

CAPÍTULO I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1.Generalidades.

La cuenca del Río Guadalquivir se encuentra ubicada al norte de la ciudad de Tarija, en las provincias Méndez y Cercado, Geográficamente se localiza entre los paralelos de 21° 15' y 21° 35' Latitud Sur y meridianos 64° 35' y 64° 56' de Longitud Oeste tiene una extensión de 105.910 has. Por el norte limita con las cuencas de afluentes al río Pilaya, al sur con la cuenca del río Tolomosa, al este con la cuenca del río Santa Ana y al oeste con la cuenca de río Tomayapo (Plan de Desarrollo Municipal de San Lorenzo, 2005).

El 54% de la superficie total de la cuenca corresponden a laderas altas y medias, situadas a una altura que fluctúa entre los 2.500 y 4.500 m.s.n.m., ubicados en la serranía de Sama, son terrenos con pendientes abruptas (60%), y vegetación rala; estos paisajes están comprendidos dentro la Reserva Biológica de la Cordillera de Sama. Las laderas bajas y las colinas que se encuentran entre os 2.100 y 2.500 m.s.n.m., alcanzan el 22.3% de la superficie, se caracterizan por estar sometidas a un intenso proceso deterioro de la cobertura vegetal. Una superficie de piedemonte entre los 2.000 y 2.100 m.sn.m. abarca el 3.1% de la cuenca, con pendientes inclinadas y onduladas. En una sección intermedia entre los 1.900 y 2.000 m.s.n.m. se encuentra la terraza fluvio lacustre (9.4%) de relieve ondulado y pendientes inclinadas, con la mayor parte de su superficie con suelos erosionados; y la terraza aluvial plana y la zona inundable, que tienen una superficie 5.1% de toda la cuenca, y son las zonas donde se práctica la agricultura (PEA, 1999).

Según el PDM de San Lorenzo, el área de la Cuenca que pertenece a la jurisdicción de la Provincia de Cercado (18.322,6 ha) es de menor proporción y tiene mayor proporción la Provincia de Méndez (87.588,2 ha) del Departamento de Tarija.

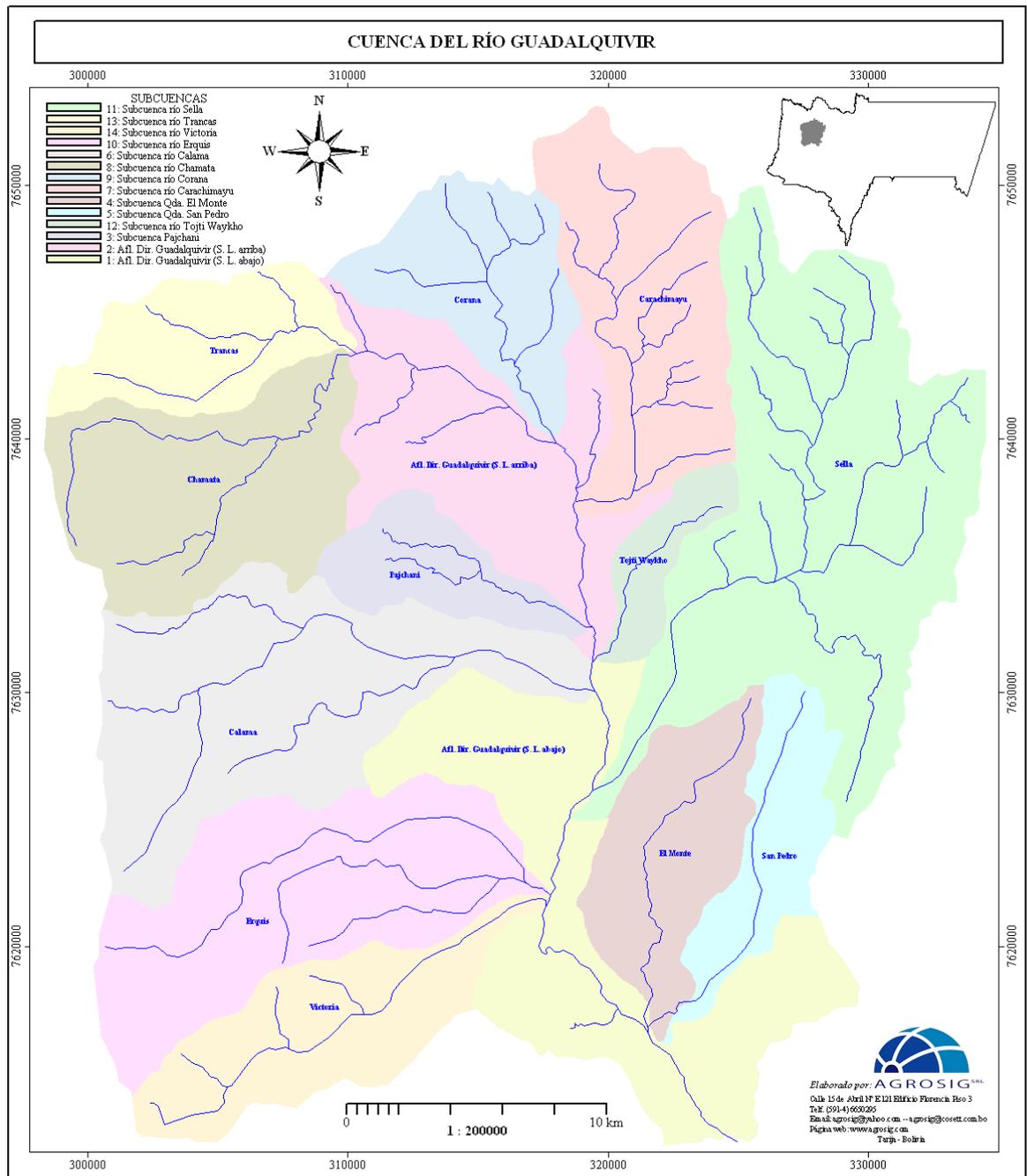


Figura 1. Sub Cuencas de la Cuenca del Río Guadalquivir.

Por otro lado también se indica que el drenaje principal es el Río Guadalquivir, que desarrolla un curso de aproximadamente 60 km., orientado de norte a sur, girando a la altura de Canasmoro hacia el oeste, hasta su nacimiento; parte en la que recibe el nombre de Río Trancas.

Los cauces, del Río Guadalquivir y sus afluentes, presentan una inestabilidad manifiesta con divagaciones y anastomosis continuas, en las que zonas con depósitos impiden un flujo ordenado y uniforme de las descargas. El curso principal presenta en el tramo inferior pendientes de 0.75%, aguas abajo de Canasmoro y hasta el Río Trancas de 1.75%; desde éste punto hacia arriba el río pasa a un régimen torrencial con pendientes superiores al 5%. La irregularidad de las descargas de los caudales y la magnitud del transporte de sólidos, tanto en forma de suspensión como por acarreo, son características de estos cauces y del estado en que se encuentran los terrenos de la Cuenca.

Los afluentes en la margen derecha son los Ríos: Chamata, Pajchani, Calama, Erquis, Victoria; y en el margen izquierda se encuentran los Ríos: Corana, Carachimayo, Sella, El Monte, y San Pedro. Por los perfiles longitudinales y las pendientes pueden indicar que todos los ríos presentan procesos erosivos a lo largo de sus cauces. En el cuadro se presentan algunos valores de longitudes y pendientes de los ríos (Plan de Desarrollo Municipal de San Lorenzo, 2005).

Tabla 1.-Pendiente y longitud de los ríos de la Cuenca del Río Guadalquivir.

RIOS	LONGITUD (Km.)	PENDIENTE MEDIA (%)
Margenderecha		
Victoria	19.0	6°
Erquis	26.0	4°
Calama	27.0	4°

Pajchani	7.5	4°
Chamata	22.5	3°
Margenizquierda		
Corana	12.5	3°
Carachimayo	21.5	2°
TojtiWayko	8.5	2°
Sella	29.5	1°
El Monte	15.5	1°
San Pedro	16.0	1°
Guadalquivir- Trancas	50.0	1°

1.2.Hidrología.

1.2.1. Cursos de agua de la cuenca.

La cuenca del río Guadalquivir tiene como curso principal el río Guadalquivir, que nace en el río Chamata en el extremo norte de la serranía de Sama, para recibir el aporte de los ríos Carachimayu, Calama, Sella, Erquis, Tomatas Grande y Victoria antes de su entrada a la ciudad de Tarija, para recibir luego aguas del río Tolomosa, Santa Ana y Camacho y pequeños cursos de agua río San Pedro, Quebrada Grande, Rujero, Cabeza de Toro, Torrecillas y Colpana, la cuenca del Guadalquivir finaliza en la Angostura, luego de la unión con el río Santa Ana y Camacho, a partir de ese punto el curso principal adopta el nombre de río Grande de Tarija (PDM San Lorenzo, 2005)

1.2.2. Hidrología.

El punto más representativo y de mayor uso del curso principal de la cuenca está ubicado en la estación hidrométrica de Obrajes, ubicada en la entrada de la Ciudad de

Tarija, ha estimado un caudal medio anual de $6.009 \text{ m}^3/\text{s}$ y de acuerdo a los datos de caudales mensuales (1978 a 1996) presentados por el mismo autor, se observa un caudal mínimo diario de $0.493 \text{ m}^3/\text{s}$, un caudal mínimo mensual de $0.890 \text{ m}^3/\text{s}$ para Octubre y un caudal máximo mensual de $17.184 \text{ m}^3/\text{s}$ para el mes de Marzo (Benítez –1998).

1.2.2.1. Patrón fluvial de la red de corrientes de la cuenca del Guadalquivir

La red de corrientes de agua constituida por el río Guadalquivir y sus tributarios, tiene un patrón fluvial dendrítico con condiciones uniformes de descarga, especialmente dentro del área de estudio, desde sus cabeceras hasta Obrajes (ZONISIG, 2001).

1.2.2.2. Descripción del cauce, régimen natural y la corriente del río

El cauce de la corriente superficial del río a lo largo del tramo de estudio se encuentra sobre un lecho aluvial o aluvión compuesto por grava de diversa granulometría, arena, limo y rocas de tamaños variables, típicos de ríos de montaña y velocidades relativamente altas, lo que brinda condiciones ideales para la aireación natural del agua, debido a la turbulencia de la corriente a través del lecho rugoso (PEA – BERMEJO y SERNAP. 2005).

El régimen natural del río y la corriente están íntimamente ligados a las condiciones climáticas de la cuenca, presentándose avenidas extremas entre los meses de alta precipitación fluvial Enero – Marzo y caudales de estiaje o aguas bajas entre los meses de Agosto y Octubre, llegando incluso a caudales superficiales nulos en algunos puntos de uso intenso del agua superficial para riego.

1.3. Geoquímica de los elementos de la solución del suelo.

1.3.1. Algunos rasgos de importancia.

Las aguas superficiales, durante su escurrimiento hacia las depresiones, pasan a través de diferentes formaciones geológicas, y debido a los procesos de intemperismo de las

rocas, estas aguas se enriquecen con diferentes elementos químicos; sin embargo, se debe señalar también que cuando los diferentes compuestos salinos presentes en las mismas alcanzan concentraciones límite, estos comienzan a precipitarse (Llorenti, 2002)

Los elementos que participan en las soluciones de aguas superficiales, freáticas, de acuíferos, marinas y de los suelos, son: Ca, Mg, Na, K, O, Cl, S, C, N, B, y otros (Huez, 1985). En el caso de aguas residuales de industrias, de centros urbanos, y de zonas agrícolas y pecuarias, se debe tomar en cuenta una cantidad extra de sales y otros elementos químicos como plomo, zinc, cadmio, mercurio, entre muchos otros que forman parte de los desechos, producto de las diferentes actividades humanas y que son vertidos en las aguas sin consideración alguna en la mayoría de los casos en el mundo.

1.3.1.1. Calcio (Ca).

La corteza terrestre contiene 3.2% de Ca; las rocas básicas contienen una cantidad importante de este elemento químico, en tanto que las rocas ácidas contienen una cantidad relativamente menor. El Ca se encuentra en la composición de las augitas, anfíboles, anortitas, y de las plagioclasas (Buckman *et. al.* 1977).

El mismo autor indica que CaCO_3 que se forma durante el intemperismo de los minerales que contienen calcio, en presencia de CO_2 , pasa a una forma mas soluble como el bicarbonato de calcio $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$.

Las sales solubles de calcio: $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, se acumulan en las aguas naturales superficiales y freáticas. Cuando estas aguas fluyen pueden llegar a depresiones internas, mares y océanos. Como resultado de la evaporación de las soluciones y de las reacciones de intercambio, una parte del calcio se precipita formando: calcita CaCO_3 , yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Anhidrita CaSO_4 , gaylusita $\text{CaCO}_3\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, y otras que forman parte de la

composición de las rocas sedimentarias, rocas marinas y de los suelos (Buckman *et. al.* 1977).

1.3.1.2. Magnesio (Mg).

2.07 % de la corteza terrestre es magnesio; se encuentra en cantidades relativamente mayores en rocas básicas y ultrabásicas. En el basalto el contenido de Mg es cercano a 3.77% y en los piroxenos 10.9% (Babor *et al.*, 1963).

En las rocas sedimentarias y en los suelos, el magnesio se acumula en forma de minerales salinos como: dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, magnesita $\text{MgCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, epsomita $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, kieserita $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, astrakanita $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, carnalita $\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, kainita $\text{KClMgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ y otras (Babor *et al.*, 1963).

1.3.1.3. Sodio (Na).

2.35% de la corteza terrestre esta formada por sodio; rocas magmáticas alcalinas tienen entre el 15 y 20% de $\text{Na}+\text{K}$, en tanto que rocas basálticas contienen alrededor de 2.31% (Babor *et al.* 1963).

El sodio se encuentra en la albita, plagioclasas, leicitita, nefelino, y en los minerales que contienen cloro como: sodolita y nosean.

Las sales de sodio se encuentran en grandes cantidades en las aguas freáticas de las regiones semidesérticas y desérticas. Cuando la concentración de sales es muy alta, predominan el NaCl y Na_2SO_4 . Una fracción del sodio adsorbido puede pasar a la solución del suelo donde reacciona con el CO_3^{2-} y HCO_3^- para formar carbonato y bicarbonato de sodio.

Los suelos salinos pueden contener hasta 3% de sales de sodio, en tanto que las costras salinas de los suelos pueden contener hasta 20%.

Los siguientes minerales de sodio son los mas ampliamente distribuidos, y se precipitan durante la evaporación de las aguas de los suelos, de las aguas freáticas y de las aguas

superficiales: halita NaCl , mirabilita Na_2SO_4 , salitre sódico NaNO_3 , termonatrita $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, soda $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, trona $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, glauberita $2\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3$ y gaylusita $\text{CaCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Babor *et al.* 1963).

1.3.1.4. Potasio (K).

2.27% de la corteza terrestre está constituida por potasio; se encuentra formando parte, tanto de rocas ácidas, como de rocas básicas. En rocas basálticas, el 1.26% de estas está constituido por potasio (Richards, 1973).

Este elemento se encuentra en las plagioclasas y albita en cantidades traza, pero en mayor proporción se encuentra en la ortoclasa y la muscovita.

Cuando los carbonatos de potasio interactúan con los ácidos y con las sales, se transforman en cloruros, sulfatos y nitratos.

En la hidrósfera es más abundante el sodio en comparación con el potasio, esto está relacionado con la mayor resistencia al intemperismo por parte de los minerales potásicos.

En los suelos salinos y sódicos, el potasio adsorbido es considerablemente menor que el sodio. Esto se debe a que el potasio se encuentra en proporción menor a la del sodio en las aguas superficiales y freáticas (Richards, 1973).

Las sales minerales del potasio son: silvita KCl , carnalita $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, kainita $\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ y salitre potásico KNO_3 .

1.3.1.5. Cloro (Cl).

El cloro en la corteza terrestre forma parte de esta en un 0.10%; una gran cantidad se encuentra en las rocas sedimentarias de origen marino, 0.05% del material de rocas extrusivas es cloro, y en rocas alcalinas el cloro es 0.7% del material que las constituye; pero es importante mencionar que la mayor cantidad de cloro se encuentra en la hidrósfera, alrededor de 60% de las reservas de este elemento están ahí. Debido a la

evaporación que se da en golfos pequeños y lagunas limítrofes al mar, los cloruros de sodio, potasio y magnesio, forman yacimientos de gran potencial. En las aguas freáticas de los suelos de las zonas áridas y de regiones sin escurrimientos, se encuentran cantidades considerables de este ión (Richards, 1973).

Los minerales del cloro son: halita NaCl , silvita KCl , epsomita $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, carnalita $\text{K}_2\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, kainita $\text{K}_2\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, y cloruros de magnesio y calcio hidratados con hasta doce moléculas de agua en algunos casos (Richards, 1973).

1.3.1.6. Azufre (S).

0.06% de la corteza terrestre está constituida por azufre; en el caso de las rocas cristalinas, el 0.05% de sus componentes es azufre; en tanto que para las rocas sedimentarias, un 0.22% de sus componentes lo es el azufre.

El azufre en las rocas extrusivas se encuentra en forma de pirita FeS_2 , gayun $3\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$, y otros.

En las rocas sedimentarias predomina el azufre en forma de sales del ácido sulfúrico, tales como: yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, anhidrita CaSO_4 , kiserita MgSO_4 , mirabilita $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, glauberita $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$, astrakanita $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ y kainita $\text{K}_2\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

En la hidrosfera, 0.09% de sus componentes está constituido por azufre, es por eso que una cantidad considerable se encuentra en los océanos.

1.3.1.7. Carbono (C).

En las profundidades del planeta, los compuestos de carbono forman yacimientos de carbón, petróleo y gas.

En la corteza terrestre los compuestos de carbono están distribuidos en forma de carbonatos de calcio que forman parte de las calizas y mármoles. Los carbonatos de

calcio, uniéndose con el magnesio forman las dolomitas $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Una gran cantidad de carbonatos, fundamentalmente CaCO_3 y MgCO_3 están contenidos en las rocas sedimentarias.

En las soluciones acuosas de los suelos sódicos y de los suelos salinos se encuentran carbonatos y bicarbonatos de sodio. Los Carbonatos de calcio y de magnesio se solubilizan débilmente en el agua, en tanto que los bicarbonatos de estos mismos elementos son mas solubles.

Los minerales que contienen carbono y que están ampliamente distribuidos son: calcita CaCO_3 , dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, magnesita MgCO_3 , soda Na_2CO_3 , potasa K_2CO_3 , y trona $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

1.3.2. Solubilidad de las sales nocivas para las plantas.

El tipo de sales a que se hace referencia son: cloruros de Na, Ca y Mg; los sulfatos de Na y Mg y los bicarbonatos de Na, Ca y Mg (Ayers y Wescot, 1987).

En las rocas sedimentarias, capa del intemperismo, y suelos, una gran parte de las sales se encuentran en forma cristalina; durante el humedecimiento una parte de estas sales pasa a la fase líquida. A medida que aumenta la temperatura, la solubilidad aumenta en algunas sales como NaHCO_3 , K_2SO_4 , Na_2SO_4 y Na_2CO_3 .

En cuanto a la precipitación de las sales contenidas en las aguas, estudios han demostrado que en primer lugar se precipitan los hidróxidos de silicio y fierro, después los carbonatos de calcio y de magnesio, enseguida el yeso y los sulfatos de magnesio, y por último cloruros de sodio, potasio y magnesio (Ayers y Wescot, 1987).

Al principio los iones de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^- , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^- , son extraídos en sus orígenes de las mallas cristalinas de los minerales que conforman las rocas. Se puede señalar que la concentración relativa de los iones depende de los

procesos específicos que se presentan en las soluciones de las aguas para riego (Ayers y Wescot, 1987)

1.4. Calidad del agua para riego e importancia de su estudio.

La calidad del agua se refiere a las características de una fuente de agua que influyen sobre su aptitud para un uso específico. Es decir, en que grado la calidad del agua cumple con los requerimientos del uso al cual se destinará. En la evaluación de la calidad de agua para riego se pone énfasis en las características químicas, aunque el efecto de su aplicación dependerá de otros factores como el tipo de suelo, cultivo a regar y condiciones climáticas (Bresler *et al.* 1982).

1.5. Problemas asociados a la calidad del agua de riego.

La composición y concentración de sales en la solución del suelo puede afectar el crecimiento de las plantas debido a: i) cambio en las propiedades del suelo; ii) efecto de toxicidad y iii) efecto osmótico (Rhoades, 1972)

Los criterios prevalentes para calificar las aguas para riego y el peligro potencial de su uso son:

1.5.1. Salinidad.

El problema se produce por acumulación de sales solubles en la zona radical de los cultivos, hasta niveles o concentraciones que causan pérdidas de rendimiento. Su acumulación se produce por aporte directo del agua de riego o a partir del ascenso capilar desde napas freáticas cercanas a la superficie. Este último aporte es muy común en las regiones áridas y semiáridas bajo riego (Bower, 1964). Otro proceso que contribuye a la salinización del suelo es por la absorción de agua por las plantas, que hace que la concentración salina de la solución del suelo aumente a medida que el suelo se seca. Con la repetición de este fenómeno se acumularán cantidades crecientes de sales, cuya concentración finalmente salinizará el suelo y limitará el crecimiento normal de los cultivos; ya que la alta concentración de sales en la zona radical reduce

la disponibilidad de agua para las plantas por aumento del potencial osmótico de la solución.

Los cultivos tienen diferente tolerancia a las sales debido a la propiedad de efectuar un ajuste osmótico que les permite generar gradientes de potencial necesarios para extraer el agua en los suelos salinos (Richards, 1973; Rhoades, 1972).

1.5.2. Sodicidad

El peligro de producir sodicidad en el suelo está relacionado con la acumulación de sodio intercambiable en el suelo lo cual produce un deterioro de la permeabilidad y estructura. Los riesgos de un agua para producir sodicidad en el suelo han sido expresados por diferentes índices Lavado (1976), resumió las distintas alternativas propuestas por diferentes especialistas. El índice más usado es la RAS propuesto por Richards, (1973), que a pesar de ser empírico es ampliamente empleado por su correlación con el PSI. El PSI se calcula como el cociente porcentual entre el sodio de intercambio y la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

$$\text{PSI} = (\text{Ninterc} / \text{CIC}) \times 100$$

El RAS se calcula como :

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}}$$

donde las concentraciones de los iones en solución se expresan en mmolc L-1.

Generalmente la salinización conduce a un incremento del PSI, debido a que las sales de sodio, que son las más solubles en la naturaleza, pueden mantenerse en solución aún en concentraciones muy elevadas. El incremento gradual del PSI, consecuencia del incremento de la concentración de sodio en la solución del suelo, se denomina proceso de sodificación. El suelo con un PSI igual o superior a 15% se denomina suelo sódico. La intensidad del proceso de sodificación depende de la concentración de sales del agua

aplicada al suelo, de la cantidad de agua agregada cada año y de la CIC del suelo (Richards, 1973; Rhoades, 1972).

1.5.3. Efecto de toxicidad.

Algunos solutos tienen efecto tóxico directo sobre los cultivos. Los problemas de toxicidad se diferencian de los de salinidad en que ocurren dentro de las plantas. Se producen cuando un ión absorbido se acumula en las hojas por efecto de la transpiración, hasta un nivel que daña la planta. El grado de daño depende del tiempo, la concentración, la sensibilidad del cultivo y el consumo de agua. Los iones de las aguas de riego que pueden causar daño en forma individual o combinada son: cloro (Cl), sodio (Na) y boro (B) (Maas, 1984).

La toxicidad más común a partir del agua de riego es la producida por el cloro, que no es adsorbido por el suelo, y se mueve fácilmente en la solución desde donde es absorbido por la planta y circula en ella hasta acumularse en las hojas. Si la concentración sobrepasa la tolerancia del cultivo aparecen claros síntomas de toxicidad que incluyen hojas quemadas y necrosis de tejidos (Maas, 1984). Cloro y sodio también pueden ser absorbidos directamente por el follaje, cuando se riega por aspersión, en períodos de alta temperatura y baja humedad relativa (Maas, 1984).

Los síntomas de toxicidad por sodio son el quemado y muerte de tejidos en la periferia de la hoja, comienzan en las hojas más maduras, progresando hacia el centro y finalmente en las hojas jóvenes. En los cultivos sensibles, principalmente en los que tienen ciclo plurianual (árboles frutales), los síntomas de toxicidad debidos al Na aparecen a niveles de 0,25 a 0,50% en peso seco.

El boro es un elemento esencial para el crecimiento de los cultivos. Se requieren cantidades relativamente bajas y se vuelve rápidamente tóxico cuando dichos valores superan el umbral (Wilcox, 1960).

Para algunos cultivos, una cantidad del orden de los 0,2 mg L⁻¹ de boro en el agua es esencial, pero se vuelve tóxico a concentraciones de 1 a 2 mg L⁻¹ (Wilcox, 1960). Los síntomas de toxicidad por boro, que normalmente aparecen primero en las hojas más viejas, son el amarillamiento, progresivo marchitamiento y necrosis desde el borde hacia el centro de la hoja a medida que aumenta la concentración (Wilcox, 1960; Prieto y Angueira, 1996).

1.5.4. Peligro de salinidad (CE) y sodio (RAS) Diagrama correspondiente para la clasificación de las aguas para riego en función de estos parámetros.

La concentración total de sales solubles en las aguas para riego, para fines de diagnóstico y clasificación, se pueden expresar en términos de conductividad eléctrica (C.E.); con base en esto, las aguas para riego se han dividido en 4 clases:

- Aguas de baja salinidad (C1): $0 \text{ mS cm}^{-1} < \text{CE} < 0.25 \text{ mS cm}^{-1}$, pueden usarse para riego en casi todos los cultivos y en casi todos los tipos de suelo, la salinización de los suelos es mínima. Pueden ser necesarios lavados de suelo después de practicar el riego durante mucho tiempo, pero eso solo si la permeabilidad de los terrenos es baja y los cultivos se ven afectados por la salinidad.
- Aguas de salinidad media (C2): $0.25 \text{ mS cm}^{-1} < \text{CE} < 0.75 \text{ mS cm}^{-1}$, pueden usarse siempre y cuando tengan un grado moderado de lavado de suelos. En casi todos los casos, y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad, estas aguas pueden usarse en la producción de plantas moderadamente tolerantes a las sales.
- Aguas altamente salinas (C3): $0.75 \text{ mS cm}^{-1} < \text{CE} < 2.25 \text{ mS cm}^{-1}$, no es conveniente usarlas para riego en suelos cuyo drenaje sea deficiente, y aun con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales para el control de la salinidad, además de que es necesario que las plantas a regar con estas aguas sean muy tolerantes a la salinidad.

- Aguas muy altamente salinas (C4): $CE > 2.25 \text{ mS cm}^{-1}$, no son apropiadas para riego bajo condiciones ordinarias, pero pueden usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado, debiendo aplicarse un exceso de agua para lograr un buen lavado, también es muy importante que los cultivos a regar con estas aguas sean altamente tolerantes a las sales.

Las aguas cuya $CE \leq 0.75 \text{ mS cm}^{-1}$ son satisfactorias en cuanto a concentración de sales, aun cuando los cultivos sensibles pueden ser afectados de manera adversa cuando se usan aguas que presenten $0.25 \text{ mS cm}^{-1} < CE \leq 0.75 \text{ mS cm}^{-1}$. Las aguas con $0.75 \text{ mS cm}^{-1} < CE \leq 2.25 \text{ mS cm}^{-1}$ son comúnmente utilizadas, obteniéndose un buen crecimiento de las plantas, siempre y cuando se haga un buen manejo del suelo y se cuente con drenaje eficiente (Richards, 1973; Rhoades, 1972).

El empleo de aguas con $CE > 2.25 \text{ mS cm}^{-1}$ es una excepción, y en escasas ocasiones se obtienen buenos resultados en las cosechas de los cultivos irrigados con este tipo de aguas.

La clasificación de las aguas para riego, de acuerdo con sus contenidos de sodio, se ha hecho con la intención de prever el efecto del ión sodio sobre los sistemas coloidales de los suelos, además de entender los problemas físico-químicos que se derivan de tener altas cantidades de sodio intercambiable en los suelos. Se sabe que los suelos que tienen altas cantidades de sodio intercambiable poseen un $\text{pH} > 8.4$, alta dispersión de los coloides orgánicos e inorgánicos, y altos contenidos de carbonatos y bicarbonatos de sodio (Richards, 1973; Rhoades, 1972).

Un parámetro muy importante, para clasificar las aguas en base a su contenido de sodio intercambiable, es la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la cual se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

donde:

RAS = Relación de Adsorción de Sodio

Na = concentración de los iones de sodio expresada en mmolc L-1

Ca = concentración de los iones de calcio expresada en mmolc L-1

Mg = concentración de los iones de magnesio expresada en mmolc L-1

La subdivisión de las aguas de riego, con respecto a la RAS, se basa esencialmente en el efecto que tiene el sodio intercambiable sobre las condiciones físicas de los suelos (Bower *et al*, 1968). Sin embargo, puede darse el caso de que, aunque los contenidos de sodio intercambiable no afecten las condiciones físicas de los suelos, las plantas sensibles a este elemento pueden sufrir daños a consecuencia de la acumulación del sodio en sus tejidos.

- Aguas bajas en sodio (S1): $0 < RAS < 10$, son aguas que pueden usarse para el riego en la mayoría de los suelos y dar como resultado pocas probabilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Pero cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.
- Aguas medias en sodio (S2): $10 < RAS < 18$, estas aguas solo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.
- Aguas altas en sodio (S3): $18 < RAS < 26$, pueden provocar niveles altos de sodio intercambiable casi en todos los tipos de suelo, por tal razón será necesario prácticas especiales de manejo, buen drenaje, facilidad de lavado del suelo e incorporaciones adicionales de materia orgánica. El riego con estas aguas, sobre

suelos con alto contenido de yeso, difícilmente dará lugar al desarrollo de niveles perjudiciales de sodio intercambiable.

- Aguas muy altas en sodio (S4): $RAS > 26$, esta agua es inadecuada para el riego de cultivos agrícolas, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio de los suelos y la aplicación de yeso u otros mejoradores en combinación con el uso de este tipo de aguas permite que aun siga siendo rentable el cultivo que se este manejando.

El riesgo de sodificación de los suelos irrigados depende principalmente de la concentración absoluta y relativa en que se encuentren en el agua de riego los iones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^{+} . Si la proporción de Na^{+} es alta, será mayor el riesgo de sodificación, y al contrario, si predomina el Ca^{2+} y el Mg^{2+} , el riesgo de sodificación es menor (Bower 1964).

El diagrama para la clasificación de las aguas para riego está basado en la Conductividad Eléctrica (CE) y en la relación de Adsorción de Sodio (RAS).

Estas son las ecuaciones empíricas de la ley de acción de masas entre los cationes solubles y los intercambiables, y delimitan las diferentes clases de sodio.

Los constituyentes inorgánicos solubles en forma iónica de las aguas para riego reaccionan con los suelos, y los principales cationes son: Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} , y pequeñas cantidades de K^{+} ; en tanto que los aniones principales son: CO_3^{-2} , HCO_3^{-} , Cl^{-} , SO_4^{-2} , y en menor cantidad NO_3^{-} .

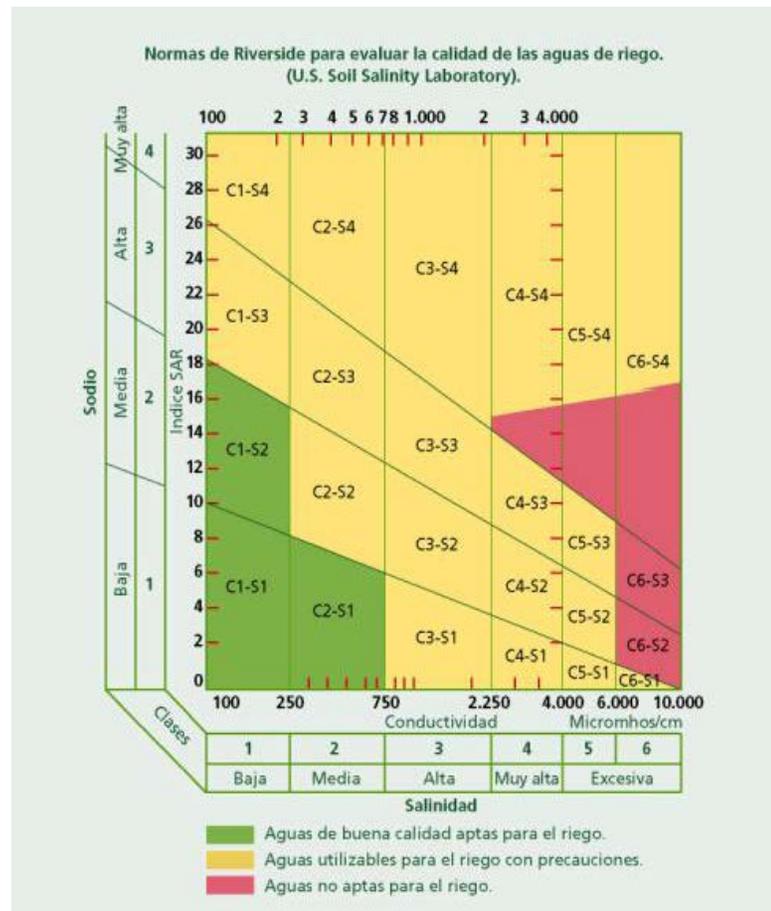


Figura 2.- Diagrama para la clasificación de las aguas para riego.

1.5.5. Problemas de infiltración en los suelos agrícolas bajo riego.

Este tipo de problemas existe cuando la infiltración del agua en el suelo es muy lenta como consecuencia de esto no se humedece el suelo lo suficiente en toda la zona de raíces de los cultivos, ya que antes de que esto último ocurra, el agua se escurre y/o se evapora.

Esta disminución de la velocidad de infiltración del agua en el suelo se debe a modificaciones del medio poroso de los suelos, lo que está directamente relacionado con la magnitud de la concentración de sodio intercambiable, es decir, se debe a los altos contenidos de iones de sodio intercambiable en las soluciones de los suelos y de las aguas de riego.

Se ha establecido que cuando los iones de calcio se encuentran adsorbidos en cantidad suficiente en los suelos, los suelos tienen condiciones favorables para el desarrollo de los cultivos agrícolas (Peterson, 1947). Por otro lado, cuando los iones de sodio intercambiable se encuentran adsorbidos en exceso en los suelos, los suelos presentan dispersión coloidal y mayor viscosidad, y en estas condiciones los suelos poseen baja o muy baja velocidad de infiltración del agua.

La dispersión de los suelos y la pérdida de permeabilidad o modificaciones de la geometría del medio poroso se producen únicamente cuando la concentración de sodio sobrepasa la concentración de calcio en una proporción por encima de 3:1 (Ortega, 1993).

El manejo agronómico de los cultivos agrícolas se puede dificultar debido a los efectos de dispersión que producen los iones sodio, lo cual conduce, por ejemplo, a falta de aireación para las raíces de la planta y formación de costras en el suelo que dificultan la germinación de las semillas y emergencia de las nuevas plantas.

Es posible que la solución del suelo se reconcentre por la extracción de agua de las plantas; o bien se diluya por los efectos del riego o de la lixiviación del ión sodio fuera de la zona radical. En lo que se refiere a los iones de calcio, estos no se mantienen completamente en solución o en cantidades constantes, si no que su concentración cambia de manera continua hasta alcanzar un equilibrio. Estas variaciones en su concentración se deben a la disolución de micronutrientes de yeso y de carbonato de calcio, aumentando con esto las concentraciones de calcio en las soluciones del suelo. La precipitación de los iones de calcio, que generalmente ocurren en forma de carbonato de calcio, influye directamente en los valores relativos de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), ya que la concentración relativa del ión sodio en las soluciones del suelo se ve aumentada debido a que se precipita parcialmente una fracción de calcio en forma de carbonato de calcio (Bower, 1964; Wilcox, 1960).

La disolución del calcio se promueve por la dilución de la solución o por el bióxido de carbono disuelto en el agua del suelo, mientras que su precipitación ocurre debido a la presencia de suficiente calcio conjuntamente con carbonatos, bicarbonatos y sulfatos en cantidades suficientes como para exceder la solubilidad de carbonato de calcio o la solubilidad del sulfato de calcio. Por tal motivo, la calidad de las aguas depende de los procesos de solubilización de los iones de calcio y de la precipitación de los mismos en presencia de iones carbonato y bicarbonato. En consecuencia, el índice de RAS adquiere gran importancia para la evaluación de la calidad agronómica de las aguas superficiales y subterráneas para riego (Rhoades, 1972; Richards, 1973; Ayers y Wescot, 1985).

1.5.6. Evaluación de la calidad del agua de riego.

La calidad del agua de riego está íntimamente ligada al contenido total y al tipo de sales. Para su medición, los indicadores más utilizados son: concentración total desales, concentración absoluta y relativa de iones.

1.5.6.1. Concentración total de sales (CTS) o sales totales disueltas (STD):

Este indicador es muy utilizado y se expresa en masa de soluto por volumen de agua. La estimación de sales solubles a través de las determinaciones de resistencia eléctrica, se han usado por mucho tiempo ya que se pueden hacer y con precisión. Sin embargo la CE, que es la recíproca de la resistencia, es más aplicable para mediciones de salinidad, en virtud de que la cantidad de corriente eléctrica transmitida por una solución salina en condiciones estándar se incrementa al aumentar la concentración de sales en solución, lo cual simplifica la interpretación de las lecturas (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954). Más aún, al expresar los resultados en términos de conductividad específica hace que las determinaciones sean independientes del tamaño y forma de las muestras. Actualmente la unidad de medición es el decisiemens por metro (dS m^{-1}) a 25°C , aunque todavía es corriente la utilización de unidades de la CE como milimhos cm^{-1} (mmhos cm^{-1}) o micromhos cm^{-1} .

El mmhos cm^{-1} es utilizado para expresar el contenido salino de un suelo y es numéricamente igual a dS m^{-1} . La segunda, micromhos cm^{-1} , es una unidad muy común para el contenidos de sales del agua, ya que la mayoría de las utilizadas confines de riego se encuentran por debajo o muy cerca de 1 dS m^{-1} o 1 mmhos cm^{-1} ($1 \text{ mmhos cm}^{-1} = 1 \text{ dS m}^{-1} = 0,64 \text{ gr L}^{-1} = 640 \text{ mg L}^{-1}$).

1.5.6.2. Concentración absoluta de iones.

La concentración absoluta de iones específicos en el agua se expresa en la mayoría de los casos utilizando las unidades de concentración **meq L⁻¹**. Actualmente se prefiere aplicar el sistema internacional de unidades (SI), cuya unidad de concentración de solución es el **milimol carga (mmol_c)** que es numéricamente igual a meq l^{-1} .

1.5.6.3. Concentración relativa de iones.

Uno de los problemas del uso de agua para riego de mala calidad, es el aumento de la proporción de sodio retenido en el complejo de intercambio del suelo. Este proceso conocido como **sodificación** tiene importantes consecuencias en las propiedades físicas que afectan principalmente el movimiento de agua en el suelo. Para evaluar la calidad del agua desde este punto de vista, se necesita conocer el contenido relativo de iones; en especial la relación entre el sodio y los principales cationes bivalentes, Ca y Mg.

La composición de los cationes intercambiables del suelo está relacionada con la concentración de los cationes en la solución

Si bien la existencia de un equilibrio entre el agua de riego y la solución del suelo es válida en la mayoría de las situaciones, en ciertas condiciones pueden producirse cambios importantes en las concentraciones de equilibrio por alguna de las siguientes razones:

El sodio, que constituye una parte importante de la salinidad, permanece soluble y en equilibrio con el sodio intercambiable en todo momento, ya que el aumento de concentración debido a la evapotranspiración del agua, la disminución por dilución con la aplicación de agua o el lavado por el drenaje tiene muy poco efecto sobre su concentración en solución, al ser un ión de alta solubilidad.

El calcio, por ser menos soluble, no permanece en solución ni igualmente disponible. Está en permanente cambio hasta que alcanza un cierto equilibrio, produciendo un aumento de su contenido por disolución de los minerales del suelo o una disminución por precipitación desde la solución en forma de carbonato de calcio o yeso.

La disolución del calcio es fomentada por dilución de la solución o a la presencia de CO_2 disuelto en el agua del suelo. La precipitación del calcio se produce cuando la concentración de calcio, carbonatos, bicarbonatos o sulfatos, es lo suficientemente alto como para exceder la solubilidad del carbonato de calcio (caliza) o sulfato de calcio (yeso). Poco después de un riego, la cantidad de calcio puede variar debido a la disolución o precipitación del calcio contenido en el agua del suelo.

La existencia de estos procesos puede establecer en el suelo una condición de equilibrio diferente de la esperada en función del contenido iónico del agua de riego. La expresión original de la RAS no tiene en cuenta estos cambios, por lo que su uso introduce algún tipo de error en la evaluación del peligro de sodificación.

Con la finalidad de definir un solo indicador del peligro de sodificación que incluyera los posibles cambios en la concentración de calcio, Ayers y Wescot (1976), introdujeron el concepto de la RAS ajustado (RAS_{aj}) propuesto originalmente por Rhoades, (1972). En la siguiente ecuación del RAS_{aj} se tiene en cuenta la concentración de CO_3 y HCO_3 .

1.6. Salinidad del agua de riego y tolerancia de algunos cultivos.

El exceso de salinidad en la zona de las raíces provoca una reducción general de la tasa de crecimiento de las plantas. El estrés salino incrementa esencialmente la energía que debe utilizar la planta para extraer agua del suelo y realizar el ajuste bioquímico necesario para que el crecimiento relativo no sea afectado (Maas, 1984; 1985). Si bien, la salinidad reduce la disponibilidad de agua para los cultivos, estos responden de diferentes formas. Algunos cultivos pueden producir rendimientos aceptables a niveles de salinidad relativamente altos. La Tabla 2 resume la información disponible sobre la tolerancia de algunos cultivos y forrajeras de importancia en la zona (Ayers y Wescot, 1985 y Rhoades et al. 1992).

Tabla 2.- Tolerancia de cultivos a la salinidad del agua.

Bajo	Medio Bajo	Mediana	Alto
Frijoles	Maíz	Rabiza	Cebada
Zanahoria	Maní	Sorgo	Pastos
Cebolla	Arroz	Soya	Trigo
Aguacate	Caña de azúcar	Sorgo Sudan	Varios Zacates
Limón	Brócoli	Zacate Guinea	
	Repollo	Remolacha	
	Coliflor	Lima	
	Lechuga	Papaya	
	Papa	Plátano	
	Rabino	Banano	
	Espinaca		
	Tomate		
	Pepino		

1.7. Clasificación del agua de riego.

Las clasificaciones existentes suponen que el agua de riego ha de emplearse bajo condiciones medias de textura de suelo, velocidad de infiltración, drenaje, cantidad y

tolerancia del cultivo a las sales (Richards, 1954). Más aún, la mayoría de ellas se ajustan a las características de clima árido o semiárido con baja precipitación efectiva en suelos de textura franco arenosa o franco arcillosa, pero siempre con buen drenaje interno y capa freática profunda, inexistente, o si es superficial, controlada por un sistema de drenaje sub superficial.

La realidad puede apartarse en mayor o menor medida a estas características, lo cual puede hacer inseguro el uso de un agua que, bajo condiciones medias sería de muy buena calidad y a la inversa, un agua considerada bajo condiciones medias de dudosa calidad podría ser aceptable. Esto se debe tener muy en cuenta cuando se trata de clasificar las agua para riego Richard (1954). Sin embargo, las diferentes respuestas de un mismo cultivo en función de las condiciones ambientales y las prácticas de manejo, así como las diferentes condiciones económicas y disponibilidad del recurso, relativizan la posibilidad de definir una clasificación de la calidad del agua, con validez para todas las condiciones (Prieto y Angueira, 1996).

Cuando se realiza la evaluación del recurso agua con fines de riego deben tenerse en cuenta: i) concentración total de sales solubles, ii) concentración relativa del sodio con respecto a otros cationes, iii) la concentración relativa de bicarbonatos respecto a la de calcio más magnesio y la concentración de boro u otros elementos que pueden ser tóxicos.

Existen diferentes propuestas de clasificación de las aguas destinadas al riego. En nuestra zona se utiliza la propuesta por Richard (1954), del Laboratorio de Salinidad de Riverside, USDA, mientras que en otras situaciones utilizan la propuesta de FAO, que a través de los trabajos publicados de Ayers y Westcot (1985) y Rhoades et al.(1992), han propuesto lineamientos para la evaluación de la calidad del agua.

Si bien, la clasificación de Richard (1954), aún se utiliza en el país, los resultados experimentales disponibles, y la creciente expansión del riego en regiones con

condiciones naturales y de manejo diferentes de aquéllas bajo las cuales fue definida, han reducido considerablemente su utilidad.

La clasificación de la calidad de agua con respecto al peligro de sodio es más compleja. Las rectas presentadas en el esquema de clasificación de aguas para riego propuesto por Richards 1954, responden a ecuaciones empíricas, que expresan la dependencia del peligro del sodio de la concentración total de sales. La presencia de sales permite mantener el estado floculado y aumentar la permeabilidad del suelo (Quirk,1971). Quirk y Schofield (1955) midieron la permeabilidad de suelos saturados y para cada nivel de sodio de intercambio encontraron un umbral de concentración de sales al cual la interacción de las partículas de arcilla (expansión y de floculación) tenían un efecto importante en la disminución de la permeabilidad. McNeal y Coleman (1966) concluyeron que suelos con alto contenido de caolinita, sesquióxidos y materiales amorfos permanecían estables aún a baja concentración de electrolitos.

La propuesta de FAO es menos restrictiva en cuanto al contenido salino, incorpora el concepto de interacción RAS-CE para evaluar el peligro de sodicidad e incorpora los métodos de riego en la evaluación de los problemas de toxicidad en aquellos iones que pueden ser absorbidos por las plantas a través de sus hojas (Prieto y Angueira, 1996). En el anexo se presenta las principales directivas para la evaluación de las aguas propuestas por la FAO.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción general de la cuenca en estudio.

EL presente trabajo de investigación se desarrolla en la Cuenca del Río Guadalquivir del Departamento de Tarija – Bolivia, que está dentro del Subsistema Río Grande de Tarija, el cual a su vez se enmarca dentro del Sistema Hídrico del Río Bermejo. La Cuenca del Guadalquivir se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas extremas: paralelos de 21° 15' y 21° 35' Latitud Sur y meridianos 64° 35' y 64° 56' de Longitud Oeste.

Por el norte limita con las cuencas de afluentes al río Pilaya, al sur con la cuenca del río Tolomosa, al este con la cuenca del río Santa Ana y al oeste con la cuenca de río Tomayapo. La parte más baja tiene una altura de 1.800 msnm y la parte más alta, ubicada en la Cordillera de Sama, tiene 4.344 msnm. El curso principal del río Guadalquivir, nace con el nombre de río Chamata, tiene una longitud de 60 km. La red de drenaje es típicamente dendrítica.

La Cuenca del Río Guadalquivir tiene un área de 1032 Km² y comprende las siguientes subcuencas: Carachimayu, Corana, Sella, TojtiWayko, El Monte, San Pedro, Guadalquivir-Trancas, Calama, Erquis, Pajchani Chamata y La Victoria.

Los sistemas geológicos de la cuenca de mayor preponderancia son las siguientes: Ordovícico y el Cuaternario, presentándose en menor predominio el Silúrico, Cámbrico, Devónico y Carbonífero.

Dentro de la Cuenca del río Guadalquivir se encuentran ubicadas 58 comunidades, de las cuales 12 comunidades corresponden a la jurisdicción de la Provincia Cercado y 46 comunidades a la Jurisdicción de la Provincia Méndez, tal como se detalla en el siguiente Tabla:

Tabla 3.- Número de comunidades por provincia que se encuentran ubicadas en la Cuenca del río Guadalquivir.

Comunidades	Provincia	Nº
Temporal, Monte Cercado, San Pedro de Buena Vista, Sella Cercado, Pampa Galana, Rummy Cancha, Sella Candelaria, Ciudad Tarija, Monte Centro, Monte Sud, San Mateo, Los Álamos.	Cercado	12
San Lorenzo, Canasmoro, Corana Sud, Corana Norte, Erquis Ceibal Erquis Sur, Bordo el Mollar, Rancho Norte, Rancho Sud, Tucumillas, Carachimayo Chaupicancha, Cirminuelas, El Barranco, La Hondura, Choroma, Cochas, La Queñua, Tres Morros, Cadillar, Coimata, Tomatitas, Chamatas, Tomatas Grande Sur, Trancas, La Victoria, Rincón de la Victoria, Sella Mendez, Lajas, Erquis, Norte, Erquis Orpeza, Santa Barbara Chica, Santa Barbara, Monte Mendez, Calama, Jurina, Marquiri, Tomatitas, Tomatas Grande Centro, Tomatas Grande, Tomatas Grande Colorado Sur, Tomatas Grande, La Victoria La Pampa, El Puesto,	Méndez	46

Con relación al ámbito económico productivo se puede indicar que la ocupación principal de los habitantes de la cuenca de los municipios es la agropecuaria y en mayor medida la agricultura.

El modelo productivo es tradicional, basado en la agricultura y ganadería, la cual constituye el pilar fundamental de la economía de las familias que habitan en el área rural de la cuenca, entre los principales cultivos agrícolas a riego se tienen: Tubérculos, papa; Gramíneas, maíz, avena, trigo y cebada; leguminosas: arveja y haba; Hortalizas: Cebolla, Zanahoria, lechuga, acelga, perejil, coliflor, repollo, espinaca, tomate, zapallo y brócoli; frutales: durazno, frambuesa, ajipa, palta, papaya, mandarina, naranja, frutilla y chirimoya; forrajes, alfalfa y otros como flores.

De los cultivos bajo riego la mayor superficie es ocupada por el cultivo de maíz, esto explica por qué además de darles como producto el maíz, la gente lo aprovecha como forraje para sus animales, seguido por orden de importancia por el cultivo de papa y la arveja.

Los meses lluviosos se presentan a partir de noviembre, con lluvias máximas en los meses de enero - marzo. Los siete meses restantes son los de menor precipitación o de estiaje. Se aprecia también una relación directa entre la precipitación y la temperatura, de forma tal que los meses de máxima precipitación son también los de máximas temperaturas.

2.2. Desarrollo del ensayo.

2.2.1. Localización del sitio de muestreo.

Se conformó una Red de Monitoreo de 4 puntos de muestreo que fueron ubicados en diferentes sitios del principal cuerpo de agua de la cuenca del Guadalquivir de manera que se cubra con los principales ríos, afluentes y quebradas que presentan importancia considerable para la economía regional, los mismos se detallan en el siguiente cuadro:

Tabla 4.- Ubicación de los sitios de muestreo de las aguas del Río Guadalquivir.

N°	Sitio	Ubicación UTM		Altura
		Coordenadas Este	Coordenadas Norte	
1	Trancas cabecera Río Guadalquivir	0310017 m E	7642829 m S	2108
2	Rancho Sud Altura Planta Betonmix	0318787 m E	7625267 m S	1952
3	A la altura del Puente Bolívar	0321067 m E	7616639 m S	1868
4	A la altura del puente-San Luís	0325502 m E	7611373 m S	1816

La Ubicación de los puntos de muestreo obedece a los siguientes criterios:

- Proximidad a las áreas de importancia en términos de uso del agua.
- Los puntos de muestreo deben ser representativos del cuerpo receptor, donde se registren los efectos de las descargas de desechos y las zonas de recuperación.
- Accesibilidad del sitio de muestreo.
- Estimación previa del grado de contaminación de la zona, etc.

2.3.Actividades previas al muestreo.

Previo a la realización del muestreo se dio cumplimiento a ciertas actividades que tienen como objetivo garantizar la ejecución de un trabajo eficiente, en cumplimiento a los procedimientos de muestreo. Estas actividades están contempladas dentro de los siguientes ítems:

- 1) Plan de muestreo.
- 2) Preparación del material utilizado en el muestreo.
- 3) Limpieza.
- 4) Ubicación y descripción de las estaciones de muestreo.

2.3.1. Plan de muestreo.

Se tomó en cuenta los objetivos del muestreo de tal forma que no sean desperdiciados tiempo y dinero a través de la adquisición de datos demasiado precisos o no suficientemente precisos para sus objetivos, de tal manera que el plan proporcione al laboratorio, la seguridad y protección de las muestras contra errores u omisiones que podrían en un momento dado comprometer o invalidar los resultados del muestreo.

2.3.2. Preparación.

3. Acondicionamiento de envases.

Según las recomendaciones del Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), se acondicionó envases de plástico de agua de mesa purificada y ozonizada de una capacidad de 2 litros para realizar el muestreo. Los envases no se sometieron al almacenamiento a baja temperatura y/o conservación química antes del análisis de laboratorio.

3.1.1. Ubicación y descripción de la estación de muestreo.

La ubicación y el número de identificación de los sitios de muestreo, fueron posicionados exactamente en un mapa. Esto nos permitió en el campo encontrar fácilmente el punto para que los datos puedan ser localizados en una base de datos por computadora. De los puntos de muestreo se obtuvo un reporte fotográfico, con el propósito de documentar el sitio, proporcionando así un material de gran ayuda tanto

para aquel que trabajará en forma continua como para el que visite por primera vez el sitio.

3.2. Muestreo de aguas y envió a laboratorio.

La toma de muestra en el río se la realizó introduciéndose a pie hasta el punto de muestreo (parte media de la corriente del río Guadalquivir) y se procedió a la operación de muestreo con sumo cuidado a media corriente y profundidad sin tocar la profundidad, para evitar, en lo posible, la presencia de elementos sólidos en suspensión.

Posteriormente se procedió al etiquetado del envase con la muestra de agua, con los siguientes datos: número de muestra, sitio de la muestra, altura y coordenadas en UTM y mantener las condiciones más adecuadas para el transporte y la conservación de las muestras.

Finalmente, las muestras se enviaron al laboratorio del CEANID de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, para su correspondiente análisis de los principales parámetros químicos, como son: Na, Ca, Mg y conductividad eléctrica.

3.3. Variables analizadas.

Los parámetros químicos considerados para determinar las variaciones de las concentraciones de los puntos de muestreo y para la clasificación del río Guadalquivir según su aptitud de riego son los siguientes: Conductividad Eléctrica (CE) y los cationes Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y sodio (Na). Parámetros que fueron analizados por separado.

El valor de CE se determinó en laboratorio por el método del conductímetro y los cationes Ca, Mg y Na, mediante el método Volumétrico para los dos primeros y Flamometría para el último catión.

Se considerarán los siguientes parámetros fundamentales: La Conductividad Eléctrica, el Sodio, Calcio y Magnesio, que se utilizaron para calcular el índice RAS (Relación de Absorción de Sodio) y nos permitirá evaluar la calidad de las aguas de acuerdo a su aptitud para riego mediante el uso de las normas de Riverside (U.S. Soil Salinity Laboratorio).

3.3.1. La Conductividad Eléctrica.

Los sólidos se encuentran en la naturaleza en forma disueltos. Las sales disueltas en agua se descomponen en iones cargados positivamente y negativamente. La conductividad se define como la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica a través de los iones disueltos. Los iones más positivos son sodio (Na^+), Calcio (Ca^{+2}), potasio (K^+) y magnesio (Mg^{+2}). Los iones más negativos son: Cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{-2}), carbonato, bicarbonato. Los nitratos y fosfatos no contribuyen de forma apreciable a la conductividad aunque son muy importantes biológicamente.

La salinidad es una medida de la cantidad de sales disueltas en agua. La salinidad y la conductividad están relacionadas porque la cantidad de iones disueltos aumentan los valores de ambas.

Las sales en el mar son principalmente de cloruro de sodio (NaCl). Sin embargo, otras aguas salinas, tales como las de Mono Lake, tienen una salinidad elevada debido a una combinación de iones disueltos como sodio, cloruro, carbonato y sulfato.

Las sales y también otras sustancias afectan la calidad del agua potable o de riego. También influyen en la biota acuática y cada organismo tolera una gama de valores de conductividad. La composición iónica del agua puede ser crítica. Por ejemplo, los cladoceros (pulgas de agua) son mucho más sensibles al cloruro de potasio que al cloruro de sodio en concentraciones iguales.

La conductividad varía en función de la fuente de agua: agua subterránea, agua de escorrentía de la agricultura, aguas residuales municipales y precipitación. Por lo tanto,

la conductividad puede ser un indicador de filtración en agua subterránea o de fugas de aguas residuales.

El agua dulce que se pierde por evaporación aumenta la conductividad y la salinidad de la masa de agua. El calor también puede aumentar la salinidad del mar.

Cuando la temperatura aumenta, la conductividad aumenta también. La salinidad es la cantidad de sal presente en el agua, por lo tanto no depende de la temperatura. 1 mhos es el recíproco de ohms, medida de la resistencia eléctrica. Para la mayoría de aguas, se utilizan las unidades de milli y micro mhos/cm (milli y micro Siemen)

3.3.2. Sodio.

El Sodio es uno de los elementos más estudiados debido a sus efectos tóxicos para la textura de suelos y las cosechas. Una alta concentración de Sodio dispersa las partículas coloidales de suelo, volviéndolo duro y resistente a la penetración de agua. La acumulación de presión osmótica en el suelo debido a la alta concentración de Sodio hace que las raíces de las plantas tengan dificultades para la absorción de agua. Las plantas son sensibles a los cambios de salinidad del suelo y cuando esta sobrepasa un cierto límite, su crecimiento se transforma, reduciendo por lo tanto su productividad. Un suelo con alto contenido en Sodio, puede ser mitigado distribuyendo yeso directamente sobre el suelo o como aditivo del agua de riego.

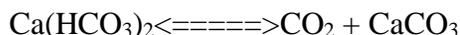
3.3.3. Calcio.

Normalmente el calcio forma sales generalmente solubles, con aniones como hidrogeno carbonato, sulfato, cloruro y fluoruro. En general, suele ser el catión mayoritario en las aguas.

El calcio pasa al agua por disolución cuando proviene de sulfatos (especialmente yesos, muy solubles) y silicatos, o por la acción del CO_2 disuelto en el agua cuando se

trata de Ca presente en calizas, margas y dolomitas. El aporte del metal al agua es muy notable en terrenos yesíferos.

Existe un equilibrio muy típico en aguas denominado "equilibrio carbónico" que establece una relación entre el hidrogeno carbonato de calcio soluble de un agua y el carbonato de calcio, éste en realidad es prácticamente insoluble, si bien se solubiliza por medio del CO₂ presente en aquella. El equilibrio químico es:



Este proceso reversible es de particular importancia en aguas potables e industriales, estando relacionado con el "pH del equilibrio" de un agua: en síntesis, se trata de que cada agua en función de su contenido en CO₃²⁻/HCO₃⁻ / CO₂ tiene un valor típico de pH en el que es inerte desde el punto de vista de su poder de disolución del carbonato o deposición de éste. A este pH dado no se producirá fenómenos de atascamiento o ataque corrosivo a tuberías. La formación de estalagmitas y estalagmitas en cuevas calcareas sigue esta dinámica: el agua subterránea rica en hidrogeno carbonato de calcio soluble, al perder el gas por efecto de la diferente presión parcial al ponerse el agua en contacto con el aire libre, propicia la precipitación del hidrogeno carbonato insoluble, y la consiguiente formación de estalagmitas y estalagmitas.

El calcio junto al magnesio forma la "dureza" del agua. Las concentraciones de calcio en aguas varían mucho, pero en general suelen ir asociadas al nivel de mineralización; por esta misma razón, las aguas subterráneas habitualmente presentan contenido mayores a las superficiales correspondientes.

3.3.4. Magnesio.

El magnesio es un mineral alimentario para todos los organismos excepto para los insectos. Es un átomo central de la molécula de la clorofila, y por lo tanto es una sustancia necesaria para la función fotosintética de las plantas. El magnesio no sólo se encuentra en el agua de mar sino también en ríos y agua de lluvia, y de esta forma se

distribuye de forma natural en el medio ambiente. Tres isótopos del magnesio se forman naturalmente, los cuales son estables y consecuentemente no radiactivos. También existen ocho isótopos inestables. Las pautas que establecen el contenido máximo de magnesio en el agua potable son bastante relativas, ya que no se le atribuyen efectos negativos en seres humanos y en animales. Los problemas ambientales provocados directamente por la presencia de magnesio en agua, hacen necesaria la utilización de ablandadores. Como se citó anteriormente, la dureza es causada, en parte, por el magnesio. Los iones de calcio y magnesio (especialmente de calcio) influyen negativamente la capacidad de limpieza de los detergentes, ya que en el agua que contiene altas concentraciones de iones calcio y magnesio en disolución, cuando éstos se ponen en contacto con el jabón se forman precipitados en forma de sales insolubles, esto hace que el jabón no se disuelva totalmente en el agua, y por lo tanto se pierde cierta capacidad de limpieza. Debido a esta razón, se añade alrededor de un 40% de ablandador al jabón. Estos jabones solían tener fosfatos, pero se descubrió que estos compuestos eran difícilmente biodegradables, y causaban eutrofización.

La dureza del agua difiere de una región a otra, por lo tanto la adición de ablandadores a los detergentes no es necesaria en regiones que tienen aguas blandas. En regiones que tienen aguas de elevada dureza, deben aplicarse mayores cantidades de detergente, de esta forma se está añadiendo cierto poder ablandador. Como consecuencia, otras sustancias presentes en los detergentes, se adicionan también en dosis más altas al aplicarse detergentes en grandes cantidades, esto hace que se compliquen los procesos de tratamiento de aguas residuales.

3.4. Métodos utilizados para el análisis del agua del río Guadalquivir.

En este trabajo de investigación se presentan los resultados de la colecta y análisis químico de 4 muestras del río Guadalquivir en la cuenca del Guadalquivir. Se realizó un muestreo en fecha 22 agosto del 2012, época de estiaje. A estas muestras de agua se les determinó los parámetros químicos con los siguientes métodos.

Tabla 5.-Métodos utilizados para el análisis de las aguas del río Guadalquivir.

Nº	Parámetro(s)	Método
1.-	Conductividad Eléctrica (CE)	Conductímetro
2.-	Calcio (Ca ²⁺)	Volumétrico (titulación)
3.-	Magnesio (Mg ²⁺)	Volumétrico (titulación)
4.-	Sodio (Na ⁺)	Flamometría

3.5. Clasificación del río Guadalquivir según la aptitud de riego.

Una vez obtenidos los resultados de los análisis de los puntos de muestreo, se determinó la calidad del agua de acuerdo a su aptitud para riego de la cuenca en estudio a partir de los datos de Conductividad Eléctrica (CE) y la Relación de absorción de sodio (RAS), que viene definido por la siguiente fórmula:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Donde Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ representan, respectivamente, las concentraciones de los iones de sodio, calcio y magnesio del agua de riego, expresadas en meq/litro o mg/litro.

Con los datos de la Conductividad Eléctrica (CE) y la Relación de Absorción de Sodio (RAS), se estimó la calidad de agua para riego según la aplicación de la norma de Riverside:

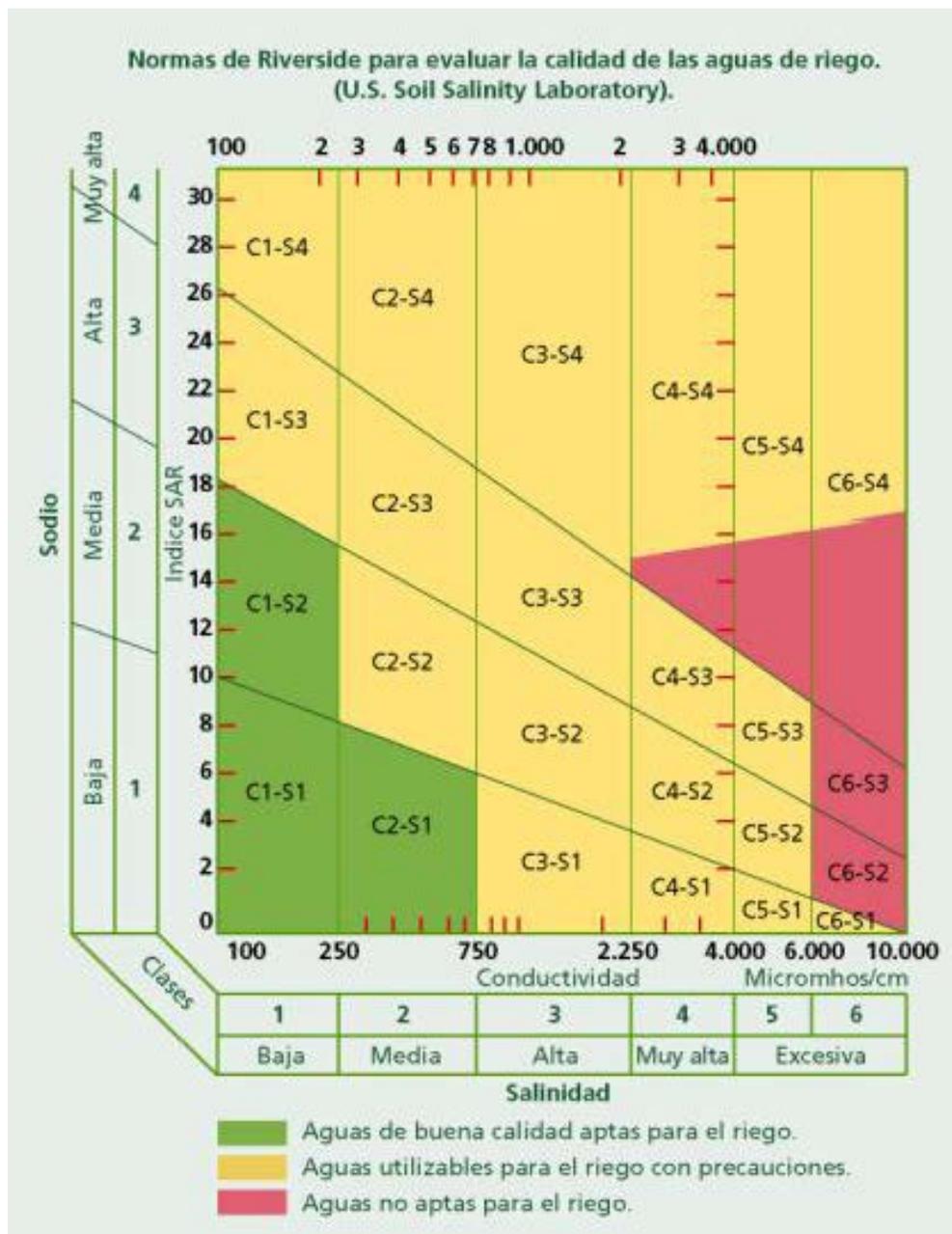


Figura 3. Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego (u.s. soil salinity laboratory).

Tabla 6.-Clasificaciones de las aguas según las normas Riverside.

Tipos	Calidad y normas de uso
C ₁	Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad.
C ₂	Agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad.
C ₃	Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C ₄	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C ₅	Agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente.
C ₆	Agua de salinidad excesiva, no aconsejable para riego.
S ₁	Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
S ₂	Agua con contenido medio en sodio, y por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo en caso necesario
S ₃	Agua con alto contenido en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo. También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes copiosos de riego.
S ₄	Agua con contenido muy alto de sodio. No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Análisis en los puntos de muestreo.

3.1.1. Conductividad Eléctrica.

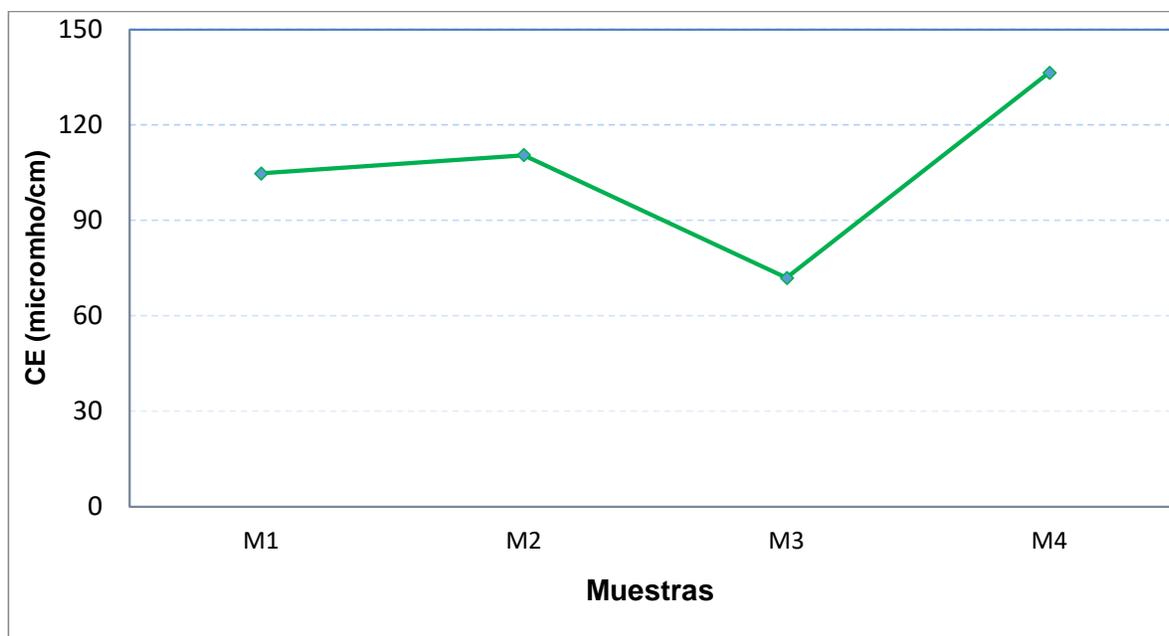


Figura 4.-Conductividad Eléctrica en las muestras de agua del Río Guadalquivir.

Tal como se puede observar en la Figura 4. la mayor concentración de sales se tiene en la muestra M4 (136.4 micromho/cm), que se obtuvo de la angostura de San Luis, parte baja de la cuenca; seguido por las muestras M2 (104.7 micromho/cm) y M1, (110,5 micromho/cm) extraídas de la parte media y alta de la cuenca de Guadalquivir; finalmente la menor conductividad eléctrica se consiguió con la M3. La diferencia que se obtuvo de la muestra M4 con relación a las demás muestras, se debe principalmente por el vertimiento de aguas residuales, a través de la quebrada de torrecillas, de las lagunas de oxidación de COSAALT, así también del matadero Municipal y curtiembres, ubicados en la quebrada Cabeza de Toro, que son afluentes del Río Guadalquivir. Aguas Residuales que incrementan la concentración de sales al cuerpo de agua, tal como lo indica Castro *et. al.*, 1971; Hernández y Durán, 1993, que en la

aguas residuales es considerable el contenido de nitratos, sulfatos y fosfatos. Sin embargo, todos estos valores de conductividad eléctrica identificados en las muestras de agua, según la clasificación de aguas para riego por su CE de Riverside, son bajas en salinidad y según la FAO (1987) se encuentran dentro los límites máximos permitidos para riego (3000 micromho/cm). Similares resultados se obtuvieron en el monitoreo de las aguas de los ríos del Departamento de Tarija 2 – gestión 2007, realizado por Prefectura del Departamento de Tarija en la cuenca del Guadalquivir y en el proyecto de Construcción Sistema de Riego Guadalquivir-Cenavit-Calamuchita (107, 111 micromho/cm)

3.1.2. Concentración de Calcio (Ca).

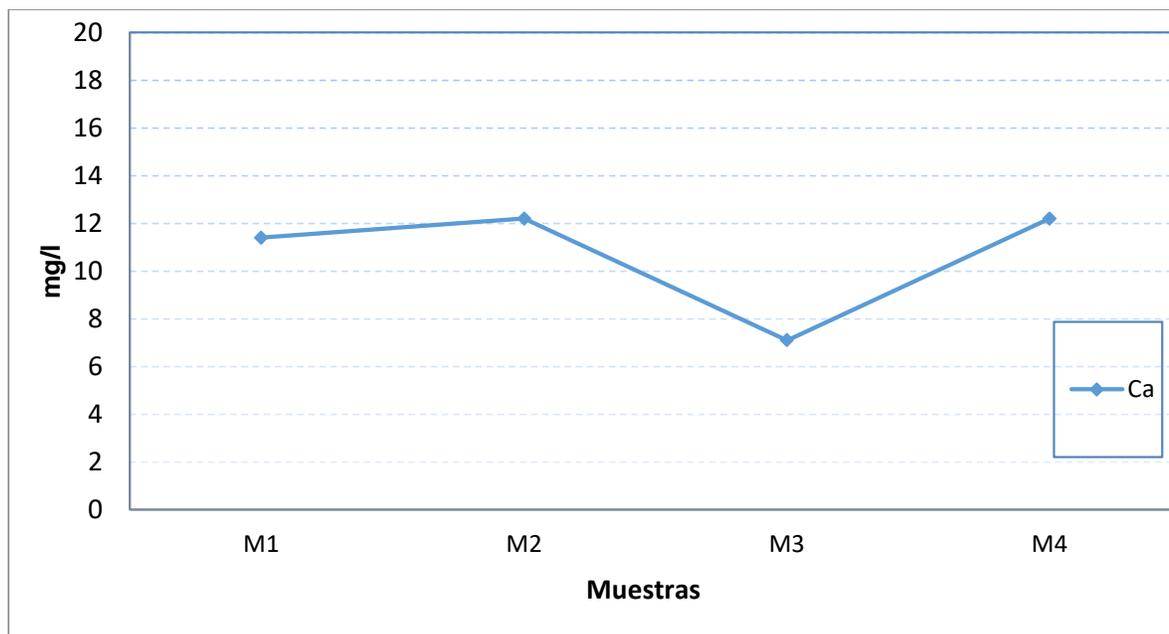


Figura 5.-Concentración de Ca en las muestras obtenidas del Río Guadalquivir.

Con relación a la concentración de calcio en las muestras de agua del Río Guadalquivir se puede indicar, que se encontraron iguales valores de contenido de Ca (12,2 mg/l) en las muestras M2 y M4, debido al aporte de aguas residuales de comunidad de Canasmoro y San Lorenzo, en el primer caso y por el vertimiento de aguas residuales, de las lagunas de oxidación de COSAALT, del matadero Municipal y curtiembres, para el segundo caso, que incrementa la concentración de iones de Ca; seguido de la M1 (11,4mg/l), obteniéndose la menor concentración en la M3 (7,1 mg/l) por la dilución de las aguas del río Victoria y Erquis que son considerados de alta calidad (clase A); Los valores determinados de Ca en las muestras pueden ser considerada bajas con relación a los límites máximos permitidos para riego (400 mg/l) según la FAO (1987). Al respecto, resultados similares se obtuvo en los principales ríos Pajchani (6.77 mg/l), Chamata (6.11 mg/l) y Trancas (9.61 mg/l), perteneciente a la Reserva Biológica de la Cordillera de Sama

3.1.3. Concentración de Magnesio (Mg).

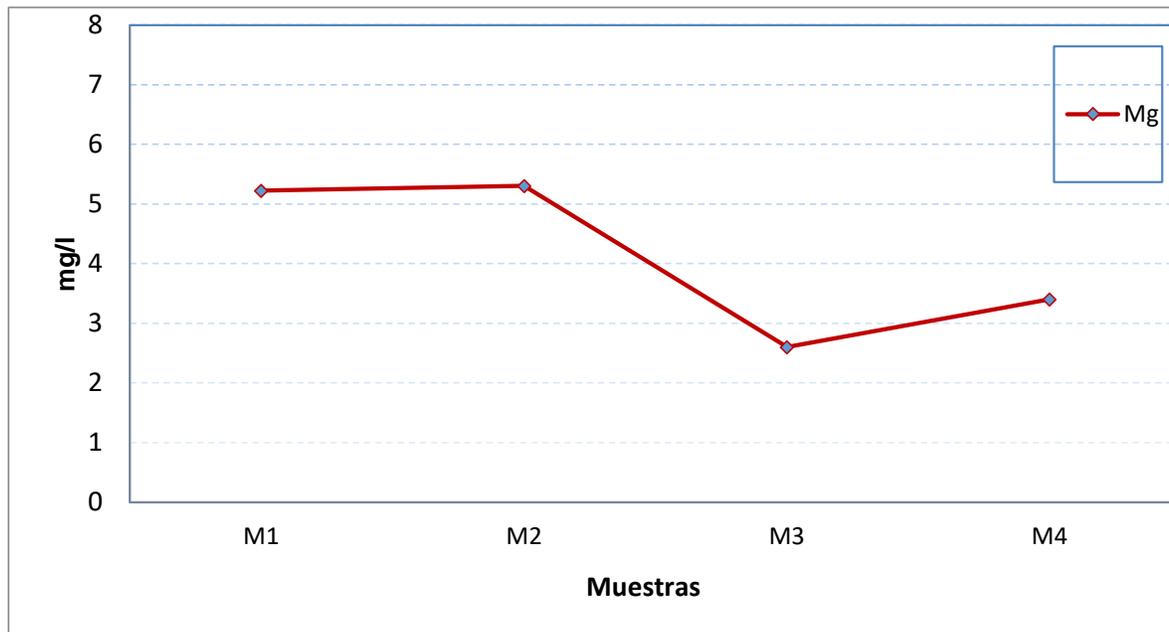


Figura 6.-Concentración de Mg en las muestras obtenidas del Río Guadalquivir.

En la Figura 6 se presentan los valores de concentración Mg en las muestras de agua del río Guadalquivir, encontrándose los mayores valores en las muestras M2 (5.3 mg/l) y M1 (5.2 mg/l), seguida de la M4 (3.4 mg/l) y con menor valor la muestra M3 (2.6 mg/l), valores que están situados según la FAO (1987) dentro los límites permisibles para uso de agua para riego. Similares resultados se obtuvieron en los ríos de Calama (4.0mg/l) y Jurina (5.20 mg/l) en el Diagnóstico Integral de la Reserva Biológica de la Cordillera de Sama.

3.1.4. Concentración de Sodio (Na).

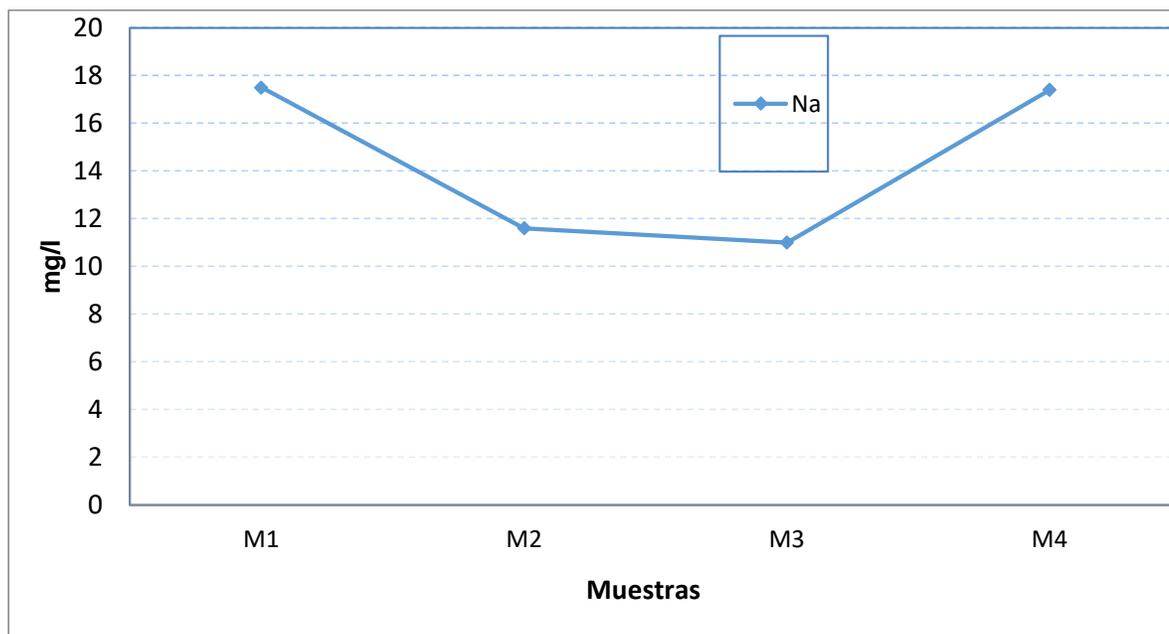


Figura 7.-Concentración de Na en las muestras obtenidas del Río Guadalquivir.

Como se puede evidenciar en la Figura 7 los mayores valores de Na se obtuvieron en las muestras M1 (17.5 mg/l) y M4 (17.4 mg/l) y los menores valores corresponden a las muestras M2 (11.6 mg/l) y M3 (11 mg/l). Valores que se encuentran dentro los intervalos utilizados en agua para riego de 0-900 mg/l FAO (1987). Similar resultado (0.60 meq/l) se obtuvo en la muestra de agua en el río Guadalquivir analizada para el proyecto Construcción sistema de Riego Guadalquivir-CENAVIT-Calamuchita.

La variación en la concentración de sales e iones Ca, Mg, Na en los puntos de muestreo distribuidos a lo largo del río Guadalquivir, se debe a que este recibe de los ríos afluentes de la margen derecha (Victoria, Erquis, Calama, Pajchani y Chamata) e izquierda (Corana, Carachimayo, Sella, TojtiWayco, El Monte y San Pedro) aguas de diferentes cantidad y calidad, con la presencia de iones de diferente concentración provenientes de las rocas y las aguas residuales de las comunidades con diferente población y zonas agropecuarias a lo largo de toda su trayectoria; Cabe hacer notar que la tendencia de la disminución de concentración de sales e iones en la muestra N° 2 ubicada en El Rancho a la muestra N° 3 del puente Bolívar, se debe principalmente a dilución de sales del río Guadalquivir por los afluentes del río Victoria y Erquis, considerados aguas de buena calidad, que disminuyen la concentración de iones en este punto, sin embargo, en la muestra N° 4 existe un incremento en la concentración de iones, debido al vertimiento hacia el río Guadalquivir de aguas residuales domiciliarias de los barrios adyacentes de la quebrada El Monte, San Pedro, aguas residuales de las lagunas de oxidación a través de la quebrada de Torrecillas y aguas residuales industriales provenientes del matadero y curtiembres ubicadas en la quebrada Cabeza de Toro, que incrementan la concentración de iones.

3.2. Clasificación del principal cuerpo de agua de la cuenca Guadalquivir desde el punto de vista de riego agrícola.

3.2.1. Relación de adsorción de sodio (RAS o SAR).

En la Tabla 7 se puede evidenciar que la mayor concentración RAS se obtuvo en la muestra M4 con 1.13 meq/l, seguida de la muestra M1 de 1.08 meq/l, posteriormente se tiene M3 con 0.90 meq/l y con un menor valor se consiguió con la muestra M2 de 0.70 meq/l, considerados niveles bajos para todas las muestras, según la normas establecida por la FAO, Canadá y Chile de $RAS < 3$, son aguas que pueden usarse para el riego en la mayoría de los suelos y dar como resultado pocas probabilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable.

Tabla 7.-Concentraciones de SAR obtenidas en la muestras de agua de la cuenca del río Guadalquivir.

Fuente	Datos mg/l			Datos meq/l			Cálculo SAR <i>meq/l</i>
	Na	Ca	Mg	Na	Ca	Mg	
M1	17.5	11.4	5.22	0.760	0.570	0.429	1.08
M2	11.6	12.2	5.30	0.504	0.61	0.436	0.70
M3	11.0	7.1	2.6	0.478	0.355	0.213	0.90
M4	17.4	12.2	3.4	0.756	0.61	0.279	1.13

3.2.2. Relación de CE y RAS

La **relación de CE y RAS**, se ha interpretado mediante el uso del Diagrama para la Clasificación de la Aguas para Riego, según el procedimiento de Soil Salinity Laboratory (1954).

Tabla 8.- Clasificación de las muestras de agua de la cuenca del río Guadalquivir.

Fuente	C. E. <i>(micromho/cm)</i>	CálculoSAR <i>meq/l</i>	Clasificacion	Interpretacion
M1	104.7	1.08	C1S1	Aguas de buena calidad aptas para el riego
M2	110.5	0.70	C1S1	Aguas de buena calidad aptas para el riego
M3	71.9	0.90	C1S1	Aguas de buena calidad aptas para el riego
M4	136.4	1.13	C1S1	Aguas de buena calidad aptas para el riego

En el Cuadro se puede constatar que los resultados de la inter-relación CE y SAR para

las cuatro **muestras** corresponden a **la Clasificación C1-S1**; por lo tanto, el significado e interpretación de esta clase de agua es el siguiente:

Clasificación Salina: C1: Corresponde a las aguas de **salinidad baja**, que se puede usar sin peligro para el riego de los cultivos y en todos los tipos texturales de suelo sin ninguna restricción. Por lo tanto, no existen probabilidades de procesos de salinización en los suelos agrícolas del proyecto.

Para esta categoría (baja), el rango varía de 0-10 en el caso del RAS y 0-250 micromhos/cm en el caso de la CE, en consecuencia no existe ningún peligro de salinización de los suelos con la aplicación del riego con estas aguas.

Clasificación Sódica:S1: Corresponde a las aguas de **contenido bajo en sodio**, pueden ser usadas en todos los suelos y cultivos seleccionados, con poca o ninguna probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable.

CAPITULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones.

- Existen variaciones en el parámetro conductividad eléctrica de la M4 con el restos de muestras; en la concentración del ion Ca y Mg, son similares en el restos de las muestras M1, M2 y M4, las cuales difieren con la M3; en el caso del Na la concentración es similar en las M1 y M4, las mismas que difieren de M2 y M3.
- Los parámetros de calcio, magnesio y sodio se encuentran dentro los límites máximos permitidos para riego según FAO 1987.
- Que el principal cuerpo de agua de la cuenca del Guadalquivir es agua de buena calidad apta para riego según la clasificación a la normas de Riverside (U.S. SoilSalinity Laboratorio).
- El río Guadalquivir, según la clasificación de las normas de Riverside (U.S. Soil Salinity Laboratorio), pertenece a la **Clase C1-S1** y es denomina **Aguas Aptas** para la irrigación sin restricciones.

4.2. Recomendaciones.

- Se recomienda realizar otros trabajos de investigación incorporando la evaluación de la calidad de agua con fines de consumo.
- Se recomienda realizar otros trabajos de investigación en las sub cuencas de la Cuenca del Guadalquivir y las cuencas de Tolomosa, Camacho y Santa Ana.