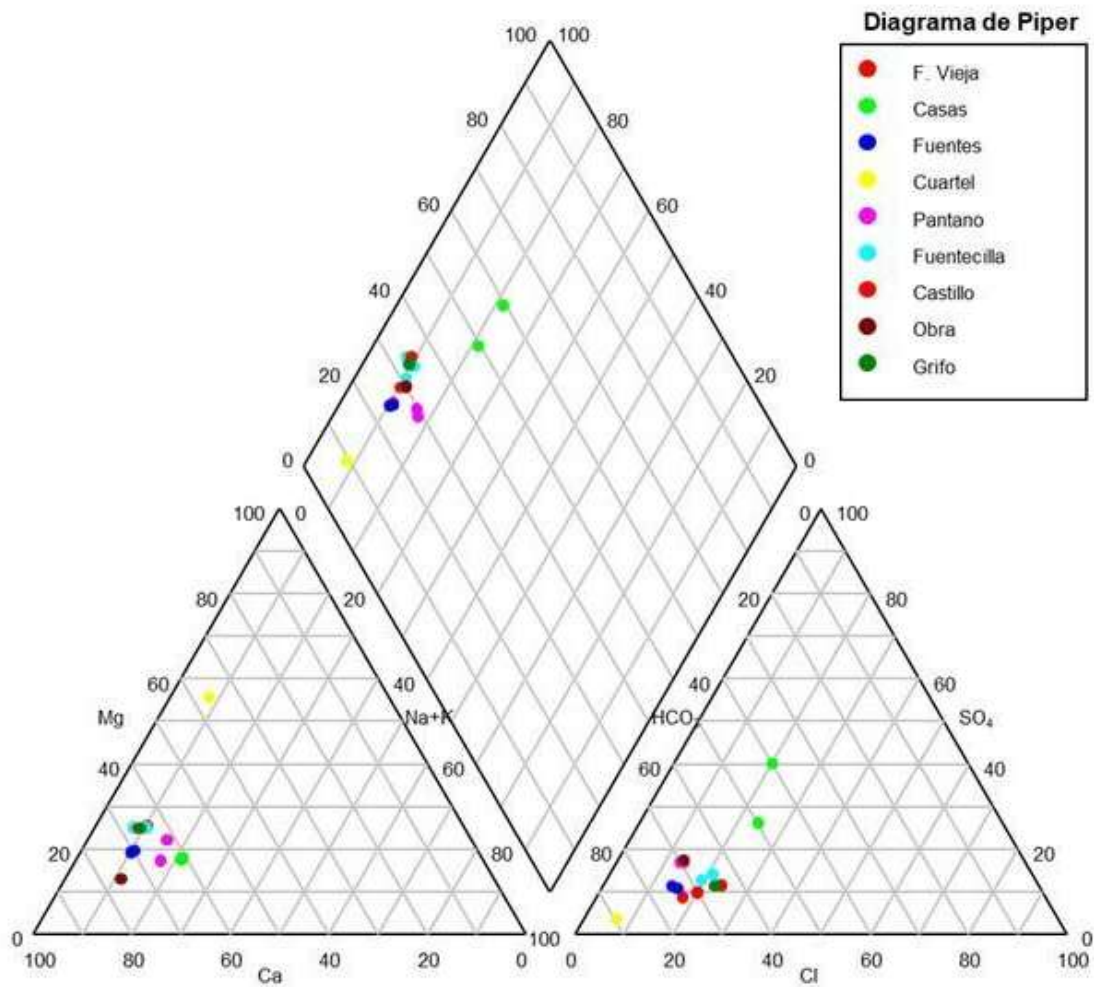


Figura 9. Diagrama de Piper para todas las muestras. Fuente: INAQUAS V1, elaboración propia.

Refleja una clasificación de las aguas según su composición iónica relativa. La definición resultante de ello ha definido la facies hidroquímica dominante:



- Las muestras se agrupan predominantemente en aguas bicarbonatadas cálcicas, con proporciones mayores de Ca^{2+} y HCO_3^- , típicas de acuíferos en medios carbonatados o margosos.
- Bajas concentraciones de Na^+ y SO_4^{2-} en la mayoría de las muestras sugiere una baja influencia de sales de origen evaporítico. Las muestras Fuente Vieja y Pozo Fuentes muestran una desviación hacia facies mixtas, posiblemente causada por lixiviados agrícolas o alteraciones por recarga rápida.
- Pantano: baja concentración de aniones y cationes, quedando en el núcleo principal, indica una baja mineralización propia de aguas superficiales poco evolucionadas.
- Pozo Casas: aparece desplazado hacia el centro y la derecha, alejándose del grupo dominante de aguas bicarbonatadas cálcicas. Esta desviación se explica por sus elevadas concentraciones de cloruros y sulfatos ($\text{Cl}^- > 260\text{--}300$ mg/L y $\text{SO}_4^{2-} > 100\text{--}230$ mg/L), así como por la presencia de sodio en valores relativamente altos (23–31 mg/L). El resultado es una facies hidroquímica de tipo mixta bicarbonatada-sulfatada cálcico-sódica, indicativa de una mayor influencia antrópica y de procesos de mezcla o lixiviación agrícola. Los valores de nitratos refuerzan esta hipótesis, siendo 72 mg/L en agosto y 84 mg/L en septiembre, superando claramente el límite establecido por el RD 3/2023 (50 mg/L).
- Pozo Cuartel: Presenta un comportamiento hidroquímico singular en comparación con el resto de las captaciones. se sitúa hacia la zona de aguas bicarbonatadas magnésicas, debido a las concentraciones anómalamente elevadas de Mg^{2+} (34 mg/L, superando el límite de referencia de 30 mg/L del RD 3/2023) y a la combinación con cloruros y bicarbonatos ($\text{Cl}^- \approx 242$ mg/L; $\text{HCO}_3^- \approx 248$ mg/L). Esta facies puede estar asociada a procesos de disolución de dolomías locales o yesos magnesianos, así como a fenómenos de intercambio iónico en los que el Mg^{2+} sustituye progresivamente al Ca^{2+} en el medio sólido.

La comparación entre las dos campañas de muestreos pone en manifiesto la influencia de la climatología en la hidroquímica de las aguas:

- pH: durante la sequía los valores son más elevados (alcalinos, >8 en varias captaciones), mientras que tras las lluvias descienden ligeramente (en torno a 6,6–7,2). Esto refleja un efecto de dilución y recarga, que reduce la concentración relativa de carbonatos y la alcalinidad.
- Conductividad y sales disueltas: los valores de CE y TSD son más altos en agosto, debido a la concentración de iones durante la sequía. En septiembre se observa un descenso en varios puntos, aunque en otros, como el Pozo Casa, la CE aumenta notablemente (hasta 1376 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lo que puede estar vinculado a la entrada de aguas de escorrentía cargadas de sales agrícolas.
- Iones mayoritarios: sigue dominado por Ca^{2+} y HCO_3^- en ambas campañas, aunque tras las lluvias se detecta una ligera redistribución de proporciones, con algunos incrementos de sulfatos y sodio en puntos concretos. Esto indica un mayor lavado del suelo y una movilización de compuestos de origen superficial.
- Pantano: fuerte variabilidad, con un agua poco mineralizada que refleja con rapidez los cambios de las precipitaciones. Durante la sequía muestra un mayor grado de evaporación (CE más alta), mientras que en septiembre predomina la dilución.

En conclusión, las aguas de Used presentan una base hidroquímica homogénea y carbonatada, pero están fuertemente condicionadas a eventos climáticos. La sequía concentra las sales, mientras que las lluvias generan procesos de dilución, arrastre y aportes superficiales que alteran la composición iónica y comprometen la calidad.

5.5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS HIDROQUÍMICO DE INAQUAS V1; ÍNDICES HIDROQUÍMICOS Y FACIES

5.5.1. BALANCE IÓNICO

En este apartado aparece el balance iónico, es decir el desequilibrio existente en las diferentes aguas entre la cantidad de cationes y aniones presentes.

A continuación, se observa el balance iónico entre las diferentes aguas, en la próxima tabla 10.

Tabla 10. Balance iónico, Cationes, Aniones y Error relativo. Fuente: INAQUAS V1 (IGME), elaboración propia.

Muestra	Fecha	Cationes	Aniones	Error
Fuente Vieja	08/08/2024	5.77	6.39	-5.08
Pozo Casa	08/08/2024	10.69	10.44	1.22
Pozo Fuentes	08/08/2024	7.29	8.02	-4.80
Pantano	08/08/2024	1.62	1.20	14.69
Pozo Fuentesillas	08/08/2024	6.53	6.15	3.00
Pozo Castillo	08/08/2024	5.71	5.19	4.76
Fuente Vieja	25/09/2024	5.70	5.22	4.47
Pozo Casa	25/09/2024	17.14	15.92	3.71
Pozo Fuentes	25/09/2024	7.26	6.70	4.06
Pozo Cuartel	25/09/2024	5.12	4.61	5.24
Pantano	25/09/2024	1.10	0.72	20.91
Pozo Fuentesillas	25/09/2024	6.43	5.92	4.17
Pozo Castillo	25/09/2024	5.72	5.02	6.53
Fuente Obra	25/09/2024	8.53	8.11	2.54
Grifo	25/09/2024	5.76	5.15	5.57

A continuación, se muestra una representación gráfica de la presencia de las especies iones y cationes presentes en las diferentes muestras (Figura 10):

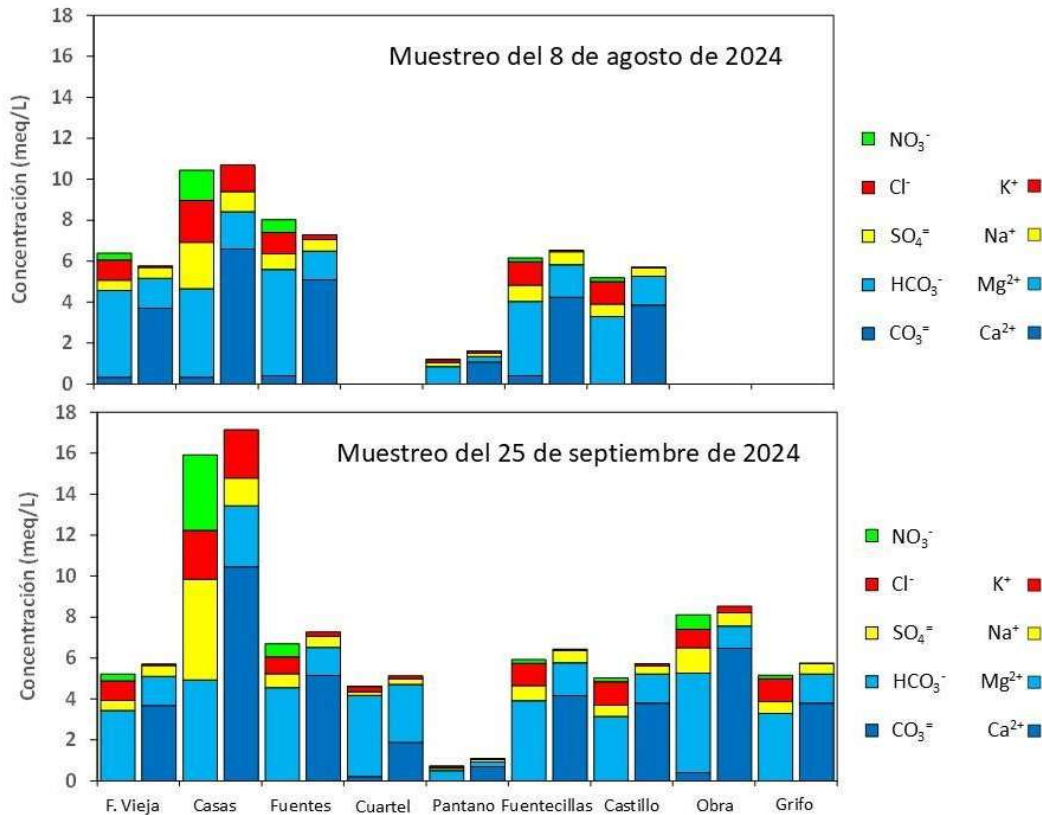


Figura 10. Balance iónico, Cationes, Aniones y Error relativo. Fuente: INAQUAS V1 (IGME), elaboración propia.

Según el manual de INAQUAS, el error inferior a $\pm 5\%$ se considera óptimo y es aceptable a $\pm 10\%$. La mayoría de las muestras presentan errores comprendidos entre $\pm 5\%$ y $\pm 6\%$, lo que indica buena consistencia entre aniones y cationes. No obstante, el error está entre -5.08% y 20.91% , significando desbalance iónico en las muestras del Pantano lo que sugiere la presencia de iones no determinados.

Estos resultados permiten asumir que la calidad de datos es, generalmente, adecuada para su interpretación.

5.5.2. ÍNDICES D'AMORE

A continuación, en la tabla 11, se observan los resultados obtenidos a partir del cálculo de los Índices D' amore:

Tabla 11. Índices D' amore. Fuente: INAQUAS V1 (IGME), elaboración propia.

Muestra	Fecha	A	B	C	D	E	F
Fuente Vieja	08/08/2024	65.16	-0.44	-7.76	-15.73	15.25	53.52
Pozo Casa	08/08/2024	23.72	17.12	-14.41	-7.92	28.63	40.24
Pozo Fuentes	08/08/2024	63.25	3.20	-7.11	-11.58	14.86	58.79
Pantano	08/08/2024	53.35	5.88	-1.15	-5.60	12.10	48.31
Pozo Fuentecillas	08/08/2024	51.10	4.55	-10.80	-14.79	23.91	53.99
Pozo Castillo	08/08/2024	54.06	4.74	-15.02	-17.48	26.09	59.45
Fuente Vieja	25/09/2024	60.55	0.75	-10.19	-15.85	19.00	54.00
Pozo Casa	25/09/2024	-0.07	32.38	-11.56	-9.48	38.13	39.32
Pozo Fuentes	25/09/2024	63.42	3.90	-5.92	-11.22	14.67	60.38
Pozo Cuartel	25/09/2024	86.34	-1.40	-0.91	-50.04	1.77	28.55
Pantano	25/09/2024	52.80	6.89	-3.00	-11.52	13.85	45.71
Pozo Fuentecillas	25/09/2024	55.53	3.26	-9.20	-15.23	21.18	54.30
Pozo Castillo	25/09/2024	53.18	4.53	-16.44	-17.44	26.19	57.46
Fuente Obra	25/09/2024	51.71	9.94	-5.17	-4.87	19.11	64.41
Grifo	25/09/2024	54.68	2.82	-13.61	-15.83	24.36	56.57

- Índice A (alcalinidad total): Los valores elevados en la mayoría de las muestras reflejan la fuerte influencia de la disolución de carbonatos (CaCO_3 , MgCO_3), que aportan concentraciones significativas de bicarbonato. Esto es coherente con la facies bicarbonatada cálcica dominante en la zona.
- Índice B (relación de magnesio): Presenta cierta variabilidad entre captaciones, con valores más altos en el Pozo Casa y Pozo Cuartel, lo que sugiere una mayor participación de materiales dolomíticos o yesos magnesianos en la disolución. En contraste, en otras captaciones predomina el calcio frente al magnesio, lo que confirma la influencia diferencial de la litología local sobre cada acuífero.
- Índices C y D (procesos de intercambio iónico y evolución química): Algunos valores negativos, especialmente en Pozo Cuartel y Pantano, apuntan a procesos de dilución por recarga rápida o a fenómenos de intercambio catiónico, donde parte del Ca^{2+} y Mg^{2+} presentes en el agua son sustituidos por Na^+ en el complejo de cambio del suelo. Estos resultados son coherentes con los valores negativos de ICB (índice de cambio de bases) en esos mismos puntos.



- Índice E (equilibrio calcita-dolomita): Los valores elevados en varios pozos sugieren una evolución química más marcada hacia aguas bicarbonatadas cálcico-magnésicas, indicando que la disolución de dolomías locales también juega un papel en la mineralización.
- Índice F (grado de mineralización): Los resultados confirman que la mayoría de las aguas presentan baja a media mineralización, salvo en captaciones como Pozo Casa, donde el grado de mineralización es mayor debido a la alta dureza y a las concentraciones elevadas de calcio y magnesio.

En resumen, la señal hidroquímica de las captaciones de Used se organiza en torno a un dominio bicarbonatado cálcico que refleja el control litológico de medios carbonatados y margosos. La alcalinidad alta (Índice A de D'Amore) y la predominancia de $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ en Piper sostienen este patrón de base, con conductividades moderadas ($\approx 450\text{--}600 \mu\text{S}/\text{cm}$) en la mayor parte de pozos y manantiales durante condiciones ordinarias. La consecuencia operativa es un pH cercano a la neutralidad–ligeramente básico y una dureza mayoritariamente dura ($200\text{--}330 \text{ mg/L CaCO}_3$), técnicamente manejable, pero con riesgo de incrustación en redes y equipos.

5.5.3. RELACIONES IÓNICAS ENTRE COMPUESTOS

A continuación, en la tabla 12 se muestran las diferentes relaciones iónicas entre diferentes compuestos. El objetivo es reflejar el desequilibrio físico-químico existente entre las concentraciones de estos iones, para así identificar características hidrogeológicas imprescindibles para desarrollar una correcta caracterización de las facies de estas aguas.

Tabla 12. Relaciones iónicas Magnesio/Calcio (Mg/Ca), Potasio/Sodio (K/Na), Sodio/Calcio (Na/Ca), Sodio/Calcio+Magnesio (Na/Ca+Mg). Fuente: INAQUAS V1 (IGME), elaboración propia.

Muestra	Fecha	Mg/Ca	K/Na	Na/Ca	Na/Ca +Mg
Fuente Vieja	08/08/2024	0.39	0.15	0.15	0.10
Pozo Casa	08/08/2024	0.28	1.32	0.15	0.12
Pozo Fuentes	08/08/2024	0.28	0.41	0.11	0.09
Pantano	08/08/2024	0.26	0.55	0.17	0.14
Pozo Fuentesillas	08/08/2024	0.38	0.11	0.15	0.11
Pozo Castillo	08/08/2024	0.37	0.11	0.11	0.08
Fuente Vieja	25/09/2024	0.39	0.13	0.14	0.10
Pozo Casa	25/09/2024	0.29	1.73	0.13	0.10
Pozo Fuentes	25/09/2024	0.27	0.36	0.11	0.09
Pozo Cuartel	25/09/2024	1.51	0.56	0.14	0.06
Pantano	25/09/2024	0.35	0.61	0.16	0.12
Pozo Fuentesillas	25/09/2024	0.38	0.09	0.15	0.11
Pozo Castillo	25/09/2024	0.37	0.27	0.11	0.08
Fuente Obra	25/09/2024	0.17	0.48	0.10	0.09
Grifo	25/09/2024	0.37	0.09	0.13	0.10

Refleja el cociente entre las concentraciones iónicas de los anteriores compuestos.

- Relación Mg/Ca: es indicador de la mineralogía dominante de la zona de recarga y del grado de evolución química del agua. Los valores <0,5 suelen asociarse a disolución de calcita (predominio de Ca^{2+}). En Pozo Cuartel se ha obtenido un valor >1, puede sugerir procesos de intercambio iónico o aportes externos de magnesio, causados por dolomitas locales o disolución de yesos magnesianos.
- Relación K/Na: indicador para detectar aportes de origen antrópico (fertilizantes potásicos) y ciertos procesos de alteración mineral. En aguas naturales, el potasio suele presentarse en bajas concentraciones por su retención en el complejo de cambio y su baja solubilidad, lo que resulta en valores



bajos de K/Na ($<0,1$). Valores elevados ($>0,2$) pueden indicar aporte agrícola o descomposición de feldspatos/micas.

- Relación Na/Ca : equilibrio entre sodio y calcio, y es muy útil para identificar procesos de intercambio catiónico. Estos valores $<0,5$ indican dominio cálcico típico de aguas bicarbonatadas y poca evolución química.
- Relación $Na/(Ca+Mg)$: pondera el sodio frente a la suma de cationes alcalinotérreos y es muy utilizada para evaluar la aptitud para riego (índice de sodicidad). Valores $<0,3$ se consideran seguros para la mayoría de los cultivos y suelos.

La lectura de relaciones iónicas (Tabla 16) ayuda a separar procesos: $Mg/Ca <0,5$ en casi todas las captaciones confirma la disolución de calcita como control de base; Pozo Cuartel (1,51) señala participación dolomítica; K/Na es el trazador más diagnóstico y ubica inequívocamente a Pozo Casa bajo presión agronómica (1,32→1,73), mientras Na/Ca y $Na/(Ca+Mg)$ generalizados bajos ratifican el dominio cálcico y la baja sodicidad para riego (coherente con Wilcox/FAO) (O.E.2). Esta inferencia geoquímica, apoyada por los índices de INAQUAS (D'Amore: A–F), integra litología (calcita/dolomía), intercambio catiónico (ICB negativo en Casa/Cuartel) y recarga rápida (Pantano), reforzando la traducción de procesos a gestión.

5.5.4. ÍNDICE DE CAMBIO DE BASES (ICB)

Por otra parte, la tabla 13 muestra el Índice de Cambio de Bases (ICB, representado en sus dos formulaciones, ICB e ICB⁻). Es un diagnóstico hidrogeoquímico que compara las fracciones Na⁺+K⁺ frente a aniones mayoritarios para detectar la dirección del intercambio catiónico entre el agua y el complejo de cambio del medio (arcillas, margas, evaporitas). Valores positivos indican intercambio inverso (el agua “pierde” Na⁺/K⁺ y “gana” Ca²⁺/Mg²⁺), típico de recarga carbonatada y dominio cálcico; valores negativos señalan intercambio directo (el agua “gana” Na⁺/K⁺ a costa de Ca²⁺/Mg²⁺), habitual cuando hay contacto con arcillas/evaporitas, mayor tiempo de residencia o aportes salinos.

En este trabajo, el ICB es un parámetro clave para explicar procesos, interpretar riesgos y aptitud y priorizar gestión. Esta interpretación es, además, consistente con el resto de los índices (INAQUAS V1) usados en el estudio.

Tabla 13. Índice de intercambio de bases. Fuente: INAQUAS V1 (IGME), elaboración propia.

Muestra	Fecha	ICB	ICB(-)
Fuente Vieja	08/08/2024	0.37	0.07
Pozo Casa	08/08/2024	-0.12	-0.03
Pozo Fuentes	08/08/2024	0.23	0.04
Pantano	08/08/2024	-0.91	-0.13
Pozo Fuentecillas	08/08/2024	0.38	0.09
Pozo Castillo	08/08/2024	0.59	0.16
Fuente Vieja	25/09/2024	0.37	0.08
Pozo Casa	25/09/2024	-0.56	-0.10
Pozo Fuentes	25/09/2024	0.08	0.01
Pozo Cuartel	25/09/2024	-0.55	-0.04
Pantano	25/09/2024	-0.91	-0.14
Pozo Fuentecillas	25/09/2024	0.38	0.08
Pozo Castillo	25/09/2024	0.55	0.16
Fuente Obra	25/09/2024	-0.08	-0.01
Grifo	25/09/2024	0.51	0.14

Valores positivos de ICB → Indican intercambio inverso, en el que Ca²⁺ y Mg²⁺ del agua sustituyen al Na⁺ y K⁺ adsorbidos en el medio sólido. Característico de aguas asociadas a predominio de carbonato cálcico y con poca evolución química.



Valores negativos de ICB \rightarrow Señalan intercambio directo, en el que Na^+ y K^+ del agua reemplazan a Ca^{2+} y Mg^{2+} adsorbidos en el acuífero. Se asocia a aguas más evolucionadas y presencia de arcillas o intrusión de aguas salinas.

La tendencia general es de ICB positivo, lo que confirma la predominancia de procesos de recarga de calcio y magnesio. Es coherente con la litología carbonatada dominante y ausencia generalizada de sodificación.

Sin embargo, las que presentan ICB negativo indican un mayor tiempo de residencia y contacto prolongado con materiales arcillosos o evaporíticos ricos en sodio.

Desde el punto de vista hidroquímico, el ICB negativo en algunos puntos puede ser un indicador temprano de procesos de sodificación o salinización.

El ICB del Pantano ($-0,91$) se repite en agosto y septiembre, señalando intercambio directo persistente en un sistema superficial/diluido (Na y K muy bajos, Cl^- bajo tras lluvias) con alta sensibilidad a eventos. Es coherente con la baja mineralización ($\text{SDT} \approx 122 \rightarrow 97$ mg/L; $\text{CE} 117 \rightarrow 75$ $\mu\text{S}/\text{cm}$) y con los errores de balance iónico elevados tras lluvia ($\approx 14,7$ – $20,9$ %), que reflejan dilución rápida e iones no determinados. Si se valora como recurso, exige tratamiento completo y vigilancia post-evento.

El ICB de Pozo Casa pasa de $-0,12$ (08/08) a $-0,56$ (25/09), es decir, se intensifica tras las lluvias, lo que cuadra con arrastre superficial y conectividad suelo–acuífero en zona agrícola. La coherencia es total con los cocientes K/Na extremos ($1,32 \rightarrow 1,73$) y con el aumento de $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}/\text{SDT}$ en septiembre (Cl^- 300 mg/L; SO_4^{2-} 237 mg/L; SDT 1.316 mg/L), además de los nitratos >50 mg/L en ambas campañas.

Resultado: intercambio directo + presión agronómica, no apta para consumo por NO_3^- y riesgo organoléptico/corrosivo por Cl^- , lo que obliga a exclusión o tratamiento específico (p. ej., desnitrificación) y protección perimetral con control de abonado K/N .

El ICB de Pozo Cuartel ($-0,55$ (25/09)) acompaña a una facies bicarbonatada magnésica ($\text{Mg}/\text{Ca} = 1,51$; $\text{Mg} = 34$ mg/L), propia de dolomías/yesos magnesianos y de procesos de intercambio. La no conformidad microbiológica (*E. coli*) detectada en este punto añade vulnerabilidad sanitaria, por lo que la prioridad es rehabilitación sanitaria (cabeza de pozo, cementación, drenajes...) y desinfección antes de reconsiderar su uso.

El ICB de Fuente Obra ($-0,08$ (25/09)) sugiere intercambio directo moderado. Este patrón es coherente con la señal de potasio anómalo descrita para esta fuente en la evaluación global, que la sitúa —junto con Pozo Casa— como punto a vigilar en términos de aporte difuso.

Recomendable un seguimiento de K , Na , Cl , NO_3^- tras episodios de lluvia.

Fuente Vieja ($\approx 0,37$), Pozo Fuentecillas ($\approx 0,38$), Pozo Castillo ($\approx 0,55$), Pozo Fuentes ($0,23 \rightarrow 0,08$) y Grifo ($0,51$) mantienen intercambio inverso, típico de aguas bicarbonatadas cálcicas con poca evolución y ausencia de sodificación.

En Pozo Castillo el ICB alto ($\approx 0,55$) refuerza su papel como fuente estable para abastecimiento.

5.5.5. SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS (TSD)

A continuación, en la tabla 14 se reflejan los valores obtenidos de Sólidos Totales Disueltos (TSD) medidos en mg/L:

Tabla 14. Sólidos Totales Disueltos (TSD) medido en mg/L. Fuente: INAQUAS V1(IGME), elaboración propia.

Muestra	Fecha	TSD (mg/L)
Fuente Vieja	08/08/2024	351
Pozo Casa	08/08/2024	736
Pozo Fuentes	08/08/2024	439
Pantano	08/08/2024	122
Pozo Fuentecillas	08/08/2024	381
Pozo Castillo	08/08/2024	354
Fuente Vieja	25/09/2024	378
Pozo Casa	25/09/2024	1316
Pozo Fuentes	25/09/2024	483
Pozo Cuartel	25/09/2024	240
Pantano	25/09/2024	97
Pozo Fuentecillas	25/09/2024	387
Pozo Castillo	25/09/2024	372
Fuente Obra	25/09/2024	556
Grifo	25/09/2024	384

Hace referencia al sumatorio de todas las sales inorgánicas y pequeñas cantidades de materia orgánica disueltas en el agua.

Se clasifican según la siguiente tabla 15:

Tabla 15. Clasificación de calidad del agua. Fuente: INAQUAS V1(IGME), elaboración propia.

Agua de excelente calidad	< 500 mg/L
Buena calidad	500–1000 mg/L
De alta mineralización	>1000 mg/L

Se consideran todas las aguas de excelente calidad, buena calidad y de alta mineralización.

5.5.6. DUREZA MG/L DE CaCO₃

Por otra parte, en la tabla 16, se muestra una caracterización de las aguas muestreadas en las dos fechas de recogida, se ha resumido únicamente a la dureza medida en mg/L de CaCO₃.

Tabla 16. Dureza. Fuente: INAQUAS V1(IGME), elaboración propia.

Muestra	Fecha	Dureza (mg/L)
Fuente Vieja	08/08/2024	257.7
Pozo Casa	08/08/2024	421.0
Pozo Fuentes	08/08/2024	324.7
Pantano	08/08/2024	66.8
Pozo Fuentecillas	08/08/2024	291.6
Pozo Castillo	08/08/2024	263.0
Fuente Vieja	25/09/2024	255.6
Pozo Casa	25/09/2024	672.0
Pozo Fuentes	25/09/2024	325.7
Pozo Cuartel	25/09/2024	235.7
Pantano	25/09/2024	46.02
Pozo Fuentecillas	25/09/2024	288.11
Pozo Castillo	25/09/2024	260.55
Fuente Obra	25/09/2024	377.79
Grifo	25/09/2024	260.80

Se refiere a la concentración de Calcio (Ca²⁺) y magnesio (Mg²⁺) en el agua, se expresa como carbonato cálcico (CaCO₃).

Se clasifica según la siguiente tabla 17:

Tabla 17. Clasificación de agua según su dureza. Fuente: INAQUAS manual, elaboración propia.

Blanda	<75 mg/L CaCO ₃
Semidura	75–150 mg/L CaCO ₃
Dura	150–300 mg/L CaCO ₃
Muy dura	>300 mg/L CaCO ₃



Por lo que se afirma que las aguas comprenden todas las categorías clasificadas como Blandas, Semiduras, Duras y Muy duras. Cabe destacar las superaciones en las muestras Pozo Huerto en las dos tomas, en Fuente plaza de la obra y en Pozo Fuentes.

La superación en Pozo Fuentes al ser la toma de agua que abastece a las fuentes públicas es la más preocupante de todas, además se observa un proceso de calcificación del agua a lo largo de la red de distribución a fuentes públicas, siendo mayor el valor de la dureza de la Fuente de la Plaza de la Obra que el del punto de captación.

Se propone tomar medidas como el ablandamiento del agua con cal o sosa, que incentiva la precipitación del calcio y el magnesio como carbonatos, o la mezcla de agua con menor dureza.

5.6. CLASIFICACIÓN DE AGUAS PARA CONSUMO HUMANO

La aptitud sanitaria de las aguas se ha evaluado con arreglo al RD 3/2023, que establece que una muestra es apta si cumple simultáneamente: todos los valores paramétricos de las Partes A (microbiológicos) y B (químicos) del Anexo I, y no supera los valores de aptitud indicados en las notas de la Parte C (parámetros indicadores). La superación de los valores de la Parte C, por sí sola, no implica “no aptitud”, aunque exige medidas correctoras y seguimiento reforzado (RD 3/2023).

En este marco, los criterios determinantes aplicados han sido: *E. coli* = 0 UFC/100 mL (Parte A); nitrato 50 mg/L, nitrito 0,50 mg/L y fluoruro 1,5 mg/L (Parte B); y, como indicadores de calidad de la Parte C, pH 6,5–9,5, sodio 200 mg/L, sulfato 250 mg/L, cloruro 250 mg/L y amonio 0,50 mg/L (con los valores de aptitud y notas específicos recogidos en el propio anexo). Para nitrato y nitrito se ha tenido en cuenta, cuando procede, la condición de potabilización $[\text{NO}_3^-]/50 + [\text{NO}_2^-]/3 \leq 1$ (nota 6).

Conviene distinguir, asimismo, que calcio (100 mg/L), magnesio (30 mg/L), dureza total (500 mg/L CaCO_3) y potasio (10 mg/L) figuran en la Parte F (Caracterización de las aguas) como valores de referencia informativos, útiles para describir la mineralización y prevenir problemas de corrosión/incrustación, pero no deciden la “aptitud” sanitaria.

Los resultados del estudio de aptitud quedan reflejados en la tabla 18.

Tabla 18. Clasificación de aguas aptas y no aptas para consumo humano. Fuente: Gobierno de España, RD 3/2023, elaboración propia.

Muestra	Fecha	Aptitud según RD 3/2023
Fuente Vieja	08/08/2024	APTA
Pozo Casa	08/08/2024	NO APTA
Pozo Fuentes	08/08/2024	APTA
Pantano	08/08/2024	APTA
Pozo Fuentecillas	08/08/2024	APTA
Pozo Castillo	08/08/2024	APTA
Fuente Vieja	25/09/2024	APTA
Pozo Casa	25/09/2024	NO APTA
Pozo Fuentes	25/09/2024	APTA
Pozo Cuartel	25/09/2024	APTA
Pantano	25/09/2024	NO APTA (<i>E. coli</i>)
Pozo Fuentecillas	25/09/2024	APTA
Pozo Castillo	25/09/2024	APTA
Fuente Obra	25/09/2024	APTA
Grifo	25/09/2024	APTA



Las muestras de Pozo Casa y Pozo Cuartel son las únicas clasificadas como no aptas para consumo humano.

Los resultados muestran una no conformidad microbiológica en Pozo Cuartel, con *E. coli* = $3,4 \cdot 10^3 \pm 1,3 \cdot 10^3$ UFC/100 mL, lo que determina NO APTITUD sanitaria inmediata. Muy probablemente está debido al largo tiempo que lleva en desuso con su consiguiente inexistencia de mantenimiento y limpieza.

La contaminación fecal indica deficiencias de protección sanitaria de la captación (sellado, coronación, drenajes, bombeo, proximidad a focos fecales o escorrentías). Se recomienda corrección estructural (impermeabilización del brocal, ventilación protegida, drenaje perimetral), desinfección y verificación hasta obtener series de *E. coli* = 0 (Parte A), integrándolo en un Plan de Seguridad del Agua conforme al enfoque basado en riesgos del RD 3/2023.

En cuanto a los nitratos, el Pozo Casa supera el límite legal en ambas fechas (72 mg/L el 08/08 y 84 mg/L el 25/09), por lo que NO ES APTO para consumo humano conforme a la Parte B; el conjunto restante de captaciones mantiene concentraciones por debajo de 50 mg/L.

La persistencia y el incremento de nitratos (72→84 mg/L) sugieren una carga difusa de origen agrario (lixiviación de fertilizantes y movilidad del NO_3^- en periodos de recarga). La corrección pasa por medidas en origen (ajuste agronómico de fertilización, franjas de protección y gestión del riego) y, si se pretende mantener la captación, tratamiento específico de desnitrificación o mezcla con recursos conformes, evaluando siempre la condición $[\text{NO}_3^-]/50 + [\text{NO}_2^-]/3 \leq 1$ tras potabilización.

Más allá de estas no conformidades (Partes A y B del RD 3/2023), se constatan excesos en indicadores de la Parte C que requieren gestión. Destacan los cloruros en Pozo Casa (≈ 263 mg/L el 08/08 y 300 mg/L el 25/09, >250 mg/L), situación asociada a mineralización elevada y potencial corrosividad, pero que no cambia por sí sola la calificación sanitaria (exige medidas correctoras según nota 9). El resto de los indicadores evaluados (pH dentro de 6,5–9,5; amonio $\leq 0,07$ mg/L; sodio ≤ 31 mg/L; sulfatos ≤ 237 mg/L; conductividad muy inferior a 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) se mantienen dentro de los rangos normativos para las muestras analizadas.

5.7. CLASIFICACIÓN DE AGUAS PARA USO AGRÍCOLA

En este apartado queda reflejado un resumen de resultados, en la tabla 19, obtenidos para la evaluación de aptitud del agua para uso agrícola. Siguiendo los criterios para evaluación de la aptitud de las aguas para uso agrícola, riego, recogidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) en la guía desarrollada por Ayers y Westcot (1985). Además de una clasificación de salinidad y sodicidad propuesta por Wilcox (1955), y las recomendaciones de la norma UNE 77303:2001 sobre requisitos de calidad del agua para riego en España.

Tabla 19. Aptitud de las aguas para riego, Sodio, Calcio y Magnesio medidos en mg/L. Fuente: FAO, Wilcox, elaboración propia.

Muestra	Fecha	Sodio	Calcio	Magnesio	Na_meq	Ca_meq	Mg_meq	RAS	%Na	Clasificación FAO
Fuente Vieja	08/08/2024	12.359	74.269	17.571	0.538	3.706	1.445	0.33	0.09	Apta para riego
Pozo Casa	08/08/2024	22.632	131.915	22.262	0.984	6.583	1.831	0.48	0.10	Apta para riego
Pozo Fuentes	08/08/2024	12.973	101.837	17.115	0.564	5.082	1.408	0.31	0.08	Apta para riego
Pantano	08/08/2024	4.182	21.309	3.312	0.182	1.063	0.272	0.22	0.12	Apta para riego
Pozo Fuentecillas	08/08/2024	14.517	84.781	19.424	0.631	4.231	1.598	0.37	0.10	Apta para riego
Pozo Castillo	08/08/2024	9.383	77.151	17.099	0.408	3.850	1.407	0.25	0.07	Apta para riego
Fuente Vieja	25/09/2024	12.136	73.673	17.408	0.528	3.676	1.432	0.33	0.09	Apta para riego
Pozo Casa	25/09/2024	31.19	209.426	36.243	1.357	10.450	2.981	0.52	0.09	Apta para riego
Pozo Fuentes	25/09/2024	12.722	103.015	16.638	0.553	5.140	1.369	0.31	0.08	Apta para riego
Pozo Cuartel	25/09/2024	6.11	37.648	34.403	0.266	1.879	2.830	0.17	0.05	Apta para riego
Pantano	25/09/2024	2.562	13.663	2.894	0.111	0.682	0.238	0.16	0.11	Apta para riego
Pozo Fuentecillas	25/09/2024	14.165	83.423	19.395	0.616	4.163	1.595	0.36	0.10	Apta para riego
Pozo Castillo	25/09/2024	9.349	76.206	17.077	0.407	3.803	1.405	0.25	0.07	Apta para riego
Fuente Obra	25/09/2024	15.191	129.77	13.082	0.661	6.476	1.076	0.34	0.08	Apta para riego
Grifo	25/09/2024	11.503	76.173	17.158	0.500	3.801	1.411	0.31	0.09	Apta para riego



En este marco, todas las muestras analizadas se clasifican como “aptas para riego”, con rangos que van de excelente a buena/admisible según el punto y la fecha (Figura de Wilcox y Tabla 24). La razón es doble: sodicidad muy baja en todo el conjunto ($RAS \approx 0,16-0,52$; %Na bajo), y salinidad baja-moderada (CE mayoritariamente $< 0,75$ dS/m, con un caso en Pozo Casa tras lluvia que sigue siendo utilizable con manejo).

En términos FAO la sodicidad baja implica riesgo nulo de sodificación y baja afectación a la estructura del suelo. En el diagrama de Wilcox (Figura 11), las aguas se sitúan entre “excelente” y “buena-admisible”, en función del %Na y la CE.

La salinidad se considera de baja a media, adecuadas para la mayoría de los cultivos sin restricciones relevantes de lixiviación. El único caso que alcanza un nivel mayor es en Pozo Casa (25/09) ($CE \approx 1,376$ dS/m). Aun así, sigue siendo apta en FAO/UNE con manejo de lavado (fracción de lixiviación y buen drenaje) y cultivos de moderada tolerancia a sales.

El porcentaje de sodio es bajo en todas las muestras (columna “%Na” de Tabla 24), reforzando la ausencia de peligro de sodicidad y la buena aptitud para riego.

5.7.1. DIAGRAMA DE WILCOX

A continuación, se muestra el Diagrama de Wilcox, Figura 11. Representa la calidad de las aguas destinadas para uso agrícola, riego.

El diagrama de Wilcox (1955) clasifica el agua de riego a partir de dos ejes: salinidad (usualmente la CE a 25 °C) y sodicidad (el %Na sobre la suma catiónica). Su utilidad práctica radica en predecir el riesgo de salinización del suelo (por la CE) y el riesgo de sodificación/dispersiones estructurales (por el %Na).

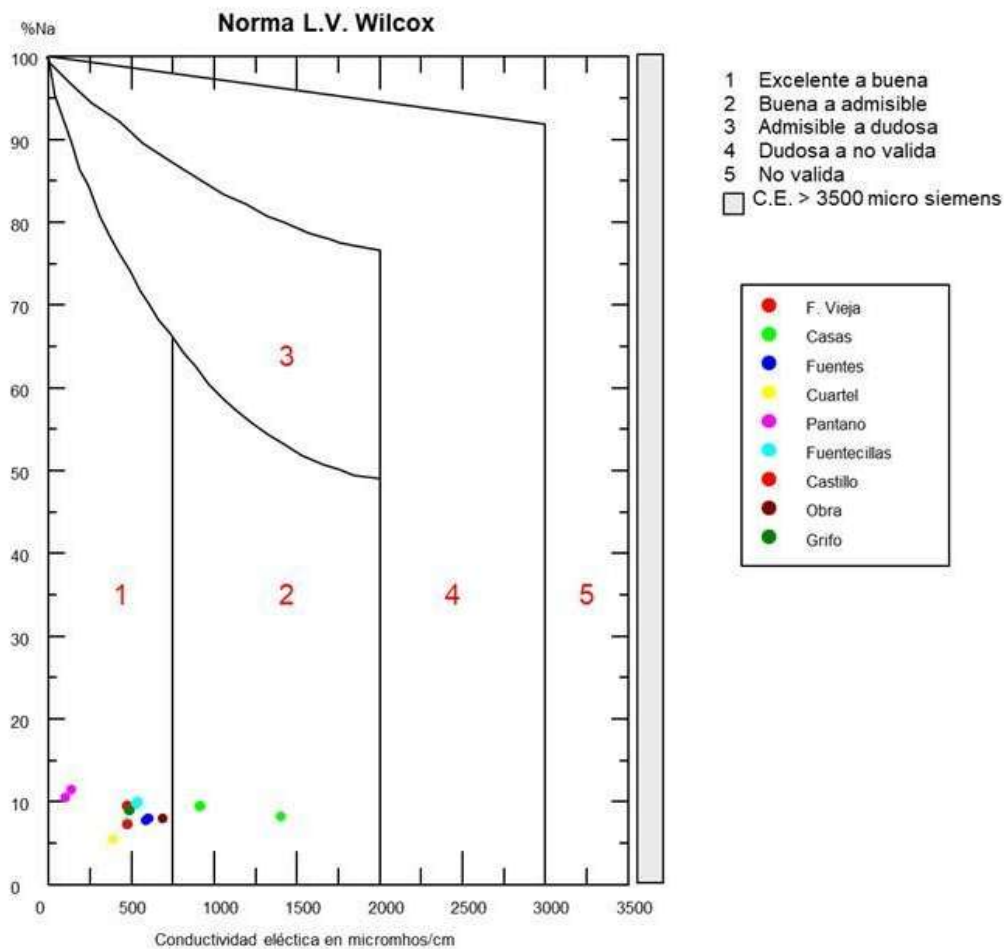


Figura 11. Diagrama Wilcox, aptitud de aguas para riego. Fuente: Fao, Wilcox, elaboración propia.

Los puntos se concentran en la zona de %Na bajo y CE baja a moderada, lo que los sitúa entre las clases “excelente” y “buena-admisible” del Wilcox. En términos generales: no hay riesgo de sodicidad (todas las muestras muestran %Na bajo y RAS ~0,16–0,52) y la salinidad es baja salvo un caso puntual de CE más alta tras lluvia (Pozo Casa), que sigue siendo utilizable con manejo (lixiviación y buen drenaje). Por eso la clasificación final del conjunto es “Apta para riego”, coherente con la Tabla 19.



5.8. COMPARATIVA DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS EN LAS DIFERENTES CAMPAÑAS DE MUESTREO.

A continuación, se muestra, en la Tabla 20, una tabla comparativa de los resultados obtenidos para las muestras en las dos campañas de muestreo, con el fin de ofrecer de una forma mucho más clara y visual, la alteración de la calidad de las aguas y sus características físico-químicas según su nivel freático y dependencia climatológica.

Tabla 20. Comparativa entre los parámetros analizados de la muestra 08/08/2024 y 25/09/2024 (2). Fuente: IGME, elaboración propia.

Nombre	pH	CE 25°C μS/cm	SDT	SST	MO	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ²⁻	F ⁻	Br ⁻	Ca	Mg	Na	K	NH ₄ ⁺	Error*
		μS/cm	mg/l	mg/l	g/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Fuente Vieja	8.15	454	351	3.1	2.1	10	268	24	259	34	0	0	0.19	0.26	74	18	12	3	0.01	-5.1
Fuente Vieja(2)	6.74	447	378	1.3	1.3	0	210	23	210	34	0	0.25	0.19	0.26	74	17	12	3	0.02	4.5
Pozo Casa	8.04	882	736	5.7	2.9	10	273	109	263	72	0.22	0.65	0.14	0.3	132	22	23	51	0	1.2
Pozo Casa(2)	6.84	1376	1316	8.8	4.1	0	300	237	300	84	0.07	0.85	0.11	0.45	209	36	31	92	0	3.7
Pozo Fuentes	8.05	576	439	5.2	2.6	12	329	37	317	36	0	0	0.21	0.26	102	17	13	9	0.01	-4.8
Pozo Fuentes(2)	7.06	568	483	2	2	0	277	34	277	29	0	0.23	0.19	0.22	103	17	13	8	0	4.1
Pozo Cuartel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pozo Cuartel(2)	7.94	364	240	3.3	3.3	6	248	8	242	9	0.05	0	0.16	0.07	38	34	6	6	0.03	5.2
Pantano	7.8	117	122	44.7	8.4	0	51	10	51	5	0	0	0.07	0.07	21	3	4	4	0	14.7
Pantano(2)	7.15	75	97	17.8	5.4	0	30	6	30	3	0.02	0	0.03	0.04	14	3	3	3	0.01	20.9



Nombre	pH	CE 25°C μS/cm	SDT	SST	MO	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ²⁻	F ⁻	Br ⁻	Ca	Mg	Na	K	NH ₄ ⁺	Error*	
		μS/cm	mg/l	mg/l	g/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
Pozo Fuentecillas	8.3	509	381	1.8	1.8	12	234	38	222	40	0	0	0.19	0.36	85	19	15	3	0	3	
Pozo Fuentecillas(2)	6.73	500	387	0.9	0.9	0	239	35	239	38	0	0.24	0.18	0.34	83	19	14	2	0	4.2	
Pozo Castillo	7.86	453	354	1	1	0	201	29	203	39	0	0	0.12	0.35	77	17	9	2	0	4.8	
Pozo Castillo(2)	6.66	448	372	0.9	0.9	0	191	27	191	40	0	0.24	0.12	0.35	76	17	9	4	0	6.5	



El contraste entre las dos campañas de muestreo permite apreciar cómo los factores climáticos condicionan directamente la composición química de las aguas de Used.

-pH: Durante la sequía los valores se situaron en la franja más alcalina (en torno a 8,0–8,3), mientras que tras las precipitaciones de septiembre descendieron hacia valores próximos a la neutralidad (6,7–7,0). Este cambio puede explicarse por la incorporación de agua de recarga, que reduce la concentración relativa de carbonatos responsables de la alcalinidad.

-Conductividad eléctrica y sales disueltas: En la mayor parte de los puntos, la campaña de agosto mostró valores más elevados, indicativos de una mayor mineralización en condiciones de escasez hídrica. Tras las lluvias, la tendencia general fue a la baja, con la excepción del Pozo Casas, donde la conductividad aumentó hasta 1376 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este incremento apunta a la entrada de sales procedentes de la escorrentía agrícola.

-Nitratos: La presencia de nitratos fue alta en ambas fechas, destacando de nuevo el Pozo Casas con valores superiores a los 70–80 mg/L, lo que excede claramente el límite normativo fijado en el RD 3/2023 (50 mg/L). Esta recurrencia señala un aporte continuo de origen agrícola. En el resto de las captaciones los valores se mantuvieron estables y en conformidad con la legislación.

-Cloruros y sulfatos: En septiembre se observó un ligero aumento de estos aniones en varios puntos, como Pozo Casas y Pozo Fuentes, lo que refleja el arrastre de compuestos salinos desde la superficie hacia el acuífero tras los episodios de lluvia.

-Pantano: Fue el punto que mostró mayor variabilidad. La conductividad bajó a 75 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en septiembre frente a los 117 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de agosto, acompañada de una reducción en sólidos suspendidos y materia orgánica. Esta evolución confirma la sensibilidad de las aguas superficiales a los fenómenos de dilución y a la aportación directa de precipitaciones.

-Pozos Fuentecillas y Castillo: Ambos mantuvieron una composición relativamente estable, dentro de la facies bicarbonatada cálcica. Únicamente se registraron ligeras reducciones de pH y dureza en septiembre, lo que apunta a una mayor resiliencia frente a perturbaciones externas y a un comportamiento hidroquímico más estable.

En síntesis, los resultados ponen de manifiesto que la sequía tiende a concentrar sales y aumentar la dureza, mientras que las precipitaciones favorecen procesos de dilución y recarga, aunque también pueden provocar incrementos puntuales de sales y nitratos en acuíferos vulnerables. Este patrón evidencia la necesidad de adaptar el control de calidad a la estacionalidad climática y a la ocurrencia de episodios extremos, prestando especial atención a captaciones con mayor riesgo de contaminación agrícola, como Pozo Casas.



6. CONCLUSIONES

6.1. CONCLUSIÓN HIDROGEOQUÍMICA: PROCESOS QUE GOBIERNAN LA CALIDAD

El sistema de abastecimiento de Used responde a un contexto hidrogeológico carbonatado en el que la facies bicarbonatada cálcica domina la mayor parte de las captaciones. Esto implica pH neutro–ligeramente básico, alcalinidad elevada y dureza estructural, coherente con la disolución de calcita y dolomita y con un poder tampón que estabiliza el pH ante fluctuaciones moderadas de CO_2 disuelto. La alcalinidad (HCO_3^-) y la relación $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ son los ejes del comportamiento químico: cuando $\text{Mg}/\text{Ca} < 0,5$ se impone la señal calcítica; cuando $\text{Mg}/\text{Ca} > 1$ emerge una firma dolomítica/yesífera que, en Used, se asocia a sectores con mayor influencia de margas, dolomías o evaporitas. Esta lectura se refuerza con índices integrados (p. ej., D'Amore), que capturan el tránsito desde aguas jóvenes y poco evolucionadas a aguas más mineralizadas según tiempo de residencia y litología.

Por encima de ese patrón regional, afloran modulaciones locales con significado de gestión. Primero, el intercambio catiónico entre el agua y el complejo de cambio (arcillas) se manifiesta cuando el agua gana Na^+/K^+ y pierde $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ ($\text{ICB} < 0$) o, inversamente, cuando cede Na^+/K^+ y gana $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ ($\text{ICB} > 0$). El ICB negativo acompañado de K/Na alto es típico de entornos con conectividad suelo–acuífero y presión agraria (aporte difuso de fertilizantes potásicos/nitrogenados), mientras que ICB positivo indica aguas cálcicas con menor influencia de arcillas sódicas o evaporitas. Segundo, la firma magnésica local ($\text{Mg}/\text{Ca} > 1$) sugiere dolomías/yesos y, a menudo, intercambio que enriquece el Mg relativo. Tercero, el comportamiento superficial (p. ej., pantanos o manantiales someros) añade baja mineralización y alta sensibilidad a eventos (dilución, aporte de iones no determinados) por tiempos de tránsito cortos.

Estas pruebas convergentes (relaciones iónicas (Mg/Ca , K/Na , Na/Ca , $\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Mg})$), ICB, facies y coherencia del balance iónico) permiten atribuir procesos sin caer en listados numéricos: (i) litología: carbonatada general con enclaves dolomítico–evaporíticos; (ii) recarga y tiempo de residencia: aguas más jóvenes muestran menor mineralización y mayor variabilidad; (iii) presión difusa agrícola: elevaciones anómalas de K y firmas K/Na altas delatan lixiviación de fertilizantes y flujos preferentes; (iv) intercambio catiónico: la dirección ($\text{ICB} \pm$) orienta sobre sodificación potencial del medio por contacto con arcillas. En síntesis, Used es un sistema carbonatado con vulnerabilidades focalizadas donde la hidroquímica cuenta una historia de procesos: donde el ICB es negativo y K/Na es alto, la prioridad es proteger perímetros, mejorar prácticas agronómicas y, si procede, tratar; donde $\text{Mg}/\text{Ca} > 1$, reconocer la influencia dolomítica; donde el recurso es superficial y poco evolucionado, operar con tratamiento robusto y vigilancia post-evento. Este enfoque de procesos (más que de valores) sostiene decisiones operativas, agronómicas y sanitarias con base científica (Ayers & Westcot, 1985; Wilcox, 1955).

6.2. CONCLUSIÓN NORMATIVA Y DE SALUD PÚBLICA: QUÉ FUENTES SIRVEN HOY Y POR QUÉ

El RD 3/2023 reordena la calidad del agua de consumo bajo tres pilares: Parte A (microbiológica) y Parte B (química) (determinantes de aptitud) y Parte C (indicadores) (parámetros de seguimiento que no descalifican por sí solos, pero obligan a gestionar), completados por Parte F (caracterización, p. ej., Ca, Mg, dureza, K). Una conclusión sanitaria no es una media aritmética: es el veredicto de cumplimiento de A y B y la gestión de C. En Used, el cuadro es inequívoco: las captaciones conformes (A y B) son aptas y deben priorizarse para suministro; dos captaciones no son aptas en su estado actual (una por nitratos (químico, Parte B) y otra por *E. coli* (microbiológico, Parte A)) y requieren intervenciones proporcionadas al riesgo antes de su retorno.

Desde salud pública, los riesgos asociados son conocidos y prevenibles. Los nitratos implican riesgo de metahemoglobinemia en lactantes y preocupaciones crónicas a largo plazo (WHO, 2011); requieren medidas en origen (agronomía, protección de perímetros) y, si el recurso se mantiene, tratamientos específicos (desnitrificación biológica/ion-exchange/ósmosis) con post-remineralización. La contaminación fecal (*E. coli*) supone riesgo gastrointestinal y demanda una barrera sanitaria física en la captación (coronación estanca, camisa y cementación, drenajes perimetrales, control de accesos...) y desinfección verificada. En ambos casos, el RD 3/2023 y las Guías de la OMS recomiendan el tránsito desde un control reactivo a un enfoque basado en riesgos, articulado en Planes de Seguridad del Agua (PSA): identificar peligros, cuantificar riesgos, definir puntos críticos, fijar umbrales de actuación, documentar medidas de control y verificar su eficacia (BOE, 2023; WHO, 2017).

Los indicadores (Parte C) (p. ej., cloruros, turbidez, pH, amonio, dureza) no determinan por sí solos la aptitud, pero anticipan problemas de operación (corrosividad, incrustación, aceptabilidad). Su gestión (ajuste de pH, elección de materiales, control del índice de saturación, limpieza de depósitos, mezclas) es esencial para mantener la calidad en red y reducir quejas. Además, parámetros de caracterización (Parte F) como Ca/Mg/dureza/K contextualizan el riesgo agronómico (riego) y la vida útil de infraestructuras.

En resumen, la aptitud se decide por las partes A y B; la resiliencia se construye gestionando C y F. Por tanto, Used puede abastecer con seguridad si prioriza las captaciones conformes, excluye temporalmente las no conformes y aplica medidas correctoras. La comunicación de riesgos a población sensible (lactantes/embarazadas ante nitratos; avisos por alteraciones microbiológicas) y la documentación PSA alineada con RD 3/2023 completan el cuadro. Este enfoque no es discutible estéticamente: reduce exposición, minimiza litigios y optimiza recursos al dirigir el esfuerzo al riesgo real (BOE, 2023; WHO, 2011; APHA, 2017).

6.3. VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO: RIESGOS EMERGENTES Y RESPUESTA

El comportamiento observado entre estiaje y post-lluvia confirma que el sistema responde rápidamente a la meteorología: en estiaje predominan la concentración salina y la estabilidad relativa; tras precipitaciones se observa dilución de salinidad y, en puntos vulnerables, pulsos difusos (incrementos de $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-/\text{K}$ o episodios microbiológicos). Esta ciclicidad evento-dependiente es característica de acuíferos someros en medios carbonatados con usos agrarios: tiempos de tránsito cortos, preferencias de flujo y escalones de recarga que movilizan solutos y microorganismos desde el suelo al agua subterránea o superficial. El balance iónico admite dispersión post-evento (iones no determinados), y la turbidez o el color pueden desviarse por material particulado.

Bajo cambio climático, la evidencia europea sugiere más olas de calor, estiajes más prolongados y precipitaciones intensas más frecuentes (AEMA/EEA, 2023). En sistemas como Used, se esperarán: (i) picos microbiológicos ligados a escorrentía intensa y reentradas en captaciones superficiales o someras; (ii) pulsos químicos (NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , K) por lixiviación de suelos agrícolas y movilización desde zonas no saturadas; (iii) variabilidad organoléptica (turbidez, color, sabor) con impacto en satisfacción del usuario; (iv) riesgo operativo por incremento de corrosión/incrustación cuando se alteran pH/dureza/ CO_2 en mezclas y por estrés térmico en redes. La exposición no se elimina con más muestreos “fijos”, sino con gobernanza adaptativa.

La respuesta estratégica pasa por un PSA preocupado por el cambio climático: (1) triggers post-evento: definir umbrales de activación (p. ej., lluvia acumulada $>20-30$ mm/24-48 h, subida de CE >20 %/48 h, turbidez en captación $>1-2$ UNF) que disparen muestreos específicos, cambios de régimen de mezcla, elevación de dosis de desinfección (controlando subproductos) o exclusión temporal de fuentes vulnerables; (2) telemetría: dotar a cabecera de CE/pH en continuo y, si es viable, turbidez on-line; (3) portafolio de fuentes: mantener fuentes estables (p. ej., pozos con ICB positivo y facies cálcicas robustas) como base, reservando recursos vulnerables para emergencia o mezclas; (4) medidas en origen: agronomía climáticamente inteligente (ajuste de dosis/época de abonado, manejo de riego y cubiertas vegetales, franjas tampón) para amortiguar pulsos difusos; (5) plan de comunicación: avisos estandarizados a población sensible y protocolos con Atención Primaria ante episodios que comprometan aptitud. Esta arquitectura adaptativa convierte la variabilidad en un escenario gestionable, reduce el tiempo de exposición y alinea la operación municipal con la gestión basada en riesgos que exige el RD 3/2023 (BOE, 2023; EEA, 2023).

6.4. EVALUACIÓN SANITARIA INTEGRADA Y MEDIDAS CORRECTORAS/PREVENTIVAS

Microbiología (Parte A). La barrera sanitaria empieza fuera del laboratorio. Una captación con coronación no estanca, camisa/cementación deficiente, drenajes inexistentes o entorno sin control es vulnerable a intrusiones fecales, sobre todo tras lluvias.

Cualquier punto con *E. coli* detectada debe cerrar temporalmente para consumo y rehabilitar su obra con estándares de captación sanitaria (tapa y ventilación protegidas, sellado de forjados, arquetas estancas, drenajes perimetrales, vallado y control de accesos). Tras la desinfección de choque, la verificación exige series de muestreo con *E. coli* = 0 antes de reabrir. Paralelamente, la desinfección operativa (cloración, UV) debe validarse en términos de Cloro Total (CT) y tiempo de contacto, cuidando subproductos (THM (Trihalometanos), HAA (Ácidos haloacéticos)) con pretratamientos (coagulación/filtración) si la materia orgánica es elevada (APHA, 2017; WHO, 2017).

Química (Parte B): nitratos y sales acompañantes. Frente a NO_3^- , la estrategia efectiva combina medidas en origen y medidas en agua.

En origen: ajuste de abonado N/K, franjas tampón en perímetros de captación, gestión del riego (evitar láminas excedentarias), cubiertas en periodos lluviosos, almacenamiento y manejo adecuando de estiércoles y purines.

En agua: tres rutas probadas: desnitrificación biológica (control de C/N, evitar acumulación de NO_2^-), intercambio iónico (resinas aniónicas; gestión de salmuera de regeneración y riesgos de nitrito transitorio), y ósmosis inversa (alto rechazo; remineralización posterior para estabilizar pH/índice de saturación y proteger la red). Cualquier mezcla debe cumplir tras tratamiento la condición $[\text{NO}_3^-]/50 + [\text{NO}_2^-]/3 \leq 1$, documentada en el PSA (BOE, 2023; WHO, 2011).

Indicadores (Parte C) y operación en red. Aunque cloruros, dureza, sodio o turbidez no descalifican per se, orientan el mantenimiento y la aceptabilidad.

Con cloruros elevados es de importancia evitar materiales vulnerables, mitigar corrosión con ajustes de pH e inhibidores compatibles; con dureza muy alta es recomendable el ablandamiento parcial o mezcla, y limpiezas programadas para controlar incrustaciones en depósitos/instalaciones municipales. La turbidez en salida de ETAP y en red debe cumplir valores de referencia; tras eventos, monitorizar y optimizar coagulación/filtración para asegurar eficacia de desinfección (APHA, 2017; BOE, 2023).

Gobernanza de la salud pública: La comunicación de riesgo no es un añadido: reducir tiempos de exposición y proteger a población sensible exige protocolos claros (avisos automáticos para lactantes/embarazadas ante nitratos, instrucciones de no consumo ante contaminación fecal, puntos de agua alternativa cuando proceda).

Integrarlo con Atención Primaria y Protección Civil acorta la brecha entre detección y acción.

Las auditorías internas del PSA y revisiones anuales (o tras incidentes) mantienen el sistema vivo (WHO, 2017; BOE, 2023).

Como conclusión general, la seguridad sanitaria en Used depende menos de muestreos “fijos” y más de barreras físicas, tratamiento validado y operación adaptativa documentada en el PSA. Es un marco proactivo, proporcional y auditable.

6.5. BUENAS PRÁCTICAS Y PLAN DE SEGURIDAD DEL AGUA (PSA)

Un PSA eficaz traduce la ciencia en procedimientos operativos. Su arquitectura incluye: (1) identificación de peligros (microbiológicos, químicos, físicos) por captación/ETAP/red; (2) análisis y evaluación del riesgo (probabilidad × severidad) con escenarios climáticos; (3) puntos de control y medidas (barreras sanitarias, tratamientos, materiales, mezclas); (4) vigilancia (qué, cómo, dónde, con qué frecuencia, quién) y umbrales de actuación; (5) verificación y auditoría; (6) gestión de cambios y mejora continua (BOE, 2023; WHO, 2017).

La vigilancia centinela y triggers consiste en definir un panel sensible pero operativo: *E. coli*, turbidez, NO_3^- , K, Cl^- , SO_4^{2-} , CE, pH y balance iónico (control de coherencia). Incorporan telemetría (CE/pH y, si es viable, turbidez en continuo) en cabecera.

Se deben establecer triggers: (i) meteorológicos (lluvia acumulada >25 mm/24-48 h), (ii) químicos (ΔCE >20 %/48 h, K/Na >0,3 como alerta agronómica), (iii) operativos (turbidez >1-2 UNF en captación o variaciones de pH fuera de 6,5-9,5). A parte de ello, es necesario activar respuestas escalonadas: reforzar muestreo, ajustar mezcla, modular dosis de desinfección, abrir/cerrar fuentes, informar a población sensible.

La protección de captaciones se podría sintetizar en acciones generales cómo: implementar y señalar Zonas de Protección Sanitaria con restricciones de fertilización y manejo de estiércoles, drenajes perimetrales y control de escorrentías. E

Seguir unos estándares constructivos: corona estanca, camisa y cementación adecuadas, arquetas estancas, ventilaciones protegidas, vallado y control de accesos; manual de mantenimiento con frecuencias y responsables.

Tratamientos y mezcla, trata de establecer pautas de mezcla en frecuencias de análisis (p. ej., fuentes estables como base + fuentes vulnerables en proporciones que garanticen cumplimiento), con reglas de decisión codificadas en el PSA. Se incluye la validación de tratamientos críticos (desnitrificación/RO) con pruebas de rendimiento y monitoreo de efectos colaterales (p. ej., nitrito en arranque).

Otro tema es la calidad en red y materiales: Escoger materiales compatibles con el perfil iónico previsto (cloruros/dureza), controlar el índice de saturación, hacer lavados sectoriales periódicos y limpiezas de depósitos; un cuadro de mando con KPI (Indicadores Clave de Rendimiento) (p. ej., % muestras conformes A/B, tiempo de respuesta a triggers, nº de avisos a población, incidencias de corrosión) profesionaliza la gestión.

La comunicación y formación está basada en la implantación de: Protocolos de alerta (SMS, web municipal) para población sensible ante nitratos/microbiología; formación anual del personal en PSA, muestreo, higiene de obra y mantenimiento; simulacros de incidente (p. ej., intrusión fecal tras tormenta) con evaluación posterior.

Resumiendo, un PSA bien diseñado convierte la incertidumbre climática y las vulnerabilidades locales en una operación controlada, auditable y alineada con RD 3/2023 y las guías OMS.

6.6. TRANSFERIBILIDAD, LIMITACIONES Y PRÓXIMOS PASOS

La Transferibilidad: El flujo metodológico de datos, procesos, decisiones (facies, relaciones iónicas, ICB, balance iónico, contraste normativo y PSA) es replicable en municipios que dependen de acuíferos locales bajo presión agraria. La economía del enfoque radica en centrar la vigilancia en ventanas críticas (fin de estiaje y post-evento) y en indicadores centinela con alto valor de diagnóstico (*E. coli*, turbidez, NO_3^- , K, Cl^- , CE, pH, balance iónico). Este “núcleo duro” reduce costes y maximiza la sensibilidad al riesgo. La arquitectura PSA permite escalar a contextos con ETAP más complejas o redes mayores.

Existen también algunas limitaciones: El estudio se apoya en dos campañas (una con microbiología), lo que acota la inferencia inter-anual. Faltan trazadores específicos (p. ej., fitosanitarios en zonas agrícolas) y series de corrosividad en condiciones reales de red. La hidrodinámica local (heterogeneidad/anisotropía) merecería validación con pruebas de bombeo/ensayos de trazadores para entender la conectividad suelo-acuífero. La baja mineralización en recursos superficiales sugiere explorar carbono orgánico disuelto (COD/UV254) cuando se plantee potabilización robusta, a fin de mitigar subproductos de desinfección.

Próximos pasos (priorizados, realistas y medibles):

1. Serie anual completa de calidad (al menos 6 campañas: fin de invierno, primavera húmeda, inicio de estiaje, estiaje avanzado, primera lluvia, post-evento principal), con microbiología en todas las rondas de puntos sensibles.
2. PSA operativo en un año: riesgos, triggers, recetas de mezcla, telemetría, protocolos de aviso y auditoría interna. KPI: ≥ 99 % muestras conformes en A/B; tiempo de respuesta a trigger < 72 h; 0 incidentes sin aviso.
3. Pilotos de tratamiento para nitratos (desnitrificación) con evaluación, remineralización y gestión de rechazo, y pruebas de arranque para controlar nitritos.
4. Protección perimetral: cartografiar Zonas de Protección Sanitaria, acuerdos con titulares de parcelas (prácticas de fertilización “4R”: fuente, dosis, momento, localización), barreras vegetales y control de escorrentías.
5. Ensayos de corrosividad/incrustación en red con aguas de mezcla representativas; ajustar pH/índice de saturación para proteger materiales.
6. Cartera de financiación: PERTE/Next Generation para obras de captación, telemetría y tratamiento; memoria de beneficios en salud pública y reducción de pérdidas para fortalecer el caso.

El resultado esperado sería un abastecimiento seguro y resiliente, con exposición reducida a contaminantes críticos y capacidad de respuesta a eventos climáticos, en línea con RD 3/2023 y las mejores prácticas internacionales (BOE, 2023; WHO, 2017; APHA, 2017)



7. REFERENCIAS

AENOR – Asociación Española de Normalización. (2006). *UNE-EN 872:2006. Calidad del agua. Determinación de los sólidos en suspensión. Método por filtración sobre filtros de fibra de vidrio*. AENOR.

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). (2025). *Predicción meteorológica para Used (Zaragoza)*. <https://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/municipios/used-id50271>

Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA). (2023). *La cantidad y la calidad del agua son fundamentales para el bienestar*. <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2023/articulos/la-cantidad-y-la-calidad>

American Organization of Analytical Chemists (AOAC). (2005). *Official Methods of Analysis* (18th ed.). AOAC International.

American Public Health Association (APHA). (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). Washington, D.C.

APHA. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.

Asociación Española de Normalización. (2001). *UNE 77303:2001 Calidad del agua. Aguas para riego. Requisitos de calidad*. AENOR.

Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *La calidad del agua para la agricultura* (Estudios Riego y Drenaje, 29 rev. 1). FAO. <https://www.fao.org/3/t0231s/t0231s00.htm>

BOE. (2023). *Real Decreto 3/2023, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro*. Boletín Oficial del Estado. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). (2019). *Manual de drenaje sostenible*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.

Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). (2011). *Caracterización adicional de las masas de agua subterránea*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.chebro.es/documents/20121/420100/ES091MSBT086.pdf>

EEA. (2023). *Water and climate change* (syntheses). European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/>

Gobierno de Aragón. (2015). *Cartografía de abastecimiento de las Infraestructuras del Ciclo del Agua*. Instituto Aragonés del Agua. https://icearagon.aragon.es/fichaDescarga/fichaDescarga_50271000101.html

Gobierno de España. (2022). *Plan de recuperación, transformación y resiliencia. Componente 5: Preservación del ciclo del agua*. <https://planderecuperacion.gob.es/>

Gobierno de España. (2023). *Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro*. Boletín Oficial del Estado, núm. 9, 11 de enero, 3814–3893. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2023-628>

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (s.f.). *Estudio del detalle del borde septentrional de la Sierra de Solorio (Zaragoza)*. https://info.igme.es/SidPDF/018000/499/Estudio%20del%20detalle%20del%20borde%20septentrional%20de%20la%20sierra%20de%20Solorio%20%28Zaragoza%29%20Tomo%20I%20Memoria/18499_0004.pdf

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (s.f.). *INAQUAS V1: Herramienta de interpretación hidroquímica automatizada*. Madrid.



Ministerio de Sanidad. (2023). *Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro. Boletín Oficial del Estado*, 8, 4354–4444.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). *Mejores Técnicas Disponibles para el tratamiento del agua en pequeñas poblaciones*. <https://www.miteco.gob.es/>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2022). *Informe de situación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en España*. Gobierno de España.

Naciones Unidas. (s.f.-a). *Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

Naciones Unidas. (s.f.-b). *Objetivo 13: Acción por el clima*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>

Naciones Unidas. (s.f.-c). *Objetivo 3: Salud y bienestar*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>

Naciones Unidas. (s.f.-d). *Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>

Naciones Unidas. (2019). *Mejorar la gestión de los recursos hídricos para abordar la emergencia climática*. <https://www.un.org/es/cr%C3%B3nica-onu/mejorar-la-gesti%C3%B3n-de-los-recursos-h%C3%ADdricos-para-abordar-la-emergencia-clim%C3%A1tica>

Naciones Unidas. (2022). *El cambio climático pondrá en jaque el acceso al agua potable en la región paneuropea*. <https://news.un.org/es/story/2022/05/1509072>

Naciones Unidas. (s.f.). *El agua: en el centro de la crisis climática*. <https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/water>

Organización Mundial de la Salud. (2004). *Guidelines for Drinking-water Quality. Volume 1: Recommendations* (3rd ed.). WHO.

Organización Mundial de la Salud. (2011). *Nitrate and nitrite in drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. WHO.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2022). *Agua para consumo humano*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

UNESCO. (2023). *Agua y saneamiento - Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

UNESCO. (2024). *Las crisis del agua amenazan la paz mundial (informe)*. <https://www.unesco.org/es/articles/las-crisis-del-agua-amenazan-la-paz-mundial-informe-0>

Unión Europea. (2000). *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas*. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L 327, 1–73.

Unión Europea. (2020). *Directiva (UE) 2020/2184 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2020, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano*. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 435, 1–62.

United States Environmental Protection Agency (EPA). (1993). *Method 410.4: The Determination of Chemical Oxygen Demand by Semi-Automated Colorimetry*. Office of Research and Development, Cincinnati, OH.



WHO. (2011). *Nitrate and Nitrite in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. World Health Organization.

WHO. (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed., incorporating the 1st addendum). World Health Organization.

Wilcox, L. V. (1955). *Classification and use of irrigation waters* (U.S. Department of Agriculture Circular No. 969). United States Salinity Laboratory.

8. ANEXOS

ANEXO I- FOTOGRAFÍAS DE CAMPO DE LOS PUNTOS DE CAPTACIÓN Y TOMA DE MUESTRAS

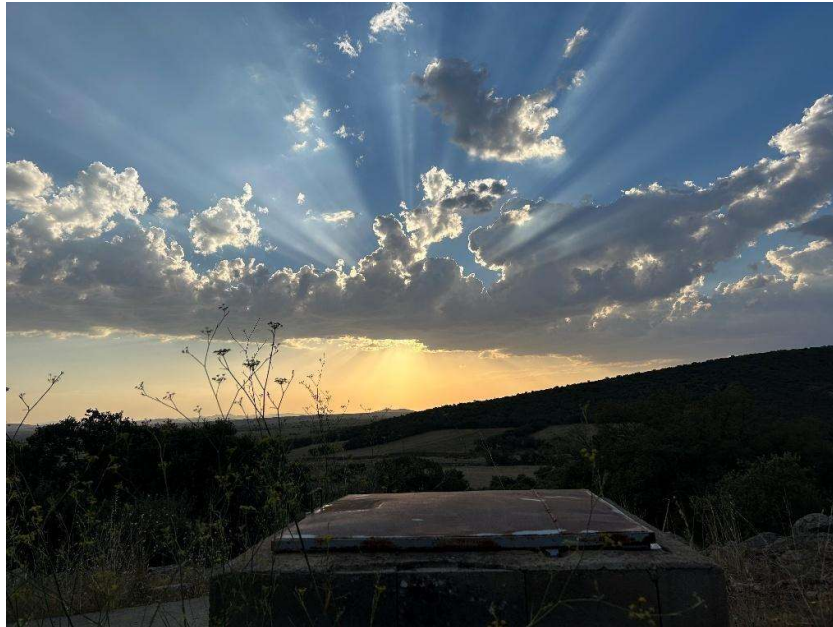


Figura A1: Pozo Castillo. Fuente: Elaboración propia.

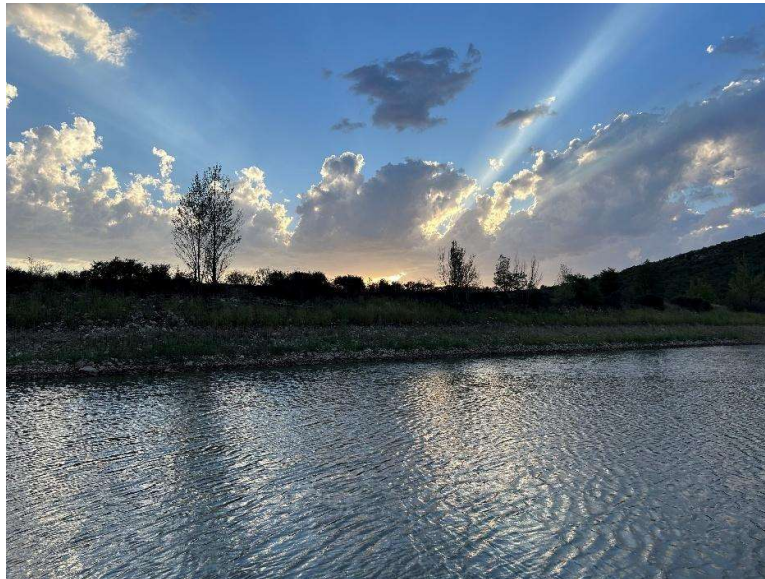


Figura A2: Pantano. Fuente: Elaboración propia.



Figura A3: Fuente Vieja. Fuente: Elaboración propia.



Figura A4: Pozo Fuentes. Fuente: Elaboración propia.



Figura A5: Pozo Cuartel. Fuente: Elaboración propia.



Figura A6: Pozo Casa . Fuente: Elaboración propia.



ANEXO II- PROTOCOLOS SEGUIDOS EN EL MUESTREO Y FICHAS DE CAMPO

- Protocolo de muestreo en campo:

1. Identificación del punto de muestreo mediante coordenadas UTM y nombre local.
2. Registro de condiciones climáticas generales y estado del entorno (precipitación, turbidez visible, uso agrícola cercano).
3. Limpieza del recipiente de muestreo con agua del mismo punto tres veces antes de la recogida final.
4. Recogida de muestra en recipiente estéril (para análisis microbiológico) y en botella de plástico de 0.5L (para físico-químicos).
5. Etiquetado con código, fecha y hora.
6. Transporte en nevera isotérmica a 4°C hasta su procesamiento o envío a laboratorio externo.
7. Rellenado de ficha de campo individual.

- Fichas de campos de las campañas de muestreo:

Tabla A1. Ficha de campo del punto HUERTO POZO. Fuente: Elaboración propia.

Código del punto	UF01
Nombre del punto	Huerto Pozo
Fecha	08/08/2024
Hora	09:00
Coordenadas UTM	(41.0555198, -1.5575564)
Condiciones meteorológicas	Despejado, sequía
Observaciones	—
Técnico responsable	Lorién Barcos Abanto



Tabla A2. Ficha de campo del punto FUENTE VIEJA (MANANTIAL). Fuente: Elaboración propia.

Código del punto	UF02
Nombre del punto	Fuente Vieja (Manantial)
Fecha	08/08/2024
Hora	09:10
Coordenadas UTM	(41.0563119, -1.5615060)
Condiciones meteorológicas	Despejado, sequía
Observaciones	—
Técnico responsable	Lorién Barcos Abanto

Tabla A3. Ficha de campo del punto POZO FUENTES. Fuente: Elaboración propia.

Código del punto	UF03
Nombre del punto	Pozo Fuentes
Fecha	08/08/2024
Hora	09:20
Coordenadas UTM	(41.0546762, -1.5601857)
Condiciones meteorológicas	Despejado, sequía
Observaciones	—
Técnico responsable	Lorién Barcos Abanto



Tabla A4. Ficha de campo del punto PANTANO. Fuente: Elaboración propia.

Código del punto	UF04
Nombre del punto	Pantano
Fecha	08/08/2024
Hora	09:30
Coordenadas UTM	(41.0752184, -1.5511168)
Condiciones meteorológicas	Despejado, sequía
Observaciones	—
Técnico responsable	Lorién Barcos Abanto

Tabla A5. Ficha de campo del punto POZO FUENTECILLAS. Fuente: Elaboración propia.

Código del punto	UF05
Nombre del punto	Pozo Fuentecillas
Fecha	08/08/2024
Hora	09:40
Coordenadas UTM	(41.0776098, -1.5619274)
Condiciones meteorológicas	Despejado, sequía
Observaciones	—
Técnico responsable	Lorién Barcos Abanto



Tabla A6. Ficha de campo del punto POZO CASTILLO. Fuente: Elaboración propia.

Código del punto	UF06
Nombre del punto	Pozo Castillo
Fecha	08/08/2024
Hora	09:50
Coordenadas UTM	(41.0674866, -1.5582397)
Condiciones meteorológicas	Despejado, sequía
Observaciones	—
Técnico responsable	Lorién Barcos Abanto

Tabla A7. Ficha de campo del punto POZO CASA. Fuente: Elaboración propia.

Código del punto	UF07
Nombre del punto	Pozo Casa
Fecha	25/09/2024
Hora	08:30
Coordenadas UTM	(41.0548236, -1.5598112)
Condiciones meteorológicas	Chubascos leves
Observaciones	—
Técnico responsable	Lorién Barcos Abanto



Tabla A8. Ficha de campo del punto FUENTE VIEJA (MANANTIAL). Fuente: Elaboración propia.

Código del punto	UF08
Nombre del punto	Fuente Vieja (Manantial)
Fecha	25/09/2024
Hora	08:40
Coordenadas UTM	(41.0537645, -1.5594393)
Condiciones meteorológicas	Chubascos leves
Observaciones	—
Técnico responsable	Lorién Barcos Abanto

Tabla A9. Ficha de campo del punto POZO FUENTES. Fuente: Elaboración propia.

Código del punto	UF09
Nombre del punto	Pozo Fuentes
Fecha	25/09/2024
Hora	08:50
Coordenadas UTM	(41.0592815, -1.5633959)
Condiciones meteorológicas	Chubascos leves
Observaciones	—
Técnico responsable	Lorién Barcos Abanto



Tabla A10. Ficha de campo del punto FUENTE PLAZA DE LA OBRA. Fuente: Elaboración propia.

Código del punto	UF10
Nombre del punto	Fuente Plaza De La Obra
Fecha	25/09/2024
Hora	09:00
Coordenadas UTM	(41.0555198, -1.5575564)
Condiciones meteorológicas	Chubascos leves
Observaciones	—
Técnico responsable	Lorién Barcos Abanto

Tabla A11. Ficha de campo del punto POZO CUARTEL. Fuente: Elaboración propia.

Código del punto	UF11
Nombre del punto	Pozo Cuartel
Fecha	25/09/2024
Hora	09:10
Coordenadas UTM	(41.0563119, -1.5615060)
Condiciones meteorológicas	Chubascos leves
Observaciones	—
Técnico responsable	Lorién Barcos Abanto



Tabla A12. Ficha de campo del punto PANTANO. Fuente: Elaboración propia.

Código del punto	UF12
Nombre del punto	Pantano
Fecha	25/09/2024
Hora	09:20
Coordenadas UTM	(41.0546762, -1.5601857)
Condiciones meteorológicas	Chubascos leves
Observaciones	—
Técnico responsable	Lorién Barcos Abanto

Tabla A13. Ficha de campo del punto POZO FUENTECILLAS. Fuente: Elaboración propia.

Código del punto	UF13
Nombre del punto	Pozo Fuentecillas
Fecha	25/09/2024
Hora	09:30
Coordenadas UTM	(41.0752184, -1.5511168)
Condiciones meteorológicas	Chubascos leves
Observaciones	—
Técnico responsable	Lorién Barcos Abanto



Tabla A14. Ficha de campo del punto POZO CASTILLO. Fuente: Elaboración propia.

Código del punto	UF14
Nombre del punto	Pozo Castillo
Fecha	25/09/2024
Hora	09:40
Coordenadas UTM	(41.0776098, -1.5619274)
Condiciones meteorológicas	Chubascos leves
Observaciones	—
Técnico responsable	Lorién Barcos Abanto

Tabla A15. Ficha de campo del punto GRIFO CASA. Fuente: Elaboración propia.

Código del punto	UF15
Nombre del punto	Grifo Casa
Fecha	25/09/2024
Hora	09:50
Coordenadas UTM	(41.0674866, -1.5582397)
Condiciones meteorológicas	Chubascos leves
Observaciones	—
Técnico responsable	Lorién Barcos Abanto



ANEXO III- EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INAQUAS V1

RESULTADOS ANALITICOS				mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Grupo	Num	F_Toma	Muestra	DQO	Cl	SO4	HCO3	CO3	NO3	Na	Mg	Ca	K	pH	µS/cm C.E.	R_S	NO2	NH4	PO4
1	1	8/8/2024	Fuente Vieja	34.657	24.419	258.64	9.6	21.2	12.359	17.571	74.269	3.144	8.15	454		0	0.008	0	
2	2	8/8/2024	Huerto Pozo	72.261	109.136	263.52	10	91.32	22.632	22.262	131.915	50.65	8.04	882		0.215	0	0.649	
3	3	8/8/2024	Pozo Fuentes	36.833	36.791	316.71	12	38.85	12.973	17.115	101.837	9.126	8.05	576		0	0.008	0	
5	4	8/8/2024	Pantano	5.235	9.804	51.24	0	0.721	4.182	3.312	21.309	3.909	7.8	117		0	0	0	
6	5	8/8/2024	Pozo Fuentecillas	40.374	38.011	221.8	12	11.55	14.517	19.424	84.781	2.823	8.3	509		0	0	0	
7	6	8/8/2024	Pozo Castillo	39.314	28.56	201.3	0	11.7	9.383	17.099	77.151	1.818	7.86	453		0	0	0	
1	7	25/09/2024	Fuente Vieja	33.611	23.417	209.84	0	21.17	12.136	17.408	73.673	2.661	6.74	447		0	0.016	0.254	
2	8	25/09/2024	Pozo Casas	84.423	236.682	300.12	0	228.6	31.19	36.243	209.426	92.041	6.84	1376		0.071	0	0.849	
3	9	25/09/2024	Pozo Fuentes	29.075	33.515	276.94	0	39.67	12.722	16.638	103.015	7.865	7.06	568		0	0	0.227	
4	10	25/09/2024	Pozo Cuartel	9.492	7.98	241.56	6.4	0.447	6.11	34.403	37.648	5.858	7.94	364		0.05	0.031	0	
5	11	25/09/2024	Pantano	3.335	5.855	30.5	0	0.194	2.562	2.894	13.663	2.655	7.15	75		0.02067	0.008	0	
6	12	25/09/2024	Pozo Fuentecillas	38.163	35.367	239.12	0	11.36	14.165	19.395	83.423	2.164	6.73	500		0	0	0.241	
7	13	25/09/2024	Pozo Castillo	40.427	27.074	191.54	0	10.98	9.349	17.077	76.206	4.22	6.66	448		0	0	0.235	
8	14	25/09/2024	Fuente Obra	32.05	59.486	296.46	12	43.83	15.191	13.082	129.77	12.499	7.88	663		0	0	0.225	
9	15	25/09/2024	Grifo Casas	39.417	27.555	201.3	0	10.2	11.503	17.158	76.173	1.72	7.04	460		0	0	0	

RESULTADOS ANALITICOS				mg/l	mg/l	mg/l	HCO3	mg/l
Grupo	Num	F_Toma	Muestra	TSD	Br	F	Alcalinidad	S.S.
1	1	8/8/2024	Fuente Vieja	350.8	0.263	0.192	268.24	3.14049587
2	2	8/8/2024	Huerto Pozo	736.4	0.298	0.136	273.52	5.71428571
3	3	8/8/2024	Pozo Fuentes	439.2	0.263	0.207	328.712	5.22633745
5	4	8/8/2024	Pantano	121.6	0.067	0.069	51.24	44.6969697
6	5	8/8/2024	Pozo Fuentecillas	381.2	0.358	0.188	233.796	1.77966102
7	6	8/8/2024	Pozo Castillo	353.6	0.354	0.124	201.3	1.00840336
1	7	25/09/2024	Fuente Vieja	378.4	0.255	0.185	209.84	1.30434783
2	8	25/09/2024	Pozo Casas	1316.4	0.452	0.11	300.12	8.77118644
3	9	25/09/2024	Pozo Fuentes	483.2	0.216	0.192	276.94	2.04347826
4	10	25/09/2024	Pozo Cuartel	239.6	0.068	0.161	247.96	3.26271186
5	11	25/09/2024	Pantano	97.2	0.0376667	0.031	30.5	17.7966102
6	12	25/09/2024	Pozo Fuentecillas	386.8	0.341	0.181	239.12	0.94262295
7	13	25/09/2024	Pozo Castillo	371.6	0.345	0.12	191.54	0.88235294
8	14	25/09/2024	Fuente Obra	556.4	0.23	0.288	308.46	1.85344828
9	15	25/09/2024	Grifo Casas	384	0.703	0.124	201.3	0.42735043

Figuras A7, A8: Tratamiento de datos INAQUAS V1. Fuente: Elaboración propia a partir de INAQUAS V1



Muestra	F_Toma	DETERMINACIONES EXPRESADAS EN meq											Balance iónico		
		Cl	SO4	HCO3	CO3	NO3	Na	Mg	Ca	K	Fe	Mn	Sum ANI	Sum CAT	Error
Fuente Vieja	8/8/2024	0.978	0.508	4.239	0.320	0.342	0.538	1.445	3.706	0.080	0.00000	0.000	6.387	5.769	-5.1
Huerto Pozo	8/8/2024	2.038	2.272	4.319	0.333	1.473	0.984	1.831	6.583	1.295	0.00000	0.000	10.436	10.693	1.2
Pozo Fuentes	8/8/2024	1.039	0.766	5.191	0.400	0.627	0.564	1.408	5.082	0.233	0.00000	0.000	8.023	7.287	-4.8
Pantano	8/8/2024	0.148	0.204	0.840	0.000	0.012	0.182	0.272	1.063	0.100	0.00000	0.000	1.203	1.618	14.7
Pozo Fuentes	8/8/2024	1.139	0.791	3.635	0.400	0.186	0.631	1.598	4.231	0.072	0.00000	0.000	6.152	6.532	3.0
Pozo Castillo	8/8/2024	1.109	0.595	3.299	0.000	0.189	0.408	1.407	3.850	0.046	0.00000	0.000	5.192	5.711	4.8
Fuente Vieja	25/09/2024	0.948	0.488	3.439	0.000	0.341	0.528	1.432	3.676	0.068	0.00000	0.000	5.216	5.704	4.5
Pozo Casas	25/09/2024	2.382	4.928	4.919	0.000	3.687	1.357	2.981	10.450	2.353	0.00000	0.000	15.915	17.142	3.7
Pozo Fuentes	25/09/2024	0.820	0.698	4.539	0.000	0.640	0.553	1.369	5.140	0.201	0.00000	0.000	6.697	7.264	4.1
Pozo Cuartel	25/09/2024	0.268	0.166	3.959	0.213	0.007	0.266	2.830	1.879	0.150	0.00000	0.000	4.614	5.124	5.2
Pantano	25/09/2024	0.094	0.122	0.500	0.000	0.003	0.111	0.238	0.682	0.068	0.000	0.000	0.719	1.099	20.9
Pozo Fuentes	25/09/2024	1.077	0.736	3.919	0.000	0.183	0.616	1.595	4.163	0.055	0.000	0.000	5.915	6.430	4.2
Pozo Castillo	25/09/2024	1.140	0.564	3.139	0.000	0.177	0.407	1.405	3.803	0.108	0.000	0.000	5.021	5.722	6.5
Fuente Obra	25/09/2024	0.904	1.238	4.859	0.400	0.707	0.661	1.076	6.476	0.320	0.000	0.000	8.109	8.532	2.5
Grifo Casas	25/09/2024	1.112	0.574	3.299	0.000	0.165	0.500	1.411	3.801	0.044	0.000	0.000	5.149	5.757	5.6

Figura A9: Resultados moles equivalentes de INAQUAS V1. Fuente: Elaboración propia a partir de INAQUAS V1.

Muestra	F_Toma	DETERMINACIONES EXPRESADAS EN mmol													DETERMINACIONES EXPRESADAS EN % mmol										
		Cl	SO4	HCO3	CO3	NO3	Na	Mg	Ca	K	Fe	Mn	Sum cat	Sum ani	Cl	SO4	HCO3	CO3	NO3	Na	Mg	Ca	K	Fe	Mn
Fuente Vieja	8/8/2024	0.98	0.25	4.24	0.16	0.34	0.54	0.72	1.85	0.08	0.00	0.00	3.19	5.97	16.37	4.26	70.97	2.68	5.73	16.83	22.63	58.02	2.52	0.00	0.00
Huerto Pozo	8/8/2024	2.04	1.14	4.32	0.17	1.47	0.98	0.92	3.29	1.30	0.00	0.00	6.49	9.13	22.32	12.44	47.29	1.82	16.13	15.18	14.12	50.74	19.97	0.00	0.00
Pozo Fuentes	8/8/2024	1.04	0.38	5.19	0.20	0.63	0.56	0.70	2.54	0.23	0.00	0.00	4.04	7.44	13.97	5.15	69.77	2.69	8.42	13.96	17.41	62.85	5.77	0.00	0.00
Pantano	8/8/2024	0.15	0.10	0.84	0.00	0.01	0.18	0.14	0.53	0.10	0.00	0.00	0.95	1.10	13.41	9.27	76.26	0.00	1.06	19.15	14.34	55.98	10.52	0.00	0.00
Pozo Fuentes	8/8/2024	1.14	0.40	3.64	0.20	0.19	0.63	0.80	2.12	0.07	0.00	0.00	3.62	5.56	20.50	7.12	65.43	3.60	3.35	17.45	22.08	58.47	2.00	0.00	0.00
Pozo Castillo	8/8/2024	1.11	0.30	3.30	0.00	0.19	0.41	0.70	1.92	0.05	0.00	0.00	3.08	4.89	22.66	6.07	67.41	0.00	3.86	13.24	22.81	62.44	1.51	0.00	0.00
Fuente Vieja	25/09/2024	0.95	0.24	3.44	0.00	0.34	0.53	0.72	1.84	0.07	0.00	0.00	3.15	4.97	19.07	4.90	69.16	0.00	6.87	16.76	22.73	58.35	2.16	0.00	0.00
Pozo Casas	25/09/2024	2.38	2.46	4.92	0.00	3.69	1.36	1.49	5.23	2.35	0.00	0.00	10.43	13.45	17.70	18.32	36.57	0.00	27.41	13.01	14.30	50.12	22.57	0.00	0.00
Pozo Fuentes	25/09/2024	0.82	0.35	4.54	0.00	0.64	0.55	0.68	2.57	0.20	0.00	0.00	4.01	6.35	12.92	5.50	71.50	0.00	10.08	13.80	17.07	64.11	5.02	0.00	0.00
Pozo Cuartel	25/09/2024	0.27	0.08	3.96	0.11	0.01	0.27	1.41	0.94	0.15	0.00	0.00	2.77	4.42	6.05	1.88	89.50	2.41	0.16	9.60	51.08	33.91	5.41	0.00	0.00
Pantano	25/09/2024	0.09	0.06	0.50	0.00	0.00	0.11	0.12	0.34	0.07	0.00	0.00	0.64	0.66	14.30	9.26	75.97	0.00	0.47	17.43	18.62	53.33	10.62	0.00	0.00
Pozo Fuentes	25/09/2024	1.08	0.37	3.92	0.00	0.18	0.62	0.80	2.08	0.06	0.00	0.00	3.55	5.55	19.41	6.64	70.65	0.00	3.30	17.35	22.47	58.62	1.56	0.00	0.00
Pozo Castillo	25/09/2024	1.14	0.28	3.14	0.00	0.18	0.41	0.70	1.90	0.11	0.00	0.00	3.12	4.74	24.07	5.95	66.25	0.00	3.74	13.04	22.52	60.97	3.46	0.00	0.00
Fuente Obra	25/09/2024	0.90	0.62	4.86	0.20	0.71	0.66	0.54	3.24	0.32	0.00	0.00	4.76	7.29	12.40	8.50	66.66	2.74	9.70	13.89	11.31	68.07	6.72	0.00	0.00
Grifo Casas	25/09/2024	1.11	0.29	3.30	0.00	0.16	0.50	0.71	1.90	0.04	0.00	0.00	3.15	4.86	22.87	5.90	67.85	0.00	3.38	15.88	22.40	60.32	1.40	0.00	0.00

Figura A10: Resultados %moles de INAQUAS V1. Fuente: Elaboración propia a partir de INAQUAS V1.



PARÁMETROS CALCULADOS																									
Balance iónico			Índices de D'Amore						Relaciones iónicas						Índice de cambio de bases		mg/l		Facies hidroquímica				mg/l		
Muestra	F_Toma	Cationes	Aniones	Error	A	B	C	D	E	F	Mg/Ca	K/Na	Na/Ca	Na/Ca+Mg	Cl/HCO3	SO4/Cl	icb	icb(-)	Dureza	Anionica	Cationica	Ani	Cat	TSD	
Fuente Vieja	8/8/2024	5.77	6.39	-5.08	65.16	-0.44	-7.76	-15.73	15.25	53.52	0.39	0.15	0.15	0.10	0.23	0.52	0.37	0.07	257.7	HCO3	Ca	30	10	455.9	
Huerto Pozo	8/8/2024	10.69	10.44	1.22	23.72	17.12	-14.41	-7.92	28.63	40.24	0.28	1.32	0.15	0.12	0.47	1.11	-0.12	-0.03	421.0	HCO3	SO4	Ca	31	10	773.7
Pozo Fuentes	8/8/2024	7.29	8.02	-4.80	63.25	3.20	-7.11	-11.58	14.86	58.79	0.28	0.41	0.11	0.09	0.20	0.74	0.23	0.04	324.7	HCO3	Ca	30	10	582.2	
Pantano	8/8/2024	1.62	1.20	14.69	53.35	5.88	-1.15	-5.60	12.10	48.31	0.26	0.55	0.17	0.14	0.18	1.38	-0.91	-0.13	66.8	HCO3	Ca	30	10	99.7	
Pozo Fuentecillas	8/8/2024	6.53	6.15	3.00	51.10	4.55	-10.80	-14.79	23.91	53.99	0.38	0.11	0.15	0.11	0.31	0.69	0.38	0.09	291.6	HCO3	Ca	30	10	445.3	
Pozo Castillo	8/8/2024	5.71	5.19	4.76	54.06	4.74	-15.02	-17.48	26.09	59.45	0.37	0.11	0.11	0.08	0.34	0.54	0.59	0.16	263.0	HCO3	Ca	30	10	386.3	
Fuente Vieja	25/09/2024	5.70	5.22	4.47	60.55	0.75	-10.19	-15.85	19.00	54.00	0.39	0.13	0.14	0.10	0.28	0.51	0.37	0.08	255.6	HCO3	Ca	30	10	393.9	
Pozo Casas	25/09/2024	17.14	15.92	3.71	-0.07	32.38	-11.56	-9.48	38.13	39.32	0.29	1.73	0.13	0.10	0.48	2.07	-0.56	-0.10	672.0	SO4	HCO3	Ca	13	10	1218.7
Pozo Fuentes	25/09/2024	7.26	6.70	4.06	63.42	3.90	-5.92	-11.22	14.67	60.38	0.27	0.36	0.11	0.09	0.18	0.85	0.08	0.01	325.7	HCO3	Ca	30	10	519.4	
Pozo Cuartel	25/09/2024	5.12	4.61	5.24	86.34	-1.40	-0.91	-50.04	1.77	28.55	1.51	0.56	0.14	0.06	0.07	0.62	-0.55	-0.04	235.7	HCO3	Mg	Ca	30	31	349.9
Pantano	25/09/2024	1.10	0.72	20.91	52.80	6.89	-3.00	-11.52	13.85	45.71	0.35	0.61	0.16	0.12	0.19	1.30	-0.91	-0.14	46.02	HCO3	Ca	30	10	61.7	
Pozo Fuentecillas	25/09/2024	6.43	5.92	4.17	55.53	3.26	-9.20	-15.23	21.18	54.30	0.38	0.09	0.15	0.11	0.27	0.68	0.38	0.08	288.11	HCO3	Ca	30	10	443.2	
Pozo Castillo	25/09/2024	5.72	5.02	6.53	53.18	4.53	-16.44	-17.44	26.19	57.46	0.37	0.27	0.11	0.08	0.36	0.49	0.55	0.16	260.55	HCO3	Ca	30	10	376.9	
Fuente Obra	25/09/2024	8.53	8.11	2.54	51.71	9.94	-5.17	-4.87	19.11	64.41	0.17	0.48	0.10	0.09	0.19	1.37	-0.08	-0.01	377.79	HCO3	Ca	30	10	614.4	
Grifo Casas	25/09/2024	5.76	5.15	5.57	54.68	2.82	-13.61	-15.83	24.36	56.57	0.37	0.09	0.13	0.10	0.34	0.52	0.51	0.14	260.80	HCO3	Ca	30	10	385.0	

Figura A11: Índices de INAQUAS V1. Fuente: Elaboración propia a partir de INAQUAS V1.

		Calidad para consumo																							
Muestra	Fecha	NO3	NO2	NH4	Cl	CE	pH	Na	SO4	As	B	Cd	CN	Cu	Cr	F	Hg	Ni	Pb	Se	Al	Fe	Mn	Ox	Resumen
Fuente Vieja	8/8/2024	0	0	0	0	0	0	0	0								0								0
Huerto Pozo	8/8/2024	1	0	0	0	0	0	0	0								0								1
Pozo Fuentes	8/8/2024	0	0	0	0	0	0	0	0								0								0
Pantano	8/8/2024	0	0	0	0	0	0	0	0								0								0
Pozo Fuentecillas	8/8/2024	0	0	0	0	0	0	0	0								0								0
Pozo Castillo	8/8/2024	0	0	0	0	0	0	0	0								0								0
Fuente Vieja	25/09/2024	0	0	0	0	0	0	0	0								0								0
Pozo Casas	25/09/2024	1	0	0	0	0	0	0	0								0								1
Pozo Fuentes	25/09/2024	0	0	0	0	0	0	0	0								0								0
Pozo Cuartel	25/09/2024	0	0	0	0	0	0	0	0								0								0
Pantano	25/09/2024	0	0	0	0	0	0	0	0								0								0
Pozo Fuentecillas	25/09/2024	0	0	0	0	0	0	0	0								0								0
Pozo Castillo	25/09/2024	0	0	0	0	0	0	0	0								0								0
Fuente Obra	25/09/2024	0	0	0	0	0	0	0	0								0								0
Grifo Casas	25/09/2024	0	0	0	0	0	0	0	0								0								0

Figura A12. Calidad para consumo (sin *E. coli*). Fuente: Elaboración propia a partir de INAQUAS V1.



INDICES DE CALIDAD PARA USO AGRÍCOLA											
		Riesgo de salinización		Riesgo de alcalinización							
Muestra	F. Toma	C		S (SAR)		RNa	CSR	RCa	RMg	Normas Scott	
Fuente Vieja	8/8/2024	454 C2	Medio	0.33 S1	Bajo	0.09	-0.59 Adecuada	0.65	0.25	58.86	Buena
Huerto Pozo	8/8/2024	882 C3	Alto	0.48 S1	Bajo	0.10	-3.76 Adecuada	0.70	0.19	28.23	Buena
Pozo Fuentes	8/8/2024	576 C2	Medio	0.31 S1	Bajo	0.08	-0.90 Adecuada	0.72	0.20	55.39	Buena
Pantano	8/8/2024	117 C1	Bajo	0.22 S1	Bajo	0.12	-0.50 Adecuada	0.70	0.18	372.06	Buena
Pozo Fuentes	8/8/2024	509 C2	Medio	0.37 S1	Bajo	0.10	-1.79 Adecuada	0.65	0.25	50.53	Buena
Pozo Castillo	8/8/2024	453 C2	Medio	0.25 S1	Bajo	0.07	-1.96 Adecuada	0.68	0.25	51.89	Buena
Fuente Vieja	25/09/2024	447 C2	Medio	0.33 S1	Bajo	0.09	-1.67 Adecuada	0.65	0.25	60.69	Buena
Pozo Casas	25/09/2024	1376 C3	Alto	0.52 S1	Bajo	0.09	-8.51 Adecuada	0.71	0.20	24.16	Buena
Pozo Fuentes	25/09/2024	568 C2	Medio	0.31 S1	Bajo	0.08	-1.97 Adecuada	0.73	0.19	70.16	Buena
Pozo Cuartel	25/09/2024	364 C2	Medio	0.17 S1	Bajo	0.05	-0.54 Adecuada	0.38	0.57	214.92	Buena
Pantano	25/09/2024	75 C1	Bajo	0.16 S1	Bajo	0.11	-0.42 Adecuada	0.66	0.23	589.33	Buena
Pozo Fuentes	25/09/2024	500	Medio	0.36 S1	Bajo	0.10	-1.84 Adecuada	0.65	0.25	53.45	Buena
Pozo Castillo	25/09/2024	448 C2	Medio	0.25 S1	Bajo	0.07	-2.07 Adecuada	0.68	0.25	50.46	Buena
Fuente Obra	25/09/2024	663 C2	Medio	0.34 S1	Bajo	0.08	-2.29 Adecuada	0.79	0.13	63.65	Buena
Grifo Casas	25/09/2024	460 C2	Medio	0.31 S1	Bajo	0.09	-1.91 Adecuada	0.67	0.25	51.75	Buena

Según FAO Irrigation and Drainage Paper n° 29 rev 1										Según FAO Irrigation an									
TSD	Na manta	Na aspensor	Cl manta	Cl aspensor	Boro	Nitrogeno	Bicarbonato	pH		Al	As	Be	Cd	Co	Cr	Cu	F		
455.859	Ligera a moderada	No	No	No	No	No	No	No									0		
773.698	Ligera a moderada	No	No	No	No	No	Ligera a moderada	Ligera a moderada									0		
582.239	Ligera a moderada	No	No	No	No	No	Ligera a moderada	Ligera a moderada									0		
99.712	No	No	No	No	No	No	No	No									0		
445.276	No	No	No	No	No	No	No	No									0		
386.323	No	No	No	No	No	No	No	No									0		
393.916	No	No	No	No	No	No	No	No									0		
1218.71	Ligera a moderada	No	No	No	No	No	Severa	Severa									0		
519.442	Ligera a moderada	No	No	No	No	No	Ligera a moderada	Ligera a moderada									0		
349.898	No	No	No	No	No	No	No	No									0		
61.6577	No	No	No	No	No	No	No	No									0		
443.156	No	No	No	No	No	No	No	No									0		
376.875	No	No	No	No	No	No	No	No									0		
614.367	Ligera a moderada	No	No	No	No	No	Ligera a moderada	Ligera a moderada									0		
385.027	No	No	No	No	No	No	No	No									0		

Figuras A13, A14. Índices de calidad para uso agrícola. Fuente: Elaboración propia a partir de INAQUAS V1.



ANEXO IV- COMPARATIVA LEGAL ENTRE RD 3/2023 Y RD 140/2003

Tabla A18. Comparativa de parámetros y valores de referencia de calidad añadidos o con cambios más significativos en el RD 3/2023 respecto a RD 140/2003. Fuente: Elaboración propia a partir del RD 140/2003 y RD 3/2023 (Gobierno de España).

Parámetro	Límite RD 140/2003	Límite RD 3/2023	Cambio significativo
Turbidez (NTU)	5 (en 95%)	1	Sí (más exigente)
Dureza (mg/L CaCO ₃)	No establecido	500 (recomendado)	Sí (se añade)
Nitritos (mg/L)	0.01	0.50	Sí (menos estricto)
Calcio (mg/L)	No establecido	100	Sí (se añade)
Magnesio (mg/L)	No establecido	30	Sí (se añade)
Potasio (mg/L)	No establecido	10	Sí (se añade)

ANEXO V- CLASIFICACIÓN DE AGUAS SEGÚN SU APTITUD PARA CONSUMO HUMANO Y RIEGO

Tabla A19. Clasificación de las aguas analizadas para consumo humano y uso agrícola. Fuente: Elaboración propia a partir de resultados analíticos, RD 3/2023 y criterios FAO.

Código	Nombre del punto	Consumo humano	Uso agrícola
UF01	Huerto Pozo	No apta	Apta
UF02	Fuente Vieja (Manantial)	Apta	Apta
UF03	Pozo Fuentes	Apta	Apta
UF04	Pantano	Apta	Apta
UF05	Pozo Fuentecillas	Apta	Apta
UF06	Pozo Castillo	Apta	Apta
UF07	Pozo Casa	No apta	Apta
UF08	Fuente Plaza de la Obra	Apta	Apta
UF09	Pozo Cuartel	No apta	Apta
UF10	Grifo Casa	Apta	Apta
UF11	Fuente Vieja (Manantial)	Apta	Apta
UF12	Pozo Fuentes	Apta	Apta
UF13	Pantano	Apta	Apta
UF14	Pozo Fuentecillas	Apta	Apta
UF15	Pozo Castillo	Apta	Apta