

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**DOCTORADO EN AGRICULTURA SUSTENTABLE**



**“ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA MITIGAR EFECTOS DE  
SALINIDAD EN EL ARROZ (*Oryza sativa* L.) EN SAN JACINTO DE  
YAGUACHI, ECUADOR”**

**Presentada por:**

**REINA CONCEPCIÓN MEDINA LITARDO**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR**

***DOCTORIS PHILOSOPHIAE* EN AGRICULTURA SUSTENTABLE**

**Lima - Perú**

**2022**

## ÍNDICE GENERAL

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II.</b>	<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	5
2.1.	MORFOLOGÍA Y TAXONOMÍA .....	5
2.2.	IMPORTANCIA ECONÓMICA Y DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA.....	6
2.2.1.	Estadísticas nacionales.....	7
2.3.	ZONAS Y SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE ARROZ.....	11
2.4.	TECNIFICACIÓN DE LOS CULTIVOS .....	11
2.5.	MANEJO DEL CULTIVO DEL ARROZ.....	12
2.5.1.	Variedades de arroz cultivadas en Ecuador .....	12
2.5.2.	Método de siembra .....	12
2.5.3.	Riego.....	13
2.5.4.	Principales plagas y enfermedades del arroz .....	13
2.6.	CONCEPTO DE SALINIDAD .....	14
2.7.	SALINIDAD EN LOS SUELOS AGRÍCOLAS .....	14
2.8.	SALINIDAD EN LA CUENCA BAJA DEL RIO GUAYAS, ECUADOR .....	15
2.9.	LA SALINIDAD EN LOS SUELOS .....	16
2.10.	ORIGEN DE LOS SUELOS SALINOS .....	16
2.10.1.	Causas primarias .....	17
2.10.2.	Causas secundarias .....	17
2.11.	CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS SALINOS.....	18
2.12.	SALINIDAD .....	19
2.13.	SODICIDAD .....	19
2.14.	EFFECTO DE LA SALINIDAD EN EL SUELO .....	20
2.15.	EVALUACIÓN DE LA SALINIDAD .....	21
2.16.	EFFECTO DE LA SALINIDAD EN LAS PLANTAS .....	22
2.16.1.	Efecto osmótico .....	23
2.16.2.	Efecto iónico.....	24
2.16.3.	Desbalance nutricional.....	24
2.16.4.	Incremento de la producción de especies reactivas de oxígeno (EROs) .....	25
2.17.	EFFECTOS DE LA SALINIDAD EN PLANTAS DE ARROZ.....	26
2.18.	EL AGUA PARA RIEGO.....	26

2.18.1. Calidad.....	26
2.18.2. Toxicidad.....	28
2.18.3. Sodio.....	28
2.18.4. Cloro.....	29
2.18.5. Boro.....	29
2.18.6. Sulfatos.....	29
2.18.7. Bicarbonatos $\text{HCO}_3^-$ y Carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ).....	30
2.18.8. Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ).....	30
2.18.9. Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ).....	30
2.18.10. Parámetros físicos del agua.....	30
2.19. CLASIFICACIÓN DE AGUA EN BASE A LA SALINIDAD.....	31
2.20. SUELOS PARA EL CULTIVO DEL ARROZ.....	34
2.21. NUTRICIÓN EN EL CULTIVO DE ARROZ.....	34
2.22. ENMIENDAS.....	36
2.22.1. Cachaza.....	36
2.22.2. Vinaza.....	37
2.22.3. Sulfato de calcio.....	38
2.22.4. Compost.....	39
2.22.5. Leonardita.....	42
2.22.6. Porquinaza.....	43
2.23. TOLERANCIA A LA SALINIDAD.....	44
2.24. MECANISMOS DE RESPUESTA DE LA PLANTA A LA SALINIDAD....	44
2.25. CARACTERIZACIÓN DE SISTEMA DE PRODUCCIÓN.....	47
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>49</b>
3.1. DETERMINACIÓN DE LA SALINIDAD DEL SUELO Y DEL AGUA COMO LIMITANTES DE LA PRODUCCIÓN DE ARROZ EN EL CANTÓN SAN JACINTO DE YAGUACHI, ECUADOR.....	49
3.1.1. Ubicación.....	49
3.1.2. Características del clima.....	50
3.1.3. Características de los suelos.....	50
3.1.4. Materiales y equipos.....	51
3.1.5. Muestreo de suelos y aguas.....	51
3.1.6. Método de análisis químicos de suelos.....	52
3.1.7. Métodos de análisis químicos de aguas.....	52

3.1.8. Metodología para la elaboración de los mapas de pH y CE.....	52
3.2. DIAGNÓSTICO Y CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DEL CULTIVO DE ARROZ EN EL CANTÓN SAN JACINTO DE YAGUACHI, ECUADOR CON ÉNFASIS EN ESTRATEGIAS PARA MITIGAR EL EFECTO DE LA SALINIDAD.....	55
3.2.1. Descripción de la población en estudio .....	55
3.2.2. Tipos de preguntas del cuestionario de la encuesta .....	56
3.2.3. Procedimientos para el análisis de componentes principales y conglomerados.....	56
3.3. USO DE FUENTES ORGÁNICAS Y MINERALES COMO ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA MITIGAR LA SALINIDAD EN SUELOS ARROCEROS DEL CANTÓN SAN JACINTO DE YAGUACHI, ECUADOR. ....	57
3.3.1. Ubicación.....	57
3.3.2. Características del clima .....	57
3.3.3. Características del suelo del ensayo .....	57
3.3.4. Características de las enmiendas orgánicas y químicas.....	58
3.3.5. Material vegetal (variedad INIAP FL-1480) .....	60
3.3.6. Materiales y equipos .....	60
3.3.7. Delineamiento del experimento .....	61
3.3.8. Tratamientos evaluados .....	61
3.3.9. Manejo agronómico del ensayo .....	62
3.3.10. Análisis físicos y químicos .....	65
3.3.11. Variables evaluadas .....	66
3.3.12. Análisis estadístico .....	69
3.3.12.1. Diseño experimental.....	69
3.3.12.2. Tratamiento estadístico .....	69
3.3.13. Análisis económico .....	70
3.4. RESPUESTA DE CINCO VARIEDADES COMERCIALES DE ARROZ CULTIVADAS POR LOS AGRICULTORES DE SAN JACINTO DE YAGUACHI, ECUADOR A UN NIVEL ELEVADO DE SALINIDAD.....	70
3.4.1. Ubicación.....	70
3.4.2. Características del clima .....	70
3.4.3. Características del suelo .....	70
3.4.4. Materiales y equipos .....	70
3.4.5. Características agronómicas de las variedades de arroz .....	71

3.4.6. Delineamiento del experimento .....	73
3.4.7. Tratamientos evaluados .....	73
3.4.8. Manejo agronómico del ensayo .....	74
3.4.9. Análisis estadístico .....	75
3.4.9.1. Diseño experimental.....	75
3.4.9.2. Modelo matemático .....	76
3.4.9.3. Tratamiento estadístico .....	76
3.4.10. Análisis económico.....	76
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>77</b>
4.1. DETERMINACIÓN DE LA SALINIDAD DEL SUELO Y DEL AGUA COMO LIMITANTES DE LA PRODUCCIÓN DE ARROZ EN EL CANTÓN SAN JACINTO DE YAGUACHI, ECUADOR.....	77
4.1.1. Clases texturales de los suelos.....	77
4.1.2. pH y conductividad eléctrica .....	78
4.1.3. Macro y micronutrientes.....	80
4.1.4. Agua.....	84
4.2. DIAGNÓSTICO Y CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DEL CULTIVO DE ARROZ EN EL CANTÓN SAN JACINTO YAGUACHI, ECUADOR CON ÉNFASIS EN ESTRATEGIAS PARA MITIGAR EL EFECTO DE LA SALINIDAD.....	87
4.2.1. Características del productor y de la finca.....	87
4.2.1.1. Aspecto social .....	87
4.2.2. Características de la producción arrocerá .....	89
4.2.2.1. Aspectos económicos .....	89
4.2.2.2. Aspecto ecológico .....	94
4.3. USO DE FUENTES ORGÁNICAS Y MINERALES COMO ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA MITIGAR LA SALINIDAD EN SUELOS ARROCEROS DEL CANTÓN SAN JACINTO DE YAGUACHI, ECUADOR. ....	101
4.3.1. Números de macollos m <sup>-2</sup> .....	101
4.3.2. Altura de la planta.....	102
4.3.4. Longitud de panícula (cm).....	103
4.3.5. Número de granos por panícula .....	103
4.3.6. Porcentaje de granos vanos.....	104
4.3.7. Peso de 1 000 granos .....	104

4.3.8. Rendimiento.....	104
4.3.9. Índice de cosecha.....	105
4.3.10. Peso de materia seca del grano de arroz por hectárea .....	105
4.3.11. Peso de materia seca de panca por hectárea .....	105
4.3.12. Relación grano - panca .....	106
4.3.13. Contenido de clorofila 30 días después del trasplante.....	106
4.3.14. Contenido de clorofila 45 días después del trasplante.....	106
4.3.15. Contenido de clorofila 60 días después del trasplante.....	107
4.3.16. Contenido de clorofila 75 días después del trasplante.....	107
4.3.17. Concentración de nutrientes .....	108
4.3.18. Extracción de nutrientes .....	109
4.3.19. Análisis económico.....	111
<b>4.4. RESPUESTA DE CINCO VARIEDADES COMERCIALES DE ARROZ CULTIVADAS POR LOS AGRICULTORES SAN JACINTO DE YAGUACHI, ECUADOR A UN NIVEL ELEVADO DE SALINIDAD.....</b>	<b>111</b>
4.4.1. Números de macollos por m <sup>2</sup> .....	111
4.4.2. Número de panículas m <sup>2</sup> .....	113
4.4.3. Longitud de panícula .....	115
4.4.4. Número de granos por panícula.....	115
4.4.5. Porcentaje de granos vanos.....	116
4.4.6. Peso de 1 000 granos .....	116
4.4.7. Rendimiento.....	116
4.4.8. Índice de cosecha.....	117
4.4.9. Peso de materia seca del grano de arroz por hectárea .....	117
4.4.10. Peso de materia seca de panca por hectárea .....	119
4.4.11. Relación grano - panca .....	119
4.4.12. Color de clorofila a los 30 días después del trasplante .....	119
4.4.13. Color de clorofila a los 45 días después del trasplante.....	121
4.4.14. Color de clorofila a los 60 días después del trasplante.....	121
4.4.15. Color de clorofila a los 75 días después del trasplante.....	122
4.4.16. Extracción de nutrientes .....	122
4.4.17. Análisis económico.....	126
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>127</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>129</b>

<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>130</b>
<b>VIII. ANEXOS.....</b>	<b>161</b>

<b>Figura 20.</b> Análisis de componentes principales en los sistemas producción, en el cantón San Jacinto de Yaguachi .....	101
<b>Figura 21.</b> Número de macollos m-2 en plantas de arroz, sembradas en suelos salinos de Yaguachi, con aplicación de enmiendas minerales y orgánicas .....	102
<b>Figura 22.</b> Variación de la altura de planta de arroz en suelo salino de Yaguachi, con aplicación de enmiendas minerales y orgánicas .....	102
<b>Figura 23.</b> Relación grano - panca de arroz en suelo salino de Yaguachi, con aplicación de enmiendas minerales y orgánicas.....	106

## RESUMEN

Uno de los principales procesos de degradación de los suelos es la salinidad. El objetivo de este estudio fue evaluar la aplicación de enmiendas químicas y orgánicas como alternativas para mitigación de los efectos nocivos de la salinidad en el arroz en los suelos del cantón San Jacinto de Yaguachi, Ecuador. La investigación se inició con el análisis físico y químico del suelo y del agua de riego; para el suelo con georreferencia se establecieron puntos de muestreo y, para el agua se escogieron muestras en los canales de riego. Los sistemas de producción fueron descritos mediante la aplicación de una encuesta. Las enmiendas ensayadas fueron la leonardita, el yeso, la vinaza, el compost, la cachaza y la porquinaza. Se evaluó la morfología y rendimiento de cinco variedades de arroz, INIAP-FLArenillas, SFL 011, INIAP 14, INIAP 11 y Fedearroz 60. Con los resultados, se conoció que la textura arcillosa es la predominante en estos suelos y con niveles medios de salinidad. En el agua de regadío se evidenciaron cantidades altas de cloro con restricción severa para su uso. Se encontraron tres sistemas de producción de arroz entre los agricultores, además de que, con las aplicaciones de compost, cachaza y leonardita, mejoraron la morfología de las plantas e incrementaron el rendimiento y aumentó la concentración de N, K, Ca, S y P. Las variedades de arroz sometidas al nivel de salinidad de  $7.44 \text{ dS m}^{-1}$  y aplicando leonardita, presentaron diferencias estadísticas significativas en altura de planta, número de macollos, panículas, granos por panícula, peso de 1 000 granos. Se destaca que empleando  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  leonardita, las variedades de arroz presentaron mayores rendimientos. Se recomienda el uso de enmiendas orgánicas, que, por sus condiciones físicas, químicas y biológicas favorables, son útiles en el mejoramiento de suelos irrigados con aguas salinas.

**Palabras claves:** Agua, degradación, enmienda, producción, salinidad.

## ABSTRACT

One of the main soil degradation processes is salinity. The objective of this study was to evaluate the application of chemical and organic amendments as alternatives to mitigate the harmful effects of salinity in rice in the soils of the San Jacinto de Yaguachi canton, Ecuador. The investigation began with the physical and chemical analysis of the soil and irrigation water; for soil with georeference, sampling points were established, and water samples were chosen in the irrigation canals. The production systems were established through the application of a survey. The tested amendments were leonardite, gypsum, vinasse, compost, sugarcane cakefilter and pig manure. The morphology and yield of five rice varieties, INIAP-FL-Arenillas, SFL 011, INIAP 14, INIAP 11 and Fedearroz 60, were evaluated under a randomized complete block with split plots design. Analysis showed that the clayey texture is predominant in these soils, with medium levels of salinity. High amounts of chlorine were found in the irrigation water, with severe restrictions on its use. Three rice production systems were found among farmers; and the morphology of the plants and varieties yield increased with the applications of compost, filtercake and leonardite, as well as the concentration of N, K, Ca, S and P. The rice varieties subjected to a salinity level of 7.44 dS m<sup>-1</sup> and applying leonardite, showed significant statistical differences in plant height, number of tillers, panicles, grains per panicle, and 1000 grains weight. It is emphasized that using 150 kg ha<sup>-1</sup> leonardite, the rice varieties presented higher yields. The use of organic amendments is recommended, which due to their favorable physical, chemical and biological conditions, are useful in improving soils irrigated with saline waters.

**Keywords:** Water, degradation, amendment, production, salinity.

## I. INTRODUCCIÓN

El arroz es el principal alimento de los habitantes en los países en desarrollo y, debido a su aporte calórico, es considerado el primer cereal a nivel mundial. En el año 2019, los principales productores de arroz fueron China (30 por ciento), India (22 por ciento), Indonesia (8 por ciento), Bangladesh (7 por ciento), Vietnam (6 por ciento) y Tailandia (3 por ciento); el 23 por ciento restante corresponde a 72 países (FAO 2019).

En Ecuador, la superficie total cosechada de arroz en el 2019 fue de 257 273 hectáreas (ha), con un rendimiento de 1 668 523 t (SIPA 2018). La zona donde se concentra la mayor superficie sembrada es la provincia del Guayas, la cual con 218 113 ha representa el 84,77 por ciento y localizada, entre otros, en sus cantones Daule (35 421 ha), Samborondón (24 778 ha), Urbina Jado (El Salitre) (27 242 ha), San Jacinto de Yaguachi (24 384 ha) y Santa Lucía (20 034 ha) (MAG – CGINA 2020). El rendimiento en el Ecuador alcanza un promedio de 5,22 t ha<sup>-1</sup>, lo cual es considerado bajo en comparación con Argentina, Uruguay, Perú y Brasil, cuyos rendimientos son de 6,4; 8,2; 7,6 y 6,1 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente (FAOSTAT 2019). La provincia que alcanzó mayor productividad fue Loja con 8,96 t ha<sup>-1</sup>; mientras que Los Ríos presentó solo 4,50 t ha<sup>-1</sup> (MAG – CGINA 2020). El consumo *per cápita*, en Ecuador alcanza los 53,20 kg, superior a Colombia y Perú que registran 40,0 y 47,4 kg, respectivamente (Gavilánez *et al.* 2016).

Aproximadamente el 15 por ciento de la totalidad de los suelos del mundo se encuentran en procesos de degradación física y química por erosión y salinización. La acumulación de cantidades excesivas de sales solubles como el sodio intercambiable, conocido como Solonetz (Ibáñez y Manríquez 2014), con carbonato de sodio libre, afectan el crecimiento, la producción, el rendimiento y sostenibilidad de muchos cultivos (Ramírez *et al.* 2017). Es conocido que, la característica principal de los suelos salinos es la presencia de altas concentraciones de sales solubles, lo cual incrementa el potencial osmótico de la solución del suelo, produciendo estrés fisiológico, este tipo de suelos ofrece pocas opciones de crecimiento de las plantas convirtiéndose en improductivos (Terrazas 2018).

Khanam *et al.* (2018), sostienen que el arroz es sensible a la salinidad especialmente en los estados de plántula con 3-4 hojas (al final de la fase vegetativa), así como en la iniciación de la panícula hasta la floración (ambos durante la fase reproductiva) (Aguilar *et al.* 2016). La planta es relativamente más tolerante durante la germinación, así como a lo largo de las fases de llenado y maduración del grano (Sajid *et al.* 2017).

Asimismo, existen aproximadamente 1 125 millones de ha de tierras que están afectadas por la sal, de las cuales, aproximadamente 76 millones de ha sufren de salinización y sodificación inducidas por el hombre (Hossain 2019). Al respecto, INIAP (2014) reporta en Ecuador salinidad alta en Guayas (66 698 ha), El Oro (4943 ha) y Manabí (1 165 ha), y cada vez más se expande la formación de suelos halomórficos.

Por otra parte, la salinidad también se incrementa por uso de agua de riego, siendo que, a nivel mundial 45 millones de ha están afectadas por salinidad (Hoang *et al.* 2016). Ecuador tiene una región fértil denominada la cuenca del río Guayas con un área aproximada de 34 500 km<sup>2</sup>, equivalente al 12,57 por ciento del territorio nacional. El río Guayas desemboca en el océano Pacífico, constituyendo el sistema fluvial más importante de la costa suroccidental del Pacífico y en donde, al desembocar, forma un estuario intercambiándose agua dulce y agua salada (Villa *et al.* 2016). En esta cuenca, en su zona baja se emplean 8 847 m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> en sistemas de riego (Pozo *et al.* 2010). Merece atención la zona de Yaguachi, ubicada en la parte baja y costera de esta cuenca, la cual se caracteriza por la gran variedad de actividad agrícola, ganadera, forestal, acuícola, entre otros, esto debido a la buena calidad de sus suelos y el microclima, así como por su ubicación. Sin embargo, en sus 3 000 ha de arroz, existe baja producción debido a los niveles altos de salinidad que se incrementan paulatinamente debido a que el riego se realiza con aguas de mareas transportada el río Guayas y sus afluentes Daule, Babahoyo y Yaguachi, afectando los suelos, no solo en las riberas, sino tierra adentro, a través de los esteros y por medio de canales de riego (Pozo *et al.* 2010).

Basado en las consideraciones anteriores, en la presente investigación se abordan los aspectos más importantes de los efectos de la salinidad en los suelos y planta del arroz sembradas en la zona de Yaguachi, de allí que se hace imprescindible que se trabaje en la búsqueda de alternativas para mitigar este problema que afecta los ingresos económicos de los agricultores y la sostenibilidad de la producción del arroz.

En este tema, a modo de casos prácticos, el tratamiento convencional de estos suelos salinos, conlleva largos periodos de recuperación; por tal motivo, se ha estudiado el uso de agentes recuperadores alternos tales como la vinaza (subproducto líquido de la producción de etanol con un contenido de sólidos de 10 por ciento p/p), sulfato de calcio, compost, cachaza, leonardita y porquinaza en suelos salino sódicos. Los resultados obtenidos han sido favorables y tienen acción biorremediadora en corto tiempo. Con este enfoque se debe realizar investigaciones respecto a este problema y desarrollar conocimiento y tareas de conservación, sustentabilidad, manejo del suelo, protección del medio y en la lucha por combatir sus causas, así como la galopante deforestación y desertificación.

En base a las anteriores premisas, esta investigación se realizó con el objetivo general:

- Evaluar la aplicación de enmiendas químicas y orgánicas como alternativas tecnológicas para la mitigación de la salinidad en el arroz en San Jacinto de Yaguachi, Ecuador.

Asimismo, se consideraron los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la importancia de la salinidad del suelo y del agua como limitantes de la producción de arroz en el cantón San Jacinto de Yaguachi, Ecuador.
- Diagnosticar y caracterizar el sistema de producción del cultivo de arroz en el cantón San Jacinto Yaguachi, Ecuador con énfasis en estrategias para mitigar el efecto de la salinidad.
- Evaluar el uso de fuentes de materia orgánica y minerales como una alternativa tecnológica para mitigar el problema de salinidad en los suelos arroceros del cantón San Jacinto de Yaguachi.
- Comparar la respuesta de cinco variedades comerciales de arroz cultivadas por los agricultores de San Jacinto de Yaguachi, Ecuador, a un nivel elevado de salinidad.

El presente trabajo consta de diversas actividades. El capítulo II comprende una revisión bibliográfica exhaustiva sobre la morfología y la taxonomía del arroz; la importancia económica y distribución geográfica y sobre aspectos fundamentales del efecto de la salinidad en el suelo y el agua sobre el cultivo de arroz.

Los materiales y la metodología empleados en la obtención de muestras de suelo de agua, en la colección de información de los sistemas de producción de arroz y en los ensayos de campo, se presentan en el capítulo III.

La primera etapa del trabajo consistió en realizar un muestreo de suelos y agua en las parcelas agrícolas seleccionadas en forma aleatoria dentro de las franjas, para el muestreo de suelo. En la segunda etapa se diagnosticó y caracterizó el sistema de cultivo en la producción de arroz de la zona, se empleó la estadística no paramétrica, que es de tipo descriptivo. La tercera etapa, se realizó el ensayo con fuentes orgánicas y minerales para el manejo de la salinidad. Las enmiendas orgánicas fueron vinaza, cachaza, porquinaza, leonardita y sulfato de calcio (enmienda mineral) y por último la cuarta etapa se comparó las cinco variedades de arroz cultivadas por los agricultores a un nivel de salinidad. El capítulo IV incluye resultados y discusión. Las conclusiones generales obtenidas en la determinación de la salinidad del suelo y del agua como limitantes de la producción de arroz y la evaluación de los sistemas productivos y en los ensayos de alternativas tecnológicas, se resumen en el capítulo V. El capítulo VI corresponde a las recomendaciones donde se exhorta promover el uso de enmiendas orgánicas en el manejo de suelos irrigados con aguas salinas y finalmente el capítulo VII que corresponde a la bibliografía.