

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE ARQUITECTURA, URBANISMO Y GEOGRAFÍA  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA



**EVALUACIÓN DE LA FRAGILIDAD AMBIENTAL EN LA COMUNA  
DE SAN VICENTE DE TAGUA TAGUA, REGIÓN DEL LIBERTADOR  
BERNARDO OHIGGINS.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓGRAFO

TESISTA

Fabián Andrés Ramos Toro

PROFESORA GUÍA

Dra. Ana Isabel Huaico Malhue

Concepción, 2022

## Agradecimientos

Agradecer principalmente a mis padres Pilar Toro Peña y Leonardo Ramos Cortés por apoyarme en mis estudios, a mis hermanas Fabiola Andrea y Fernanda Paz por siempre estar presente para mí, agradecer a mis amigos que siempre estuvieron presente en este proceso y agradecer a todas las personas que conocí en la ciudad de Concepción.

Simplemente me faltarían hojas en esta investigación para agradecer a cada persona que conocí y por lo que aprendí de cada uno ustedes.

Agradecer a los profesores que me hicieron clases durante estos años académicos, que me enseñaron lo bonita que es la carrera y lo genial que es la geografía.

Especialmente agradecer a la profesora Ana Huaico por siempre apoyarme, por no perder la fe en mí, por los consejos que siempre me brindó para lograr mi meta y por la infinita paciencia que siempre me tuvo.



“Gracia' a to' el que creyó en mí desde el primer día” (Benito Martínez, 2020).

## Resumen

La evaluación de la fragilidad ambiental permite identificar a través de un índice la susceptibilidad que tiene un área para enfrentar los cambios tanto naturales como antrópicos. En este estudio se calculó la fragilidad ambiental potencial y emergente en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua, Región del Libertador Bernardo O'Higgins. Para el desarrollo de esta investigación se utilizó la metodología para evaluar la fragilidad ambiental propuesta por Ross (2012) adaptada por Da Silva Anjinho (2021) mediante la utilización de factores naturales: Pendientes, Precipitaciones, suelo y la cubierta vegetal/usos de suelo. Los resultados obtenidos mostraron que la mayor superficie de la comuna de San Vicente de Tagua Tagua posee una fragilidad ambiental muy débil lo que corresponde al 37,46% del área total de la superficie, mientras que las áreas con clase de fragilidad muy fuerte abarcan un 14,13% de la superficie. Para la fragilidad emergente la cual considera las actividades antrópicas, los valores más significativos también se refieren a la clase muy débil, ocupando el 27,06% aunque en menor superficie, mientras que la clase muy fuerte es representada por un 12,63% de la comuna, es menor a la fragilidad ambiental potencial debido a la protección que entregan los usos de suelo y la cobertura vegetal en la comuna. Los mapas de fragilidad ambiental son muy importantes para limitar, guiar y mitigar ciertas acciones que tiene el humano en el medio ambiente, ayudando a tener un mejor ordenamiento territorial y usar de una manera más sustentable los recursos naturales.

Palabras clave: Fragilidad ambiental, cambio de usos de suelo, susceptibilidad, fragilidad ambiental potencial y fragilidad ambiental emergente.

## **ABSTRACT**

Environmental fragility is one of the indices made by humans to observe the susceptibility of an area to both natural and anthropogenic changes. In this study, the potential environmental fragility and the emerging environmental fragility were calculated in the commune of San Vicente de Tagua Tagua, Libertador Bernardo O'Higgins Region. For the development of this research, the methodology was used to evaluate the environmental fragility proposed by Ross (2012) adapted by Da Silva Anjinho (2021) with the use of natural factors: Slopes, Precipitation, soil, and vegetation cover / land uses. The results obtained showed that the largest area of the commune of San Vicente de Tagua Tagua has a very weak environmental fragility, which corresponds to 37.46% of the total area of the surface, while the areas with a very strong fragility class cover a 14.13% of the surface. For the emerging fragility, which considers human activities, the most significant values also refer to the very weak class, occupying 27.06%, although on a smaller surface, while the very strong class is represented by 12.63% of the commune, is less than the potential environmental fragility due to the protection provided by land uses and vegetation cover in the commune. Environmental fragility maps are very important to limit, guide and mitigate certain actions that humans have on the environment, helping to have better land use planning and use natural resources in a more sustainable way.

**Keywords:** Environmental fragility, land use change, susceptibility, potential environmental fragility, and emerging environmental fragility.

## ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO I: PRESENTACIÓN .....</b>	<b>9</b>
1.1 Introducción.....	9
1.2 Planteamiento del problema.....	10
1.3 Hipótesis de trabajo.....	12
1.4 Objetivos Generales y específicos .....	13
• Objetivo General .....	13
• Objetivos específicos .....	13
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....</b>	<b>14</b>
2.1 Cambio de usos de suelo.....	14
2.2 Fragilidad ambiental.....	16
2.3 Antecedentes acerca de la metodología de Ross para la evaluación de la fragilidad ambiental.....	19
2.3.1 Factor Pendiente.....	22
2.3.2 Factor de Suelo.....	22
2.3.3 Factor uso de suelo y cobertura vegetal .....	23
2.5.4 Factor precipitaciones.....	24
<b>CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>25</b>
3.1 Descripción del área de estudio .....	25
3.2 Planteamiento metodológico .....	29
3.2.1 Análisis de cada uno de los factores del modelo de fragilidad ambiental .....	30
a) Factor de Pendientes.....	30
b) Factor de Suelo .....	31
c)Factor Uso de suelo/ Cobertura vegetal .....	33
d) Factor de Precipitación.....	34
3.2.1 Evaluación de la fragilidad ambiental potencial y emergente.....	37
Fragilidad ambiental potencial .....	38
Fragilidad ambiental emergente .....	39
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
4.1 Análisis de los factores obtenidos .....	40
4.1.1 Factor de pendientes .....	40

4.1.2 Factor de suelo .....	41
4.1.3 Factor uso de suelo/ cobertura vegetal.....	43
4.1.4 Factor de precipitación .....	44
4.2 Zonificación de la fragilidad ambiental potencial y emergente .....	46
4.3 Análisis comparativo entre fragilidad ambiental potencial y emergente. ....	50
4.4 Recomendaciones: .....	53
Fragilidad ambiental muy débil: .....	54
Fragilidad ambiental débil: .....	55
Fragilidad ambiental media:.....	56
Fragilidad ambiental emergente fuerte: .....	57
Fragilidad ambiental emergente muy fuerte:.....	58
<b>CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>59</b>
5.1 Discusión .....	59
5.2 Conclusiones.....	62
<b>CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>64</b>



## Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Modelo de ladera que muestra interacciones entre posición de ladera, hidrología y procesos de erosión.....	<b>22</b>
<b>Figura 2.</b> donde se puede apreciar una relación entre erosión y vegetación.....	<b>24</b>
<b>Figura 3:</b> Procesos desencadenados a partir de la salpicadura.....	<b>24</b>
<b>Figura 4:</b> Contexto regional comuna de San Vicente de Tagua Tagua.....	<b>25</b>
<b>Figura 5:</b> Empresas de San Vicente según rubro económico.....	<b>27</b>
<b>Figura 6:</b> Trabajadores por rubro en empresas de San Vicente de Tagua Tagua .....	<b>27</b>
<b>Figura 7:</b> Croquis resultados región de O'Higgins por Naveas 1979.....	<b>28</b>
<b>Figura 8:</b> Metodología de análisis de fragilidad ambiental por Da Silva Anjinho (2021) .....	<b>29</b>
<b>Figura 9:</b> Algoritmo de la herramienta suma ponderada en ArcGIS.....	<b>38</b>
<b>Figura 10:</b> Nivel de fragilidad ambiental según la clasificación de pendientes.....	<b>40</b>
<b>Figura 11:</b> Nivel de fragilidad ambiental según la clasificación de Suelos.....	<b>42</b>
<b>Figura 12:</b> niveles de fragilidad ambiental según sus usos de suelo/cobertura.....	<b>44</b>
<b>Figura 13:</b> Precipitaciones en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua.....	<b>45</b>
<b>Figura 14:</b> Fragilidad ambiental potencial en San Vicente de Tagua Tagua .....	<b>47</b>
<b>Figura 15:</b> Fragilidad ambiental emergente en San Vicente de Tagua Tagua .....	<b>49</b>
<b>Figura 16:</b> Comparación entre las dos fragilidades ambientales.....	<b>50</b>
<b>Figura 17:</b> Zonificación de la fragilidad ambiental emergente.....	<b>56</b>
<b>Figura 18:</b> Fotografía de paisaje con niveles muy débiles de fragilidad ambiental.....	<b>57</b>
<b>Figura 19:</b> Fotografía de paisaje con un nivel débil de fragilidad ambiental.....	<b>58</b>
<b>Figura 20:</b> Fotografía de paisaje con un nivel medio de fragilidad ambiental.....	<b>59</b>
<b>Figura 21:</b> Fotografía de paisaje con un nivel fuerte de fragilidad ambiental.....	<b>60</b>
<b>Figura 22:</b> Fotografía de paisaje con un nivel muy fuerte de fragilidad ambiental.....	<b>61</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Metodologías utilizadas mundialmente.....	<b>19</b>
<b>Tabla 2:</b> Capas de información utilizada en el estudio.....	<b>30</b>
<b>Tabla 3:</b> Variable de pendientes por Ross 2012.....	<b>31</b>
<b>Tabla 4:</b> Características de las clases agrologicas.....	<b>32</b>
<b>Tabla 5:</b> adaptación a la clasificación de Ross (2012) según las variables de suelos usando las clases agrológicas de San Vicente de Tagua Tagua .....	<b>33</b>
<b>Tabla 6:</b> Variable de uso de suelo y cobertura vegetal por Ross (2012) .....	<b>34</b>
<b>Tabla 7:</b> Estaciones pluviométricas con datos desde 1987 a 2017.....	<b>35</b>
<b>Tabla 8:</b> Variable de precipitación clima mediterráneo: niveles jerárquicos en esta investigación...37	
<b>Tabla 9:</b> Rangos de fragilidad ambiental potencial.....	<b>39</b>
<b>Tabla 10:</b> Rangos de fragilidad ambiental emergente.....	<b>39</b>
<b>Tabla 11:</b> clasificación de las pendientes según la clase de fragilidad y por superficie .....	<b>41</b>
<b>Tabla 12:</b> clasificación del estudio agrologico según la clase de fragilidad y por superficie.....	<b>42</b>
<b>Tabla 13:</b> Clasificación de los usos de suelo según la clasificación de Ross (2012) .....	<b>43</b>
<b>Tabla 14:</b> clasificación de precipitación según la adaptación al método de Ross 2012.....	<b>45</b>
<b>Tabla 15:</b> Clases de fragilidad ambiental potencial en San Vicente de Tagua Tagua .....	<b>47</b>
<b>Tabla 16:</b> Clases de fragilidad ambiental emergente en San Vicente de Tagua Tagua .....	<b>49</b>
<b>Tabla 17:</b> Comparación entre la superficie de la fragilidad ambiental potencial y la emergente en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua.....	<b>52</b>



## **CAPÍTULO I: PRESENTACIÓN**

### **1.1 Introducción**

Desde la llamada revolución industrial, el planeta se ha visto inmerso en distintos cambios ambientales producto de la acción antrópica, esto se ve reflejado en “el aumento de la población mundial, de los gases efecto invernadero, la acumulación de residuos sólidos, la contaminación, los cambios de uso de suelo y el cambio climático global” (Rojas, 2015), la preocupación por estos cambios en los sistemas naturales empezó a ser visible mundialmente en la cumbre del medio ambiente realizada en Estocolmo el año 1972, en esta reunión se “reconoció como una necesidad impostergable, de incluir la variable ambiental como un factor que garantizará el desarrollo, puesto que se constataba un agravamiento de los problemas ambientales en todos los niveles del planeta” (Maza, 2007).

Así es como la influencia antropogénica sobre el medio ambiente es un motivo frecuente de preocupación para las personas, por lo cual Santos (2015) menciona que es fundamental calificar y cuantificar los impactos producidos por la ocupación territorial, caracterizando los usos de suelo y los procesos desarrollados por las actividades antrópicas. Según Ramos-Reyes (2021) los cambios de uso de suelo por actividades antrópicas son un proceso dominante que tiene efectos negativos sobre la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas, el mismo autor nos presentan los efectos que tienen los cambios de usos de suelo en los ecosistemas.

- “Los efectos más sobresalientes del cambio de uso de suelo son: la fragmentación del hábitat (al ser reducida la masa forestal), disminución de la biodiversidad, erosión, fertilidad de los suelos, modificación del ciclo del agua, alteraciones en los niveles de agua, disminución de la producción de alimentos y cambios en las dinámicas poblacionales” (Ramos-Reyes, 2021).

A partir de la condición de importancia mundial, se desarrollaron diversos métodos y modelos para poder calcular la susceptibilidad de los ecosistemas, a los cambios provocados por la acción antrópica. Creando así, los modelos de fragilidad ambiental, los que se convirtieron en herramientas valiosas para tomar decisiones y poder planificar de una mejor manera las políticas de desarrollo. Por este motivo,

la fragilidad ambiental investiga la susceptibilidad que posee un ambiente ante los cambios en su equilibrio natural. “Ya que ayudan a cuantificar la sensibilidad y a comprender la relación entre las actividades humanas y la calidad ambiental” (Mafre et al, 2013).

En esta investigación se evaluará la fragilidad ambiental de la comuna de San Vicente de Tagua Tagua, ubicada en la región del Libertador Bernardo O’Higgins, a partir del modelo propuesto por Ross (2012) adaptada por Da Silva Anjinho (2021). Para obtener los resultados, se necesitaron diversos factores como uso de suelo, las precipitaciones, las pendientes y clases agrologicas. Este trabajo fue desarrollado mediante el uso de herramientas SIG (sistemas de información geográficos) que permiten manejar diversas bases de datos y monitorear el sistema ambiental en el tiempo.

## **1.2 Planteamiento del problema**

La fragilidad ambiental ha tomado una gran importancia en la actualidad, debido a que “el conocimiento de un área, es una excelente herramienta en la planificación de acciones sobre el medio ambiente, identificando puntos vulnerables que merecen atención, áreas potenciales de ocupación que puedan subsidiar la adecuada planificación” (Da Silva, 2020), esto ha tenido un gran interés debido a la expansión gradual de las ciudades, como también con el cambio excesivo de los usos de suelo, según Da Mesquita Oliveira (2017) los cuales se alteran significativamente a medida que la población urbana va creciendo, así se reducen las áreas verdes.

En la última década en Chile, se ha producido una expansión de las ciudades debido al aumento de la población, lo cual nos demuestra que “esta tendencia se materializa en el territorio, a partir de profundos cambios en la producción y transformaciones de las ciudades, producto de su crecimiento descontrolado” (Andrade,2017). A su vez hay que mencionar los cambios de usos de suelo que ha sufrido Chile en las últimas décadas debido a las actividades agrícolas, estas transformaciones han estado asociadas a “la expansión de las fronteras agropecuarias que permitieron satisfacer tanto las necesidades internas como las

crecientes demandas externas por productos agrícolas” (Aguayo, 2009) lo cual ha tenido consecuencias ecológicas “debido a que la expansión agrícola es la principal causa inmediata del cambio de la cubierta terrestre” (López, 2010).

Por causa de esta expansión gradual de las ciudades y del fomento de las actividades agrícolas, muchos usos de suelo han sido cambiados o modificados en la zona central de Chile, este estudio se enfocará específicamente en la región de O’Higgins, particularmente en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua.

La comuna fue seleccionada debido a que no hay un estudio de fragilidad ambiental actual y específico en la zona, además de que ha tenido grandes cambios de uso de suelos en las últimas décadas, como se indica en la siguiente cita:

“La comuna de San Vicente de Tagua Tagua ha experimentado un largo y significativo proceso de crecimiento demográfico, debido a diferentes factores, como la migración campo-ciudad, crecimiento económico, además de las nuevas masas trabajadoras y sus familias, lo que nos reveló una necesidad habitacional para las nuevas masas insurgentes, lo cual llevó a un desarrollo urbano, que transformó radicalmente la infraestructura de la urbe” (Loyola ,2013).

Es importante mencionar que el estudio de la fragilidad ambiental permite orientar el territorio hacia una planificación. Esto se logra a través del estudio de diferentes factores, por lo que se centra tanto en los factores naturales (fragilidad ambiental potencial) como también los factores producidos por la acción antrópica (fragilidad ambiental emergente).

La acción antrópica es “provocada por las actividades de ingeniería vinculadas con excavaciones, construcción de terraplenes y adecuación de terrenos para edificaciones, entre otros, estas actividades suelen exigir el retiro de la vegetación y la movilización de grandes volúmenes de suelo” (Duque y Escobar 2017). Normalmente se aprecia en la mayoría de las comunas de la región, particularmente se observa en el aumento gradual de los cambios de uso de suelo que han tenido la comuna de San Vicente de Tagua Tagua, debido a la gran expansión de sus asentamientos urbanos periféricos (principalmente habitacionales) causado por la

explosión demográfica de la zona, así como también la expansión de la agricultura intensiva.

Es de suma importancia mencionar que el hombre es el principal causante de la disminución de la cobertura vegetal, su reducción, es una de las más importantes debido a la incidencia en la protección de suelos, “se ha establecido que la vegetación influye sobre la erosión, aumentando la estabilidad de los agregados del suelo y la propia coherencia, protegiéndolo del impacto de las gotas de agua, incrementando la capacidad de infiltración y frenando la escorrentía”. (García-Fayos 2004)

### **Justificación de la selección del área de estudio:**

La comuna de San Vicente de Tagua Tagua, como otras comunas del país posee escasa información actualizada para la toma de decisiones, en este sentido, los cambios de uso de suelo en zonas frágiles ambientalmente, a futuro, implicaría cambios en su equilibrio dinámico especialmente relacionados con la erosión y el deterioro del suelo, por lo tanto, los resultados de esta investigación pueden orientar la toma de decisiones para la planificación ambiental de la comuna, además de aportar datos y recomendaciones debido a que San Vicente es una zona agrícola con gran importancia en la región del Libertador Bernardo O’Higgins y a nivel nacional.

### **1.3 Hipótesis de trabajo**

Los mayores niveles de fragilidad ambiental se ubican principalmente en terrenos montañosos, ya que presentan características físico-naturales que hacen que la zona sea más vulnerable al fenómeno de la erosión, principalmente por las pronunciadas pendientes y el cambio de uso a agrícola.

## 1.4 Objetivos Generales y específicos

- **Objetivo General**

Evaluar la fragilidad ambiental potencial y emergente en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua, en la región de O'Higgins.

- **Objetivos específicos**

- 1.-Analizar cada uno de los factores del modelo de fragilidad ambiental.
- 2.-Zonificar las áreas con distintos grados de fragilidad ambiental potencial y emergente
- 3.-Diferenciar la fragilidad ambiental potencial y la emergente en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua.



## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

### **2.1 Cambio de usos de suelo**

Durante los últimos siglos, las actividades de uso de la tierra, por parte de los humanos, han aumentado y se ha intensificado para proporcionar alimentos, energía y fibra, para sustentar una población humana en expansión (Hurtt et al, 2020), así es como se ha alterado la distribución y la densidad de la vegetación en todo el mundo, siendo un cambio que “modifica fuertemente las propiedades de la superficie de la Tierra, los servicios de los ecosistemas, sus flujos de carbono y sus nutrientes” (Yue, 2017).

Los cambios de usos de suelo se definen como aquellas modificaciones en las propiedades de la superficie de la tierra causadas directamente por las actividades humana y no por los procesos climáticos (Arias et al, 2021), Devajaru los define como la conversión de la vegetación natural para otros fines por las actividades humanas (Devajaru, 2015), mientras que Ramos-Reyes lo define como un proceso dominante con efectos negativos sobre la estructura y funcionamiento de los sistemas (Ramos-Reyes, 2021).

Las consecuencias que presentan los cambios de uso de suelo son ciertos cambios climáticos, alteraciones en las propiedades físicas de la superficie, como el albedo, la evapotranspiración y la longitud de la rugosidad” (Devajaru, 2015), además que contribuyen al cambio climático antropogénico, “representando aproximadamente del 10% al 15% del aumento atmosférico de las concentraciones de dióxido de carbono” (Mahowald, 2017). En este contexto se estima que el próximo siglo se ha proyectado que los cambios de uso de suelo tendrán un profundo impacto en el clima global y local (Heald, 2015)

Los cambios en el uso de la tierra, se han acelerado con el crecimiento de la población, se estima que, la superficie de las tierras de los cultivos han aumentado un 64% desde el año 1850 (Hurtt et al., 2011) así es como normalmente, las actividades agrícolas van modificando la estructura del suelo, aumentando la pérdida de diversidad biológica, disminuyendo el contenido de la materia orgánica,

la extinción de ciertas especies y alterando la cantidad de agua que transpira la vegetación (Devajaru, 2015).

Otro aspecto importante, sobre los cambios de uso de suelo es el ordenamiento territorial y las políticas asociadas a este, siendo “un instrumento preventivo de gestión ambiental en cuanto controla la localización y el funcionamiento de las actividades humanas y como metodología para la planificación del desarrollo” (Gómez, 2003). Por lo tanto, las decisiones sobre el uso de la tierra tienen consecuencias para la estructura, en función de los ecosistemas, afectando los bienes y servicios ambientales; estas decisiones también afectan a los humanos de maneras que van más allá de la situación inmediata del uso de la tierra (Turner 2007)

#### **a) Cambios de uso de suelo en Chile:**

Los cambios de usos de suelo han tenido una repercusión en todo el mundo, modificando los paisajes naturales por las acciones antrópicas para satisfacer las distintas necesidades que tiene la población, En Chile “el cambio de paisaje estuvo inicialmente relacionado con la expansión de la agricultura para atender las necesidades nacionales y la creciente demanda internacional de productos agrícolas” (Aguayo, 2009), según Benavidez-Silva (2021) esto igual se ve fomentado ya que es un país que depende de la extracción y exportación de sus recursos naturales, en las décadas recientes los cambios de usos de suelo han sido destinados para plantaciones forestales.

En ciertas regiones de Chile debido a que los suelos ubicados en los valles fueron cultivados, se comenzó a plantar en las laderas con vegetación natural, para poder ser aprovechadas para la agricultura, lo cual ha creado un riesgo potencial de degradación del suelo (Seguel, 2015).

Este es el caso de la región de O’Higgins en la cual se realizó la investigación, en la cual durante muchas décadas ha sido un lugar popular para los asentamientos humanos, destacando su densidad de población alta, por lo tanto y gracias al buen clima son las áreas agrícolas más extensas e intensamente explotadas (Casanova, 2020).

Seguel (2015) menciona que se disminuye el contenido de materia orgánica del suelo cuando se produce un cambio de usos de suelo de bosque nativo a uso agrícola, además de que afecta al equilibrio del suelo e incrementando el riesgo de erosión. Esto se ve reflejado en la investigación de este mismo autor “Propiedades físicas de suelo posterior al cambio de uso de bosque nativo a viña” realizada en Santa Cruz, región de O’Higgins, mostrando el cambio en la textura, en la composición y en los nutrientes del suelo debido al cambio de la vegetación nativa a uso agrícola.

## **2.2 Fragilidad ambiental**

Varios autores han definido la fragilidad ambiental en los últimos años debido a la gran importancia que han tenido estos estudios en nuestra época, así es como se obtienen diversos puntos de vista sobre este tema.

Una de las principales definiciones es la realizada por Andrade en la cual nos dice que la fragilidad ambiental es “caracterizar el ambiente natural existente en un área dada, en función de la capacidad de recepción o soporte frente a alguna actividad en particular. Este análisis implica el estudio de las variables ambientales más significativas del ecosistema, tendiente a identificar aquellos rasgos más alterables del mismo” (Andrade, 2009). La fragilidad ambiental “determina el grado de vulnerabilidad que ofrece el medio ante la incidencia de determinadas acciones”. (Dellavedova, 2011)

El concepto de fragilidad ambiental “es la susceptibilidad del ecosistema a cambios en su equilibrio dinámico según sus características intrínsecas y extrínsecas” (Da Silva Anjinho, 2021), este autor se basa principalmente en los cambios que tienen los sistemas debido a sus interacciones propias (Clima, pendientes y la composición de los suelos) como con las interacciones externas (acciones antropogénicas). También se puede agregar que el autor defiende su postura sobre las acciones antropogénicas mencionando que “la teoría asume que los ecosistemas naturales se encuentran en un equilibrio dinámico con respecto al intercambio de energía y materia y pueden ser alterados por intervenciones humanas, generando desequilibrios temporales o permanentes” (Da Silva Anjinho, 2021).



“La fragilidad ambiental está ligada al nivel de susceptibilidad al que está sujeto el sistema por determinadas acciones, por algunos factores dañinos o situaciones de alto riesgo”. (Weiss 2012, citado por Dalla Corte 2015)

Igual hay autores que destacan el valor que tienen estos estudios para la planificación territorial, así se puede observar las afirmaciones como la de Valle en el 2016 que dice que “el mapa de fragilidad ambiental es una herramienta importante que utilizan los organismos públicos para la planificación territorial, a escala regional o local” (Valle, 2016). Esta afirmación se suma a la investigación de Spröl (2004) quien menciona que “la identificación de los ambientes naturales y sus potenciales y debilidades emergentes brindan una mejor definición de los lineamientos y acciones a implementar en el espacio físico-territorial, sirviendo de base para la zonificación y otorgando subsidios a la gestión del territorio” (Spröl, 2006). En este contexto, Mafre (2013) hace referencia que “los modelos de fragilidad ambiental son herramientas de decisión importantes para los responsables de la formulación de políticas, ya que ayudan a cuantificar la sensibilidad ambiental y a comprender la relación entre las actividades humanas y la calidad ambiental” (Mafre, 2013)

#### **a) Algunas aplicaciones de metodologías que evalúan la fragilidad ambiental:**

Es así como se han generado distintas metodologías alrededor del mundo para poder evaluar la fragilidad ambiental, esto realizado en zonas con distintas características físicas y climáticas, además que con el pasar de los años se han realizado con la implementación de nuevas tecnologías.

**-Naveas (1979)** en su estudio “*Fragilidad de los ecosistemas naturales de Chile*” propone una de las principales metodologías para la evaluación de la fragilidad ambiental, la cual consistía en “la susceptibilidad de un ambiente al deterioro como resultado del desequilibrio entre sus variables geomorfológicas, climáticas y de vegetación” (Arriagada 2019), para la realización de este estudio se basó en seis factores: Aptitud de los suelos (forestal, ganadera y agrícola), la morfología, el clima, nivel de erosión, uso de suelo actual y el nivel de cobertura.

**-Ross (1994)** en su estudio “Análise empirica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados” propuso una de las principales metodologías para evaluar la

fragilidad ambiental, basada en el estudio de los factores naturales (pendientes, precipitaciones y suelo) junto con los factores antrópicos (usos de suelo), el autor menciona que los ambientes naturales muestran un equilibrio dinámico y que la sociedad humana progresivamente va interviniendo y explotando los recursos naturales, lo cual va alterando este equilibrio dinámico existente.

**-Crepani (2001)** en su estudio *“Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial”*, este método de fragilidad ambiental fue basado en la investigación de Tricart (1977), el cual consistía en “representar la vulnerabilidad natural a la pérdida de suelo a través de la reinterpretación de mapas temáticos e imágenes de satélite” (Valle et al, 2016), Crepani en su metodología “divide la fragilidad ambiental en intervalos de números racionales del uno al tres” (Manfré, 2012).

**-Calijuri (2007)** en su investigación *“Proposta metodológica para geração da carta de fragilidade ambiental, utilizando lógica fuzzy e combinação linear ponderada”* realiza una propuesta metodológica para obtener la fragilidad ambiental potencial y emergente en las cuencas hidrográficas de los ríos Jacupiranga y Pariquera-açu del estado de Sao Paulo, Brasil. Esta metodología se basa y se compara con la metodología de Crepani (2001) incorporando el análisis a distancia de los recursos hídricos y considera los diferentes factores según su importancia para el estudio.

**-Andrade (2009)** en su estudio *“Fragilidad ambiental de la cuenca hídrica del lago Potrero de los Funes, San Luis, Argentina”* presenta una metodología basada en la elaboración y combinación de mapas temáticos, el índice de fragilidad ambiental (IFA) el que permite evaluar el grado de susceptibilidad del ecosistema ante alguna intervención o perturbación antrópica, sumando los índices: de erodabilidad, vulnerabilidad biótica, vulnerabilidad hídrica, la susceptibilidad a la contaminación del aire, índice de fragilidad de paisaje, susceptibilidad a incendios y la vulnerabilidad a la remoción en masa.

**-Cocheci et al (2019)** en su investigación *“Assessing environmental fragility in a mining area for specific spatial planning purposes”* realizan una identificación de múltiples criterios e indicadores de fragilidad ambiental en el distrito de Gorj de

Rumania, basando su investigación en seis factores naturales (geológicos, geomorfológicos, climáticos, hidrológicos, pedológicos y biológicos) y en tres factores antropogénicos (usos de suelo, factores socioeconómicos y legislativos), además de contar con la participación activa de 60 expertos en planificación espacial, estimando así la fragilidad ambiental natural y la antrópica del área de estudio.

En la Tabla 1 se pueden observar las cinco metodologías utilizadas alrededor del mundo para el cálculo del índice de fragilidad ambiental

**Tabla 1:** Síntesis de investigaciones y autores.

Autor	Investigación	Año
Naveas	<i>Fragilidad de los ecosistemas naturales de Chile</i>	1979
Ross	<i>Análise empirica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados</i>	1994
Crepani	<i>Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial</i>	2001
Calijuri	<i>Proposta metodológica para geração da carta de fragilidade ambiental, utilizando lógica fuzzy e combinação linear ponderada</i>	2007
Andrade	Fragilidad ambiental de la cuenca hídrica del lago Potrero de los Funes, San Luis, Argentina	2009
Coheci	Assessing environmental fragility in a mining area for specific spatial planning purposes	2019

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3 Antecedentes acerca de la metodología de Ross para la evaluación de la fragilidad ambiental

Para la siguiente investigación se seleccionó la metodología de Ross (1994) y también la actualización realizada por el mismo autor (2012), esto es debido a la utilización de factores naturales como por la utilización de factores antrópicos, cuyo mapa conceptual se menciona a continuación:

Ross en 1994 propuso un método de análisis empírico “para determinar la fragilidad de Ambientes naturales y artificiales. Este método se basa en un análisis de factores intrínsecos al paisaje, como suelos (tiene en cuenta la fragilidad y erosión), el relieve (tiene en cuenta la disección del relieve), además de considerar la cobertura del suelo y las acciones humanas” (Da Silva 2020). el autor a grandes rasgos que muestra en qué consiste el método planteado por Ross (1994 y 2012), además

entrega los factores que el autor considera como los que deben ser pilares fundamentales para este estudio además de añadir las acciones antrópicas.

SpÖI (2004) dice que el estudio de la fragilidad ambiental propuesto por Ross debe ser de una manera más natural pero igual debe integrar factores en los que el hombre puede participar, basándose así en los “estudios básicos de geomorfología, suelos, cobertura vegetal / uso del suelo y clima”, así de esta manera se puede entender que el estudio se puede realizar en la mayoría los ambientes y/o ecosistemas. Como a su vez observamos que la acción del hombre se ve reflejada en los cambios de los usos de suelo del territorio.

A la suma de las menciones hechas al método planteado por el autor se deben agregar dos definiciones realizadas en el año 2016, la primera es planteada por Valle (2016) en la cual propone:

*“Este método de planificación territorial sintetiza diferentes patrones de fragilidad en Unidades Eco dinámicas Estables (Inestabilidad Potencial) y Unidades Eco dinámicas Inestables (Inestabilidad Emergente), en las que el Mapa de Fragilidad Potencial representa factores intrínsecos al paisaje y el Mapa de Fragilidad Emergente también considera la cobertura terrestre y las intervenciones humanas” (Valle, 2016)*

El método de Ross fue mejorado en el año 2012, por lo que Terra (2016) hace mención de que “el mapeo de las unidades de paisaje identificadas desde la perspectiva de sus debilidades, en vista de las condiciones materiales y posibles intervenciones humanas, es de valiosa importancia”

Finalmente, el método de Ross muestra distintas clasificaciones a los factores, por lo que “su clasificación va desde muy alta inestabilidad, que indica áreas prioritarias para la conservación del medio ambiente, hasta muy baja inestabilidad, donde las características naturales del suelo tienen un alto potencial para diversos usos antrópicos” (Da Silva Anjinho, 2021). Para un mayor detalle de la taxonomía que invento Ross se puede observar en las palabras de Kawakubo en el año 2005, el cual nos dice que el método de Ross tiene una “jerarquía nominal de fragilidad

representada por códigos: muy débil (1), débil (2), medio (3), fuerte (4) y muy fuerte (5).

Estas categorías expresan especialmente la fragilidad del medio en relación con procesos provocados por la escorrentía difusa y concentrada de agua de lluvia” (Kawakubo et al, 2005).

El autor divide la fragilidad ambiental en: a) fragilidad ambiental potencial y b) fragilidad ambiental emergente.

**a) Fragilidad ambiental potencial:**

La fragilidad ambiental potencial “se define como la vulnerabilidad natural de un medio ambiente en términos de sus características físicas, según la pendiente y el tipo de suelo” (Kawakubo, 2005), mostrando así una fragilidad con factores más intrínsecos en el área de estudio, Silva (2012) menciona que “un ambiente sin intervención humana se considera en equilibrio dinámico, y por tanto las fuerzas de la naturaleza son las que determinan el funcionamiento de los procesos naturales” (Silva, 2012)

**b) Fragilidad ambiental emergente:**

Ross (1994) se refiere a que la fragilidad ambiental emergente es la interacción de las características naturales de la fragilidad potencial y el uso actual del suelo, Esta fragilidad ambiental se presenta cuando el equilibrio del medio ambiente cambia debido a las acciones humanas, las cuales cambian la dinámica del medio ambiente, al cambiar uno o más elementos que constituyen el paisaje (Silva, 2012), por lo tanto es la amalgama entre la fragilidad potencial, identificados de la lista de información sobre suelos y pendientes, aumentado por la interferencia antrópica, es decir, la forma en que la sociedad utiliza y ocupa la tierra” (Bahr, 2012).

Para obtener la fragilidad ambiental, en la mayoría de las investigaciones o trabajos de estudios “se elaboraron mapas de fragilidad ambiental potencial que mostraban la vulnerabilidad sin interferencia humana y se elaboraron mapas de fragilidad emergente que mostraban la importancia de las actividades humanas mediante la incorporación de la cobertura terrestre” (Donha, 2006), mostrando así la relación

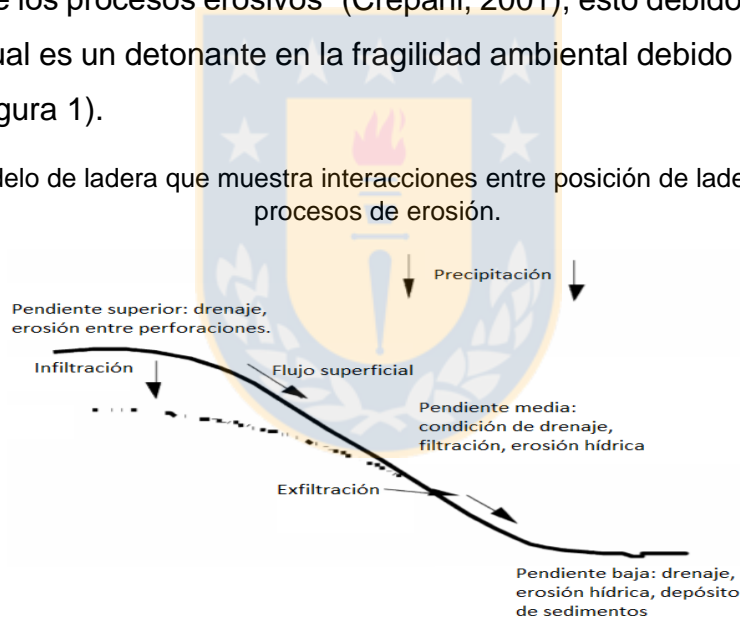
directa que poseen estas dos fragilidades para la obtención de los resultados requeridos.

**a) La siguiente es la conceptualización teórica de los factores que incluye el método:**

### 2.3.1 Factor Pendiente

Este factor es importante para el análisis de la fragilidad ambiental debido a que el grado de la pendiente “incidirá en el grado de erosión de los terrenos, produciéndose mayores pérdidas de suelo conforme el grado de inclinación y longitud de la pendiente” (Tayupanta, 1993). Esto es debido a que la pendiente “tiene una influencia directa en los procesos que condicionan la velocidad de transformación de la energía potencial de agua de lluvia en energía cinética y, en consecuencia, en la intensidad de los procesos erosivos” (Crepani, 2001), esto debido a la esorrentía que surge lo cual es un detonante en la fragilidad ambiental debido a la erosión que se produce (Figura 1).

**Figura 1:** Modelo de ladera que muestra interacciones entre posición de ladera, hidrología y procesos de erosión.



Fuente: Huang 2002.

### 2.3.2 Factor de Suelo

El factor suelo es importante para la clasificación de la fragilidad ambiental, debido a que se podrá observar si el suelo presenta una mayor fragilidad o si presenta una menor susceptibilidad hacia los cambios.

Según Wishmeier y Smith (1978) el factor depende de la textura del suelo, del contenido de carbono orgánico que presenta, la estructura y la permeabilidad de

sus suelos. También se debe observar la fuerza de unión que tienen las partículas en el suelo estudiado, es decir, si tienen una mayor fuerza de unión más grande será la escorrentía, además del factor de escorrentía que posee.

“El suelo va evolucionando bajo el control de unos determinados factores de formación, entre los cuales se cuenta la vegetación. Dichos factores le van imprimiendo una serie de características, las cuales sufren cambios importantes cuando alguno de los factores es alterado con respecto a su situación original” (Jaramillo, 2002)

En este factor suelo se debe observar la composición de los suelos, mientras que la cobertura y las actividades que se practican se ven el siguiente factor.

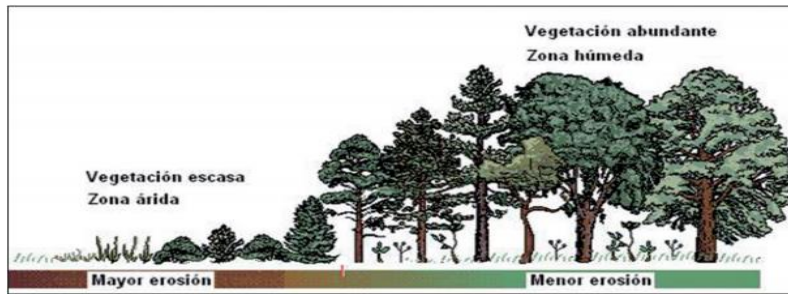
### **2.3.3 Factor uso de suelo y cobertura vegetal**

Debido a que el último tiempo han aumentado los índices de urbanización el cual “es el proceso de convertir el entorno físico natural en el asentamiento urbano, acompañado de drásticos e irreversibles cambios de uso del suelo, generando una nueva configuración de la superficie” (Brandão, 2009), por lo que este factor cobra importancia, ya que hay ciertos usos de la tierra que poseen una mayor susceptibilidad a la fragilidad ambiental mientras hay otros que son menos susceptibles a este fenómeno.

La cobertura vegetal es uno de los pilares más importantes para esta metodología; debido a la incidencia en la protección de suelos (Figura 2), ya que este permite que no se tenga un daño directo al suelo debido a que la vegetación va “aumentando la estabilidad de los agregados del suelo y la propia coherencia del suelo, protegiéndolo del impacto de las gotas de agua, incrementando la capacidad de infiltración y frenando la escorrentía” (García-Fayos, 2004).



**Figura 2:** relación entre erosión y vegetación.



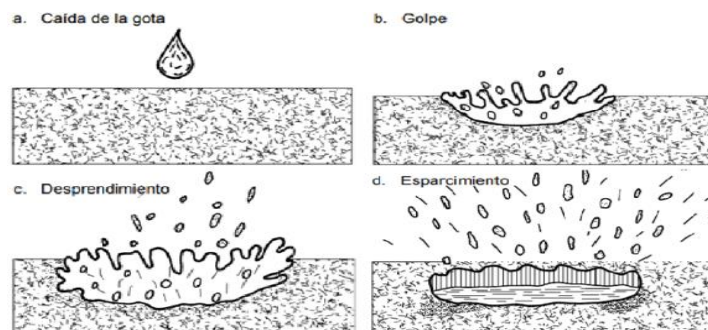
Fuente: Pizarro 2009

### 2.5.4 Factor precipitaciones

Otro factor es el de las precipitaciones, ya que según lo definido por Tayupanta existe una estrecha relación entre la lluvia y la cantidad de suelo erosionado; la intensidad, cantidad, duración, distribución y frecuencia de la lluvia inciden en la pérdida de suelo (Tayupanta, 1993). Siendo uno de los factores que tiende a generar repercusiones en el suelo debido a la agresividad de la lluvia, principalmente debido a que la energía cinética de las gotas de agua que van erosionando y dañando los suelos al impactar con este.

Según Garcia-Fayos (2004) este factor afecta a los suelos debido a la intensidad de las lluvias, como también a la duración que poseen; siendo los que más erosionan y/o perjudican al suelo, los eventos tormentosos intensos, pero de corta duración, que superen la capacidad de infiltración de los suelos; como a su vez también eventos que sean de larga duración, con poca intensidad, los cuales tienden a saturar el suelo y generando escorrentía. (Figura 3)

**Figura 3:** Procesos desencadenados a partir de la salpicadura.



Fuente: Suarez 2001

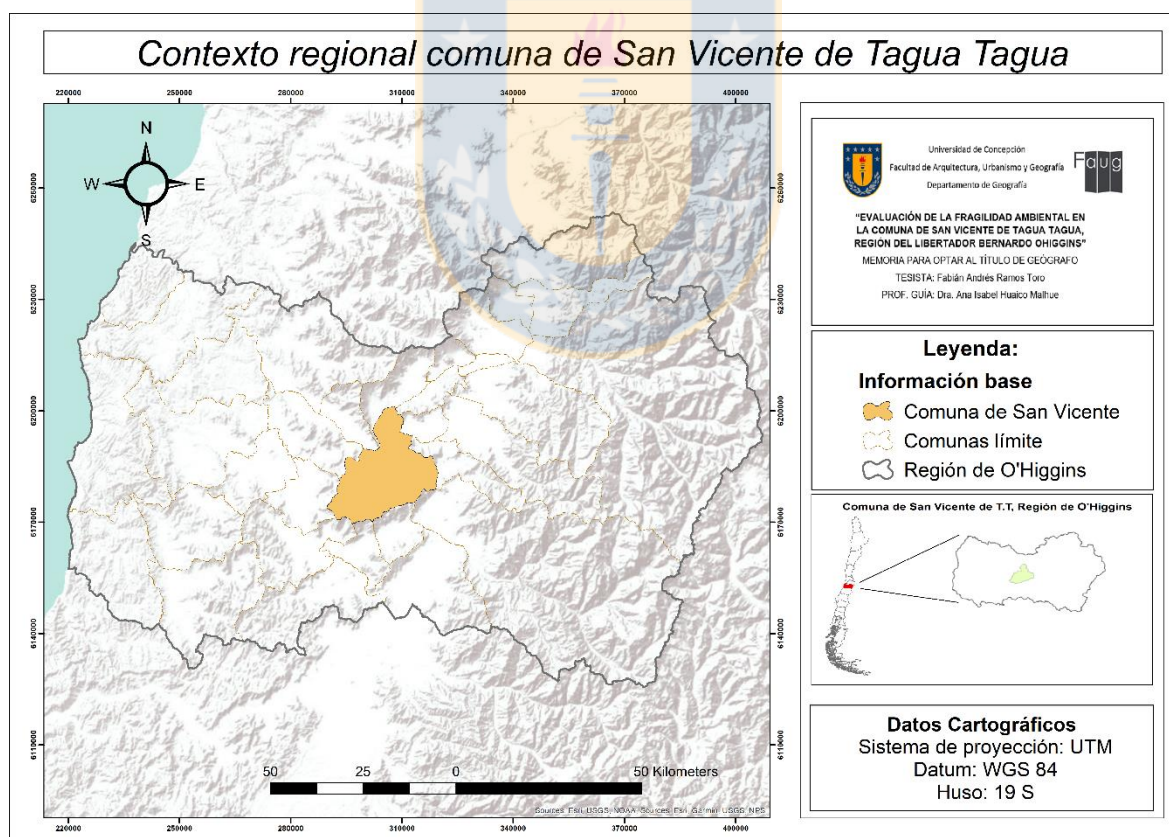


## CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Descripción del área de estudio

La comuna de San Vicente de Tagua Tagua (Figura 4) se ubica principalmente entre los 34°30'00" de latitud sur y los 71°08'00" longitud oeste, en el área centro sur de la provincia del Cachapoal de la región del Libertador Bernardo O'Higgins. Esta comuna limita con once comunas las cuales son: Coltauco, Coinco, Pichidegua, Peumo, Quinta del Tilco, Malloa, Palmilla, Placilla, Nancagua, Santa Cruz y San Fernando. Asimismo, posee una superficie de 497,8 Km<sup>2</sup> y su población según datos del censo 2017 del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) es de 46.766 habitantes siendo equivalente a un 5,11% de la población regional, la localización del área de estudio se indica en la Figura 4.

**Figura 4:** Contexto regional comuna de San Vicente de Tagua Tagua.



Fuente: elaboración propia.

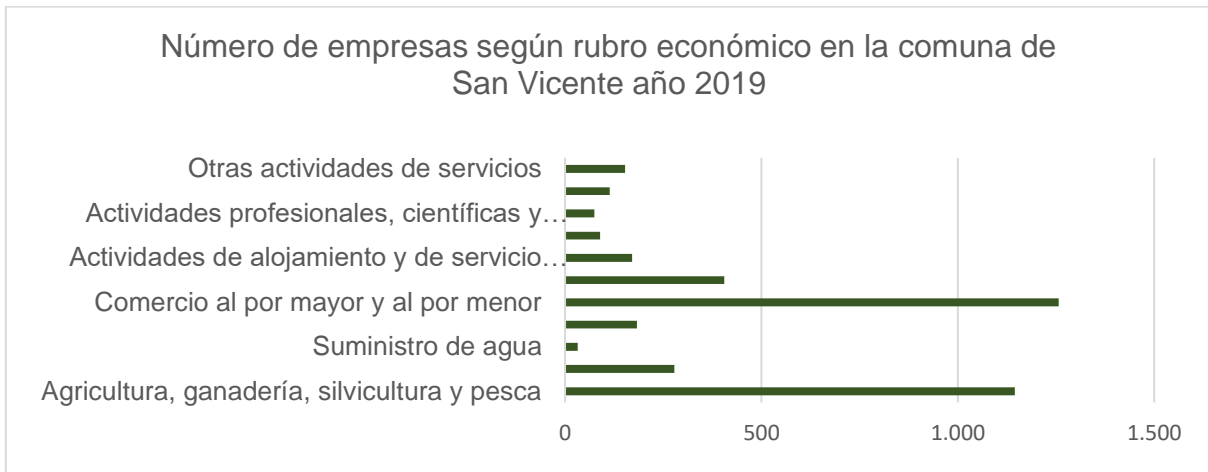
La comuna San Vicente de Tagua Tagua se emplaza principalmente en la depresión intermedia, además de presentar vestigios de la cordillera de la costa presentando sus mayores alturas sobre los 1000 metros sobre el nivel del mar.

Tiene la presencia de tres grandes cauces: estero Zamorano, río Claro y el río Cachapoal pertenecientes a la cuenca del río Rapel 060 (DGA, 2004), los tres afluentes son de características pluvia-nival lo que significa que se alimentan gracias a la nieve proveniente de la cordillera de los andes, como a su vez las lluvias en otoño e invierno hacen que se mantengan con su caudal constante, mostrando su máximo flujo en los meses de junio a diciembre.

El clima de la comuna según la clasificación de Köppen modificada por Sarricolea (2017) posee un clima templado cálido con lluvias invernales y gran humedad atmosférica, por lo que los inviernos son fríos o templados y los veranos son secos, lo anterior caracteriza a los climas mediterráneos. El área de estudio posee una oscilación térmica moderada la cual es de 20°C diarios, los días más calurosos de esta comuna son en el mes de enero dando un aproximado de 30°C, mientras que en los días más fríos son en junio con 8°C en promedio. La temperatura media anual es de 15°C, con una media en verano de 23°C y en invierno de 9°C.

Desde el punto socioeconómico la comuna posee como principales actividades productivas los sectores agroindustriales, agricultura, industria alimenticia, comercio y servicios (Figura 5). Hay una gran cantidad de empresas destinadas a los servicios en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua principalmente en el ámbito de comercio. las empresas agrícolas obtienen el segundo lugar debido a que durante los últimos años han aumentado su superficie cultivada, los rendimientos de las siembras y las plantaciones frutales. En las plantaciones frutales se destaca por una de las mayores incidencias a nivel provincial (ODEPA, 2019) enfatizando la exportación internacional de duraznos, vid de mesa, limoneros, naranjos, nectarinas y ciruelas.

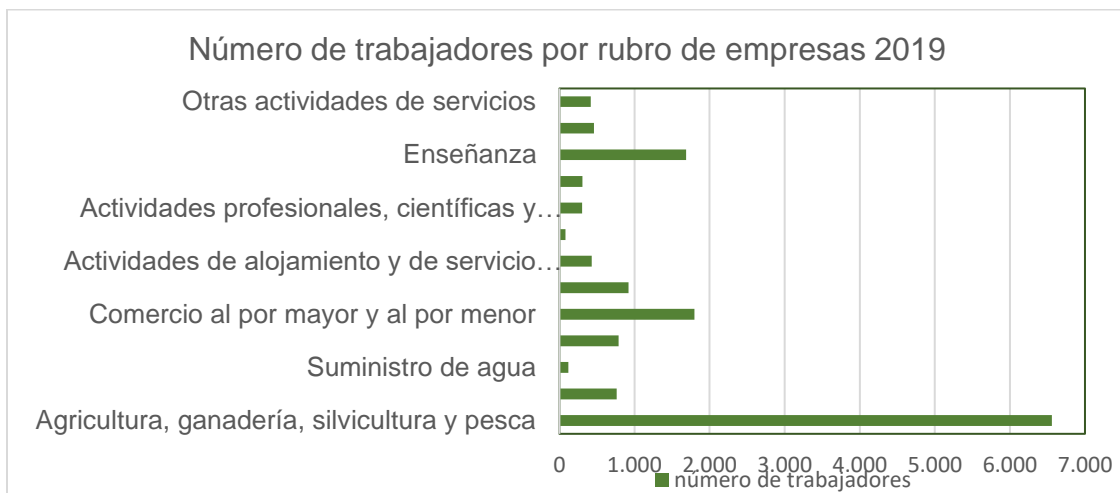
**Figura 5:** Empresas de San Vicente según rubro económico.



Fuente: elaboración propia, a partir de datos de la biblioteca del congreso nacional (BCN, 2021)

En el ámbito agropecuario se observa que en la comuna hay una gran cantidad de personas que trabajan en ese rubro, según los datos obtenidos en 2019, había un total de 6588 habitantes que desempeñaban esas labores, lo que correspondía a un 45% de los trabajadores de la comuna. Otras actividades que se presentan son el comercio con un total de 1.797 trabajadores y en tercer lugar el área de educación con 1.688 personas, con estas cifras se puede concluir que en la comuna de San Vicente es de gran importancia el área agrícola debido a los trabajos que entrega a la zona y lo indispensable que es para la economía este rubro (Figura 6)

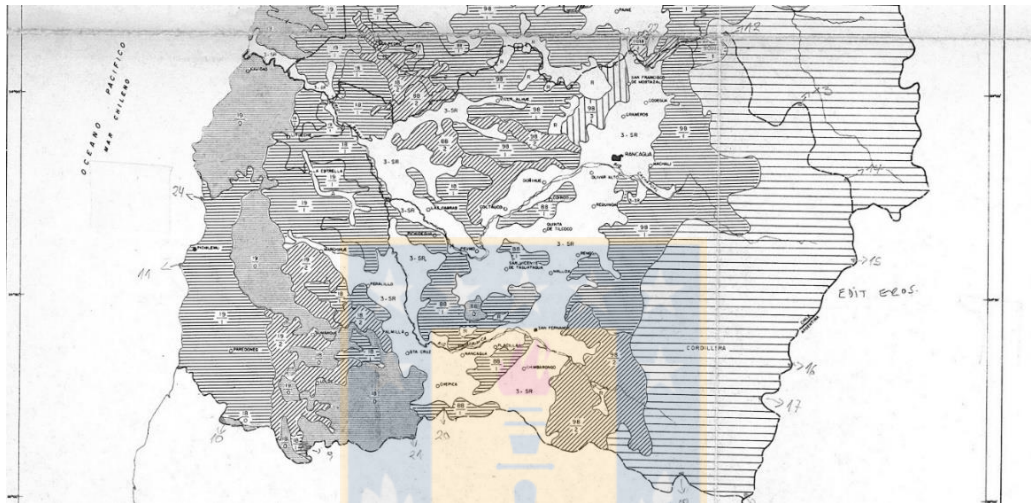
**Figura 6:** Trabajadores por rubro en empresas de San Vicente de Tagua Tagua.



Fuente: elaboración propia, a partir de datos de la Biblioteca del Congreso Nacional (BCN, 2021).

Con respecto a estudios de estas características en la zona, el único trabajo acerca de la fragilidad ambiental es realizado por Naveas (1979). En esa investigación se realizó un análisis, en las regiones de Chile mediante el estudio de la erosión y la cobertura de suelos, pero como resultados para la época no había una gran expansión de las ciudades, ni grandes cambios de los usos de suelo, en la Figura 7 se puede apreciar un croquis de los resultados obtenidos en la región de O'Higgins.

**Figura 7:** Croquis resultados región de O'Higgins por Naveas 1979.

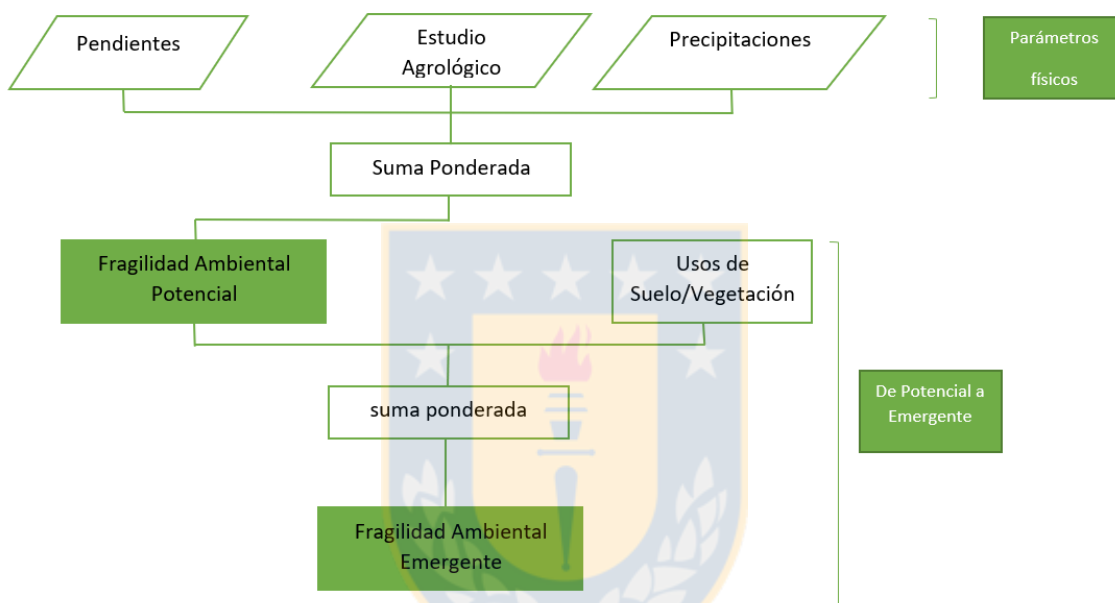


Fuente: Naveas 1979

### 3.2 Planteamiento metodológico

Para evaluar la fragilidad ambiental se utilizó el método propuesto por Ross que fue adaptado por Da Silva Anjinho (2021), el cual se basa en el análisis de factores del paisaje, descritos en la sección anterior: pendientes, tipos de suelos, precipitación y uso de suelos (Figura 8), que se combinan de manera ponderada para obtener la fragilidad ambiental potencial y emergente.

**Figura 8:** Metodología de análisis de fragilidad ambiental por Da Silva Anjinho (2021).



Fuente: Da Silva Anjinho 2021.

La propuesta por Da Silva Anjinho (2021) permite obtener la fragilidad ambiental potencial, mediante una suma ponderada de los valores previamente asignados a cada factor natural. es necesario evaluar la fragilidad ambiental potencial en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua debido a que se obtendrá el grado de susceptibilidad que tiene el ambiente a los factores naturales (topografía, clima y el suelo) y como estos van influyendo a la vulnerabilidad en la comuna.

También la metodología permite obtener la fragilidad ambiental emergente, mediante el uso de la fragilidad ambiental potencial (previamente calculado) junto al factor uso de suelo/ cobertura vegetal, esto es debido a la relación directa que hay entre los usos de suelo con la fragilidad ambiental emergente.

La información base (Tabla 2) para obtener la fragilidad ambiental en San Vicente de Tagua Tagua fue extraída de diversos estudios realizados en la comuna y en la región de O'Higgins, la información territorial se procesa a través del software ArcGIS 10.5, utilizando el sistema geodésico WGS84, usando a su vez el sistema de coordenadas para la zona 19 sur.

**Tabla 2:** Bases de datos utilizadas en el estudio.

Base de datos	Factor	Fuente
Estudio agrológico 2010 región de O'Higgins	Suelo	CIREN, 2010
Imagen satelital SRTM	Pendiente	<a href="http://www.earthexplorer.usgs.gov">www.earthexplorer.usgs.gov</a>
Catastros de uso de suelos y vegetación	Uso de suelos/ Cobertura vegetal	IDE, 2016
Datos pluviométricos	Precipitaciones	Explorador CR2

Fuente: elaboración propia.

### 3.2.1 Análisis de cada uno de los factores del modelo de fragilidad ambiental

#### a) Factor de Pendientes

Este factor según Bascuñán (2010) tiene una influencia directa en la erosión hídrica debido a que, a mayor inclinación y longitud de la pendiente, la escorrentía superficial tendrá una mayor velocidad y un mayor volumen. Este factor tiene una importancia en la obtención de la fragilidad potencial, como lo asegura Bahr (2012) ya que la vulnerabilidad natural de un medio ambiente depende de sus características físicas en función de las pendientes y del suelo.

Para el mapa de pendientes, se unieron dos imágenes satelitales correspondientes al año 2020 de la Misión Topográfica Radar Shuttle (SRTM por sus siglas en inglés) mediante una herramienta de Arc Gis 10,5 llamada "Mosaic to new raster", luego se tuvo que extraer una máscara mediante la herramienta "Clip" para el área de la comuna de San Vicente de Tagua Tagua, así se pudieron obtener las alturas mínimas y máximas de la comuna, luego se clasificaron las pendientes basado en la clasificación de Ross 2012 (Tabla 3)



**Tabla 3:** Variable de pendientes por Ross 2012.

Nivel jerárquico de fragilidad ambiental	Características de las pendientes	Peso
Muy débil	Pendientes menores a 6%	1
Débil	Pendientes entre 6 a 12%	2
Medio	Pendientes entre 12 a 20%	3
Fuerte	Pendientes entre 20 a 30%	4
Muy fuerte	Pendientes superiores a 30%	5

Fuente: Ross, 2012

### **b) Factor de Suelo**

Este factor consiste en la evaluación de la textura del suelo, la resistencia al esfuerzo constante, los contenidos tanto de minerales como orgánicos que se encuentran y el nivel de infiltración que este posee. Según Bertoni (1999), considera que las variables de la distribución del tamaño de las partículas (textura), la morfología, su profundidad y otros elementos son los que determinan el nivel de la fragilidad del suelo. El factor suelo puede ser modificado debido a que su estructura no es permanente, “siendo modificado por causas climáticas, de las formas y otros factores” (Bascuñán, 2010).

Debido a la escasa información sobre la composición de los suelos en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua (el cual es un factor relevante para la clasificación), se tuvo que realizar una adaptación al modelo de Ross (2012) como al de Da Silva Anjinho (2021) empleando la utilización del estudio agrológico existente para la zona (CIREN 2010): el cual consiste en un análisis de la textura de suelos, en el análisis de la compactación del suelo, la red de drenaje, la altitud y la susceptibilidad ante el riesgo de erosión.

Esta adaptación consistió principalmente en entregar una ponderación a las distintas clases agrológicas asimilando a los valores de los tipos de suelo clasificados por Ross (2012) para Brasil y así obtener la categorización que permitiera la evaluación de la fragilidad ambiental potencial y emergente de la comuna.

El estudio de suelo que fue utilizado en este análisis fue realizado en el año 2010 por el centro de información de los recursos naturales (CIREN) en la región del Libertador Bernardo O'Higgins el que está en formato shape (SHP), en el cual se ven las clases de los suelos que van desde las clases uno hasta la clase ocho (Tabla 4), así mostrando distintos niveles desde la clase menor a la clase mayor. Se tuvo que ordenar las clases en el shape (mediante la tabla de contenidos) para poder identificar las distintas zonas y sus distintas clases agrológicas, para el análisis se deberá dar una clasificación (color distinto) y valor a las clases (Tabla 5).

**Tabla 4:** Características de las clases agrológicas.

Clase Agrológica	Principales características
Clase I	Presenta pocos problemas de erosión, buenos sistemas de drenaje, pocas limitaciones de uso y apropiados para la agricultura (presenta muchos nutrientes y bueno para la fertilización).
Clase II	Presenta una susceptibilidad moderada a la erosión por el agua y/o viento, presenta limitaciones como leves pendientes y leves inundaciones, son apropiados para la agricultura y ganadería (métodos sencillos; cultivos agrícolas, pastos, pastoreos).
Clase III	Presenta una alta susceptibilidad a la erosión por agua y/o viento, presenta limitaciones como pendientes moderadas, frecuentes inundaciones, humedad constante, son utilizadas para cultivos permanente mediante métodos intensivos, pastoreos y producción forestal.
Clase IV	Presenta una susceptibilidad severa a la erosión por agua y/o viento, presenta limitaciones como pendientes muy pronunciadas, baja capacidad de retención de aguas, humedad excesiva, son utilizadas para cultivos excepcionales o muy limitados, pastoreos y producción forestal.
Clase V	Son suelos no propios para el cultivo, debido a que presentan grandes limitaciones como la presencia hídrica, inundaciones constantes y mucha pedregosidad, son usados para masas arbóreas o mantenimiento de la vida salvaje.



Clase VI	Presenta una susceptibilidad a la erosión severa, presenta limitaciones como pendientes muy pronunciadas, baja capacidad de retención de aguas, excesiva humedad, son utilizados principalmente para soportar una vegetación permanente, el mal cuidado de estos suelos puede conducir a un agotamiento de la vegetación.
Clase VII	Sus características son más severas que la clase VI; pendientes muy pronunciadas, muy baja retención de agua, excesiva humedad, son suelos para mantener una vegetación permanente con severas restricciones, se recomienda para bosques.
Clase VIII	son suelos no apropiados para el cultivo ni para la producción de vegetación útil y permanente, son principalmente terrenos quebrados, pedregosos, áridos o pantanosos.

Fuente: Aguiló et al. (2014)

**Tabla 5:** Adaptación a la clasificación de Ross (2012) según las variables de suelos usando las clases agrológicas de San Vicente de Tagua Tagua.

Nivel jerárquico de fragilidad ambiental	Características de suelo	Peso
Muy débil	Clase I	1
Débil	Clase II y clase III	2
Medio	Clase IV y clase V	3
Fuerte	Clase VI y clase VII	4
Muy fuerte	Clase VIII	5

Fuente: elaboración propia basando en los factores de Ross (2012) y Da Silva Anjinho (2021).

### **c)Factor Uso de suelo/ Cobertura vegetal**

El factor de usos de suelo/ cobertura vegetal tiene su importancia debido a que “los tipos de vegetación protegen la superficie del suelo del impacto de las gotas de lluvia y previenen la escorrentía” (Adami, 2012). Según Rodrigues (2013) Para poder llegar a la fragilidad emergente de un área, es decir aquel índice que tiene relación directa con la intervención antrópica, para el que se debe asociar a su vulnerabilidad natural a los diferentes tipos de uso de suelo y cobertura vegetal.

Los usos de suelo para el municipio fueron obtenidos previo tratamiento, a través de la herramienta cortar del software ArcGIS 10.5. Esta información fue obtenida desde la plataforma de información de la infraestructura de datos espaciales del Ministerio de bienes nacionales ((IDE),2016), la cual dispone de la cartografía elaborada por la Corporación Nacional ((CONAF), 2016).

Una vez obtenida la cartografía de usos de suelos se procedió a clasificarla y ponderarla utilizando la metodología de Ross (2012), que se puede observar en la Tabla 6.

**Tabla 6:** Variable de uso de suelo y cobertura vegetal por Ross (2012).

Nivel jerárquico de fragilidad ambiental	Características de Uso de suelo/ vegetación	Peso
Muy débil	Bosques y bosques naturales.	1
Débil	Formación de arbustos naturales y pastos en buen estado.	2
Medio	Cultivos de ciclo largo y pastos degradados	3
Fuerte	Cultivos de ciclo corto y silvicultura.	4
Muy fuerte	Áreas deforestadas, suelo expuesto, urbanización y minería.	5
No relevante	Cuerpos de aguas	0

Fuente: elaboración propia, basado en el método de Ross 2012.

#### **d) Factor de Precipitación**

El factor de precipitaciones o también llamado factor climático es importante ya que es uno de los agentes erosivos del suelo, esto debido tanto a la duración como a la intensidad de las precipitaciones, estas tienden a ser un factor natural siendo utilizado para el cálculo de la fragilidad potencial.

Para obtener el índice de precipitación de la comuna se generó gracias a datos pluviométricos de dos estaciones ubicadas en la comuna de San Vicente y de diez estaciones ubicadas en comunas cercanas a la comuna (Tabla 7), esto es debido a que el tiempo elegido para el estudio fue de 30 años (desde 1987 hasta 2017), ya

que se estima que es un lapso de tiempo que permite tener una visión temporal amplio del comportamiento de las precipitaciones se obtuvieron gracias al explorador climático CR2 ([www.explorador.cr2.cl/](http://www.explorador.cr2.cl/)).

**Tabla 7:** Estaciones pluviométricas con datos desde 1987 a 2017.

Estaciones pluviométricas	Comuna	Latitud	Longitud	Promedio PP/año (1987-2017)
Cocalán	Las cabras	-34.2033	-71.2764	482,3
Coltauco	Coltauco	-34.2875	-71.08	607,5
Convento Viejo	Chimbarongo	-34.7694	-71.1331	620,6
La candelaria	Chépica	-34.7808	-71.4142	675,6
La Rufina	San Fernando	-34.7428	-70.7519	1008,9
Millahue	San Vicente de T. T	-34.5264	-71.2122	664,0
Pichidegua	Pichidegua	-34.2872	-71.4058	500,5
Popeta	Rengo	-34.4369	-70.7794	531,1
Rancagua	Rancagua	-34.1908	-70.7508	397,2
Rengo	Rengo	-34.4217	-70.8667	485,7
San Fernando	San Fernando	-34.5983	-70.9686	645,8
Vía Vieja	San Vicente de T. T	-34.4517	-71.0506	609,8

Fuente: elaboración propia con datos extraídos de explorador Cr2.

La clasificación de las precipitaciones utilizadas en el método de Ross (2012) fue realizada para climas tropicales, los cuales presentan abundantes lluvias que en algunos casos superan los 2000 mm/año. Los valores de precipitaciones que utilizó Ross son bien elevados en comparación de los valores obtenidos en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua, esto es debido a que el modelo de estudio esta realizado para climas tropicales con grandes influencias de lluvias en el año. Debido a la diferencia de climas tanto en la zona de estudio como en el modelo impuesto por Ross se debió adecuar la metodología de precipitaciones.

Así es como se tuvo que agregar los valores acordes a las precipitaciones anuales en el clima mediterráneo, obtenido gracias a los intervalos de confianza de las precipitaciones de San Vicente de Tagua Tagua, este mismo método fue utilizado en la investigación de Kysely (2010) "Coverage probability of bootstrap confidence intervals in heavy-tailed frequency models, with application to precipitation data". Para la obtención de los intervalos de confianza se obtuvo el promedio de las precipitaciones de la comuna (el que fue de 652 mm/año), la desviación estándar que fue de 265 mm/año, el nivel de confianza utilizado fue del 95%, la sustracción entre el promedio y la desviación estándar dio un resultado de 555 mm/año y la adición entre estos dos valores fue de 749 mm/año. Con los valores obtenidos se pudo realizar una modificación a las variables de precipitación adaptadas al área de estudio y a un clima mediterráneo.

Debido a que las precipitaciones son altamente imprescindibles a una escala espacial, se utilizó la técnica de análisis espacial basada en un principio geográfico fundamental (Hussain, 2021), este es el método de interpolación espacial ponderada por distancia inversa (IDW por sus siglas en inglés) este siendo uno de los métodos más utilizados debido a que implementa la suposición de los puntos que están cercanos entre sí. El IDW se generó a partir de la interpolación de las precipitaciones promedio (desde el año 1987 hasta el año 2017) cercanas a la comuna de San Vicente de Tagua Tagua, mediante la herramienta de ArcGIS 10.5. Este mismo método fue utilizado por Da Silva Anjinho (2021) para evaluar la fragilidad ambiental en Sao Paulo, Brasil y por Da Silva (2020) para el mapeo de la fragilidad ambiental en el estado de Rondonia, Brasil.

**Tabla 8:** Variable de precipitación clima mediterráneo: niveles jerárquicos en esta investigación.

Nivel jerárquico de precipitaciones	Características pluviométricas	Peso
Muy débil	Situación con periodos secos y precipitaciones normales en meses de invierno con volúmenes anuales menores a 265 mm/año.	1
Débil	Situación con periodos secos y concentración de precipitaciones normales en meses de invierno con volúmenes anuales iguales o inferiores a 555 mm/año.	2
Medio	Situación con precipitaciones anuales en meses de invierno con volúmenes que se encuentren entre 555 mm/año hasta 652 mm/año.	3
Fuerte	Situación con periodos de lluvia fuerte en meses de invierno, observando una gran cantidad de lluvia caída siendo valores mayores a 652 mm/año hasta 749 mm/año.	4
Muy fuerte	Situación de precipitaciones fuertes y constante en meses de invierno con grandes volúmenes anuales superiores a 749 mm/año.	5

Fuente: elaboración propia, basado en la adaptación al método de Ross 2012.

### 3.2.1 Evaluación de la fragilidad ambiental potencial y emergente

Luego de haber clasificado los cuatro factores según la jerarquía de fragilidad ambiental, se les asignó un peso o valor que varía según cinco niveles de fragilidad, desde el muy débil al muy fuerte (Ross, 2012). De esta forma se distinguen dos tipos de fragilidad la "potencial" y la "emergente".

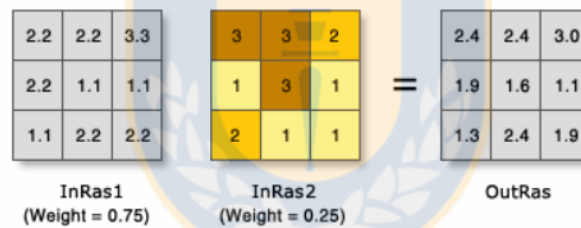
Para obtener los índices de fragilidad ambiental, todos los shape fueron transformados a Ráster, para así poder trabajar con un mismo formato, además de reclasificarlos mediante la herramienta "Reclassify", la cual sirvió para dar valores entre el 1 al 5 según la clase de fragilidad que presentan (muy débil a muy fuerte respectivamente), esto se realizó para facilitar el trabajo con las capas de información. Para la creación de los dos mapas de fragilidad (potencial como emergente) en Arc gis implica una superposición de los mapas, esto no siempre es

en la misma escala por lo cual se tuvo que modificar la escala de las imágenes siendo de cero a uno utilizando la herramienta “Fuzzy membership” de Arc gis 10,5.

### Fragilidad ambiental potencial

Para la realización de la fragilidad ambiental potencial se tuvieron que ocupar los ráster de los factores físicos; factor pendiente, factor precipitación y el factor suelos, para poder superponer las capas de información se tuvo que usar la herramienta Suma ponderada (Weighted sum en inglés) el cual es la aproximación más utilizada en problemas, además de ser un método intuitivo y fácil de aplicar (Socorro, 2004), con esta herramienta se pudo combinar las variables y obtener el análisis integrado de estas, el algoritmo que utiliza ArcGIS se puede observar en la Figura 9, en la cual los valores se multiplican por su factor de peso y los resultados se suman para crear el ráster de salida. Los pesos que fueron asignado a cada factor natural para el cálculo de la fragilidad ambiental potencial se pueden observar en la Tabla 9:

**Figura 9:** Algoritmo de la herramienta suma ponderada en ArcGIS



Fuente: ArcGIS.

Para la clasificación de los resultados de fragilidad ambiental potencial y emergente, se utilizó la clasificación propuesta por Valle (2016), la cual definió valores para cada tipo de clase de fragilidad ambiental (Tabla 9 y Tabla 10). Las clases de fragilidad fueron sumadas utilizando las herramientas raster de ArcGIS y así se obtuvieron los intervalos de resultados, tal como lo propone el autor.

**Tabla 9:** Rangos de fragilidad ambiental potencial.

Clases de Fragilidad ambiental	Rangos de fragilidad potencial
Muy débil	2 - 6
Débil	7 - 8
Medio	9 - 10
Fuerte	11 - 12
Muy fuerte	13 - 15

Fuente: elaboración propia, basado en la clasificación de Valle (2016).

### **Fragilidad ambiental emergente**

Para la obtención de la fragilidad ambiental emergente, es la que tiene que ver la influencia antrópica que se ha tenido en los ecosistemas, más allá de los factores físicos esta incluye los factores antrópicos (usos de suelo y cobertura vegetal) esto debido a los cambios realizados por el humano en el medio ambiente, así es como se tiene que utilizar el resultado de la fragilidad ambiental potencial combinado con la misma herramienta de Suma ponderada para poder obtener la fragilidad ambiental emergente. En la Tabla 10 se pueden observar los valores impuestos para cada factor.

**Tabla 10:** Pesos de los factores para el cálculo de la fragilidad ambiental emergente.

Clases de Fragilidad ambiental	Rangos de fragilidad emergente
Muy débil	3 - 8
Débil	9 - 11
Medio	12 - 14
Fuerte	15 - 17
Muy fuerte	18 - 20

Fuente: elaboración propia, basado en la clasificación de Valle (2016).



## CAPÍTULO IV: RESULTADOS

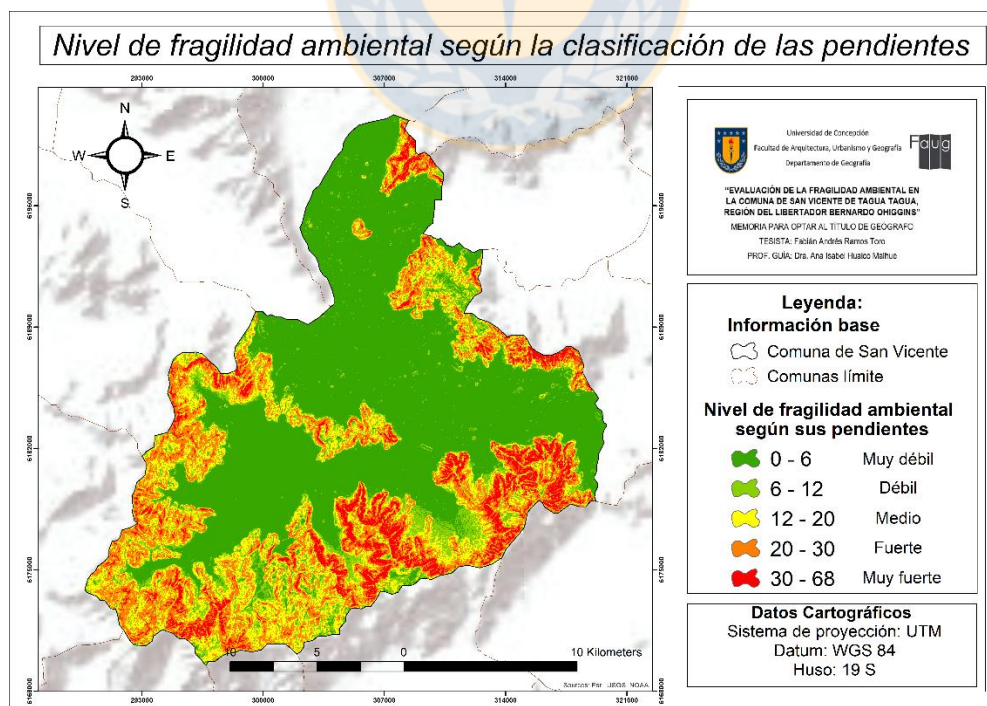
### 4.1 Análisis de los factores obtenidos

#### 4.1.1 Factor de pendientes

Se observó que, en el área de estudio, hay un predominio de terrenos con leves o nulas pendientes (0 a 6 grados de inclinación) estas zonas son equivalentes a un 50,7% de la superficie total de la comuna, por lo que, desde el punto de vista de este factor, en estas zonas la fragilidad ambiental es muy débil. La clase de fragilidad ambiental débil presenta en sus terrenos pendientes moderadas (6 a 12 grados de inclinación) y una superficie de 8,9% del total de la comuna según el factor pendientes. En tercer lugar, se aprecian terrenos con pendientes fuertes (12 a 20 grados de inclinación) las que equivalen a un 15,2% de la superficie de la comuna, siendo representadas por una clase de fragilidad ambiental media. El área con pendientes muy fuertes (entre 20 a 30 grados de inclinación) presentan el segundo lugar desde el punto de superficie, esto es equivalente a un 17,7% de la superficie de la comuna, representando a la clase de fragilidad ambiental fuerte. La clase de fragilidad ambiental que posee una menor superficie según sus pendientes es la muy fuerte, la cual posee terrenos con pendientes escarpadas o acantiladas (siendo superiores a los 30 grados de inclinación), equivale a un 7,5% de la superficie de la comuna.

Estos resultados se observan en la Figura 10 y en la Tabla 11.

**Figura 10:** Nivel de fragilidad ambiental según la clasificación de pendientes.



Fuente: elaboración propia, basado en la clasificación de Ross 2012.



**Tabla 11:** clasificación de las pendientes según la clase de fragilidad y por superficie.

Clase de fragilidad	Área (Km2)	Porcentaje (%)	Grado de pendiente	Valor
Muy débil	227	50,7	Pendientes menores a 6%	1
Débil	40	8,9	Pendientes entre 6 a 12%	2
Medio	68	15,2	Pendientes entre 12 a 20%	3
Fuerte	79	17,7	Pendientes entre 20 a 30%	4
Muy fuerte	7,4	7,5	Pendientes superiores a 30%	5

Fuente: elaboración propia según los datos obtenidos por Arc gis.

#### 4.1.2 Factor de suelo

Los principales resultados que se obtuvieron en el factor suelo son que la clase I (25,8 Km<sup>2</sup>) correspondía a un nivel de fragilidad ambiental de suelo muy débil, la cual presenta un 5,3% de la superficie de la comuna, la cual presenta zonas con muy buenas propiedades para la agricultura, ricas en nutrientes y con muy bajos niveles de erosión, son principalmente ocupadas para las actividades agrícolas (tanto para la plantación de frutales como de hortalizas) aprovechando al máximo sus cualidades y destacándose

La clase II (75 km<sup>2</sup>) y la clase III (67,3 km<sup>2</sup>) corresponden a un nivel de fragilidad ambiental de suelo débil, con un 29,4% de la superficie de la comuna lo que es correspondiente a áreas con gran facilidad para la agricultura, que presentan una leve pendiente y que no tienen grandes inundaciones, esto se observa a la gran cantidad de zonas que son utilizadas para la actividad agrícola aprovechando las cualidades del suelo

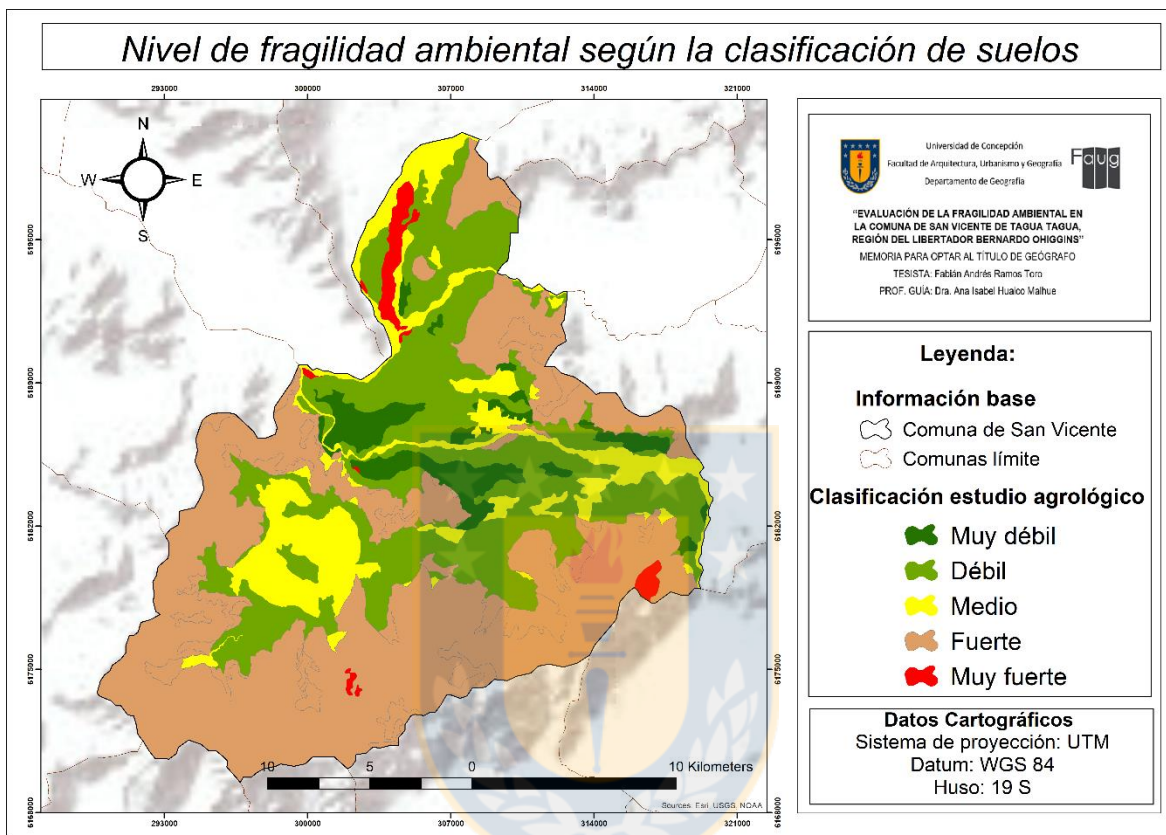
La clase IV (44,3 km<sup>2</sup>) y la clase V (18,3 km<sup>2</sup>) correspondían a un nivel de fragilidad ambiental de suelo Medio, la cual presenta un 12,9% de la superficie de la comuna, destacándose por ser suelos con pendientes moderadas, que presentan frecuentes inundaciones, humedad constante, mucha pedregosidad y presencia hídrica en algunos casos, en la comuna de San Vicente en la parte inferior izquierda era donde se encontraba la laguna Tagua Tagua, la cual según Jackson (2012) fue una extensa laguna con abundancia y diversidad de recursos, que hoy en día esta drenada por eso se justifica esa área con fragilidad media.

La clase VI (32 km<sup>2</sup>) y la clase VII (214 km<sup>2</sup>) correspondían a un nivel de fragilidad ambiental de suelo Fuerte, con un 50,8% de la superficie total de la comuna, lo cual nos indica que son suelos muy susceptibles a la erosión, que poseen pendientes muy pronunciadas y que presentan un tipo de vegetación permanente, esto es debido a la gran cantidad de cerros o montañas en el área de estudio.

La clase VIII (7,9 km<sup>2</sup>) correspondía a un nivel de fragilidad ambiental de suelo Muy fuerte. siendo terrenos no aptos para la agricultura con un porcentaje de superficie de 1,6% comunal, estos terrenos poseen cualidades como terrenos quebradizos,

pantanosos, pedregosos y áridos; en la comuna se nota la presencia de esta clase en las montañas y en una franja debido a su terreno pantanoso. En la Figura 11 y la Tabla 12 se aprecia la división y los correspondientes niveles según su superficie en la comuna.

**Figura 11:** Nivel de fragilidad ambiental según la clasificación de Suelos.



Fuente: elaboración propia, basado en los datos obtenidos del CIREN.

**Tabla 12:** Clasificación del estudio agrológico según la clase de fragilidad y por superficie.

Clase de fragilidad	�rea (Km2)	Porcentaje (%)	Clases agrológica	Valor
Muy débil	25,7	5,3	Clase I	1
Débil	142,3	29,4	Clase II y clase III	2
Medio	62,6	12,9	Clase IV y clase V	3
Fuerte	246	50,8	Clase VI y clase VII	4
Muy fuerte	7,9	1,6	Clase VIII	5

Fuente: elaboración propia, a partir de datos obtenidos por el shape de estudios agrológicos CIREN 2010.

### 4.1.3 Factor uso de suelo/ cobertura vegetal

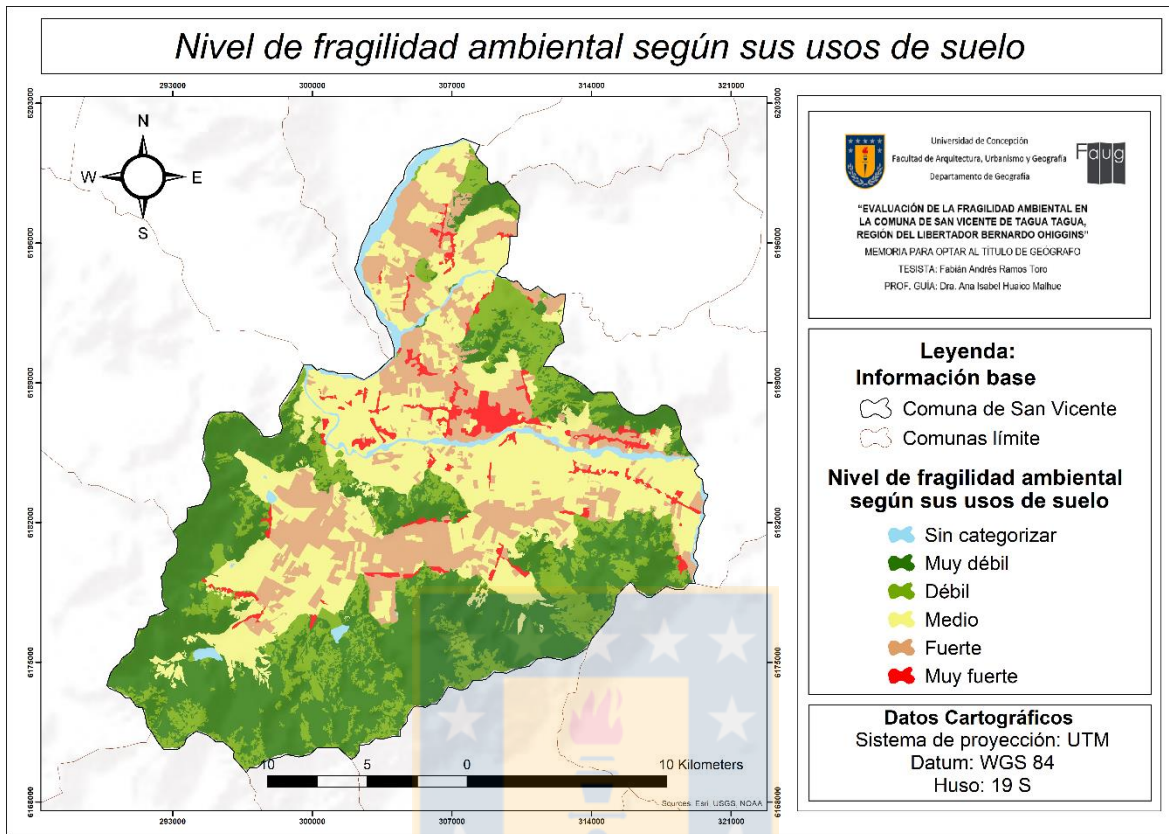
Con respecto a al uso de los suelos/cobertura vegetal, se observó que existe un predominio de áreas ocupadas por bosques y bosques nativos (37,6 % de la superficie de la comuna) indicando un dominio de la clase de fragilidad muy débil, seguido de zonas con cultivos de ciclo largo y pastos degradados (26% de la superficie del área de estudio) la que presenta una fragilidad ambiental media, a continuación, se puede observar una fragilidad ambiental fuerte; esto debido a que hay cultivos de ciclo corto y silvicultura los cuales tienen un impacto directo en el suelo debido al cambio constante y permanente en el terreno (representando un 15,3% en la superficie), luego se aprecian los usos de suelo conformados por arbustos naturales (matorrales) y pastos en buen estado (14,7%), los cuales corresponden a una fragilidad ambiental débil, mientras que la unión de los usos de suelo correspondiente a las áreas deforestadas, suelo expuesto, urbanización y la minería constituye un 3,4% de la superficie de la comuna y por último el área no considerada para este factor (cuerpos de agua) tiene un 2,3% de superficie. En la Figura 12 se puede observar el área de una manera visual, mientras que en la Tabla 13 se describe de una manera más cuantitativa

**Tabla 13:** Clasificación de los usos de suelo según la clasificación de Ross (2012).

Clase de Fragilidad	Área (Km2)	Porcentaje (%)	Uso de suelo	Valor
Muy débil	162,6	37,6	Bosques y bosques nativos	1
Débil	72,2	14,7	Arbustos naturales (matorrales) y pastos en buen estado.	2
Medio	141	26	Cultivos de ciclo largo y pastos degradados.	3
Fuerte	77,5	15,3	Cultivos de ciclo corto y silvicultura.	4
Muy Fuerte	16	3,4	Áreas deforestadas, suelo expuesto, urbanización y minería.	5
No considerable	13	2,5	Cuerpos de agua.	-

Fuente: Elaboración propia, basado en los datos de la CONAF y de Ross 2012.

**Figura 12:** Niveles de fragilidad ambiental según sus usos de suelo/cobertura vegetal.



Fuente: elaboración propia según datos espaciales del IDE.

#### 4.1.4 Factor de precipitación

Con respecto a las lluvias de la comuna, los índices de precipitación comunal se encuentran entre valores que oscilan en los 581,78 mm/año y los 664 mm/año (Figura 13), obteniendo el promedio de esta que es 652 mm/año, por lo tanto, la clase de fragilidad ambiental según las precipitaciones es media en un sector de la comuna y también hay una zona que presenta niveles de fragilidad fuerte (estos niveles se encuentran en las pendientes mayores). En la Tabla 14 se podrá observar las características de esta clase de fragilidad ambiental.

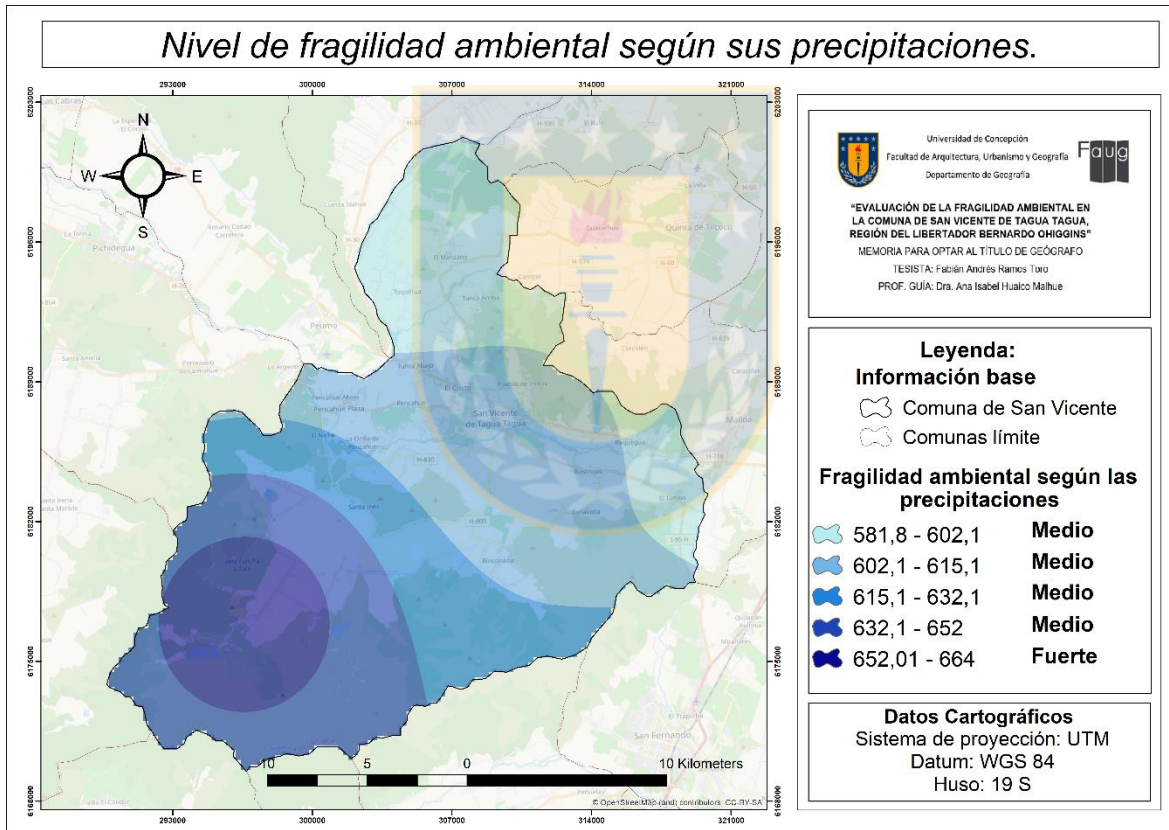


**Tabla 14:** Clasificación de precipitación según la adaptación al método de Ross 2012.

Precipitación media	Clase de fragilidad	Valor
Situación con precipitaciones anuales en meses de invierno con volúmenes que se encuentren entre 555 mm/año hasta 652 mm/año.	Medio	3
Situación con periodos de lluvia fuerte en meses de invierno, observando una gran cantidad de lluvia caída siendo valores mayores a 652 mm/año hasta 749 mm/año.	Fuerte	4

Fuente: elaboración propia según los datos de precipitaciones de la comuna.

**Figura 13:** Precipitaciones en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua.



Fuente: elaboración propia basado en los datos de precipitaciones de la comuna.

## 4.2 Zonificación de la fragilidad ambiental potencial y emergente

### Fragilidad ambiental potencial

Para evaluar la fragilidad ambiental potencial, se estudia la interrelación entre los factores naturales (pendiente, suelos y precipitaciones), en la Tabla 15 y en la Figura 14 se aprecian los resultados obtenidos. De esta forma hay una predominancia de la clase de fragilidad ambiental muy débil abarcando 178,54 Km<sup>2</sup> que corresponde a un 37,46% de la superficie de la comuna, estas áreas corresponden a zonas con pendientes entre 0° a 6° de inclinación, suelos con una clase agrológica entre la clase I y la clase III, en cuanto al factor de precipitaciones es medio, abarcando desde los 581 mm/año hasta los 632 mm/año.

Las áreas con fragilidad ambiental potencial débil ocupan una superficie de 93,01 Km<sup>2</sup> o un 19,51% de la comuna, al igual que la clase anterior, las pendientes que se encuentran en el área débil de la comuna tienden a ser pendientes bajas (0° a 12° de inclinación), en la clasificación de suelos se observan zonas con clases agrológicas desde la II hasta la clase V, en cuanto a las precipitaciones del sector son medias y fuertes ya que van desde los 615 mm/año hasta los 664 mm/año.

Las áreas con una fragilidad ambiental potencial *media*, se encuentran en 74,2 km<sup>2</sup> o un 15,57% del área de estudio, las pendientes que se hayan en esta fragilidad potencial abarcan desde los 12° hasta un 30° de inclinación, la clase agrológica que se observan son las clases VI y la clase VII, en cuanto a las precipitaciones van desde los 581 mm/año hasta los 663 mm/año, siendo de clase media y clase fuerte presentando una distribución en toda la comuna.

La fragilidad ambiental potencial *fuerte* posee una superficie de 63,46 km<sup>2</sup> o un 13,31% de la superficie de la comuna, presenta pendientes que van desde los 20% superando los 30° de inclinación, en cuanto a las clases agrológicas incluyen a la clase VI, clase VII y la clase VIII, las precipitaciones en estas áreas (fuerte y muy fuerte) van desde los 581 mm/año y los 664 mm/año.

La fragilidad ambiental potencial muy *fuerte* tiene una superficie de 67,34 km<sup>2</sup> o un 14,13% de la superficie de la comuna, posee pendientes que van desde los 20° superando los 30° de inclinación, en cuanto a las clases agrológicas incluyen a la

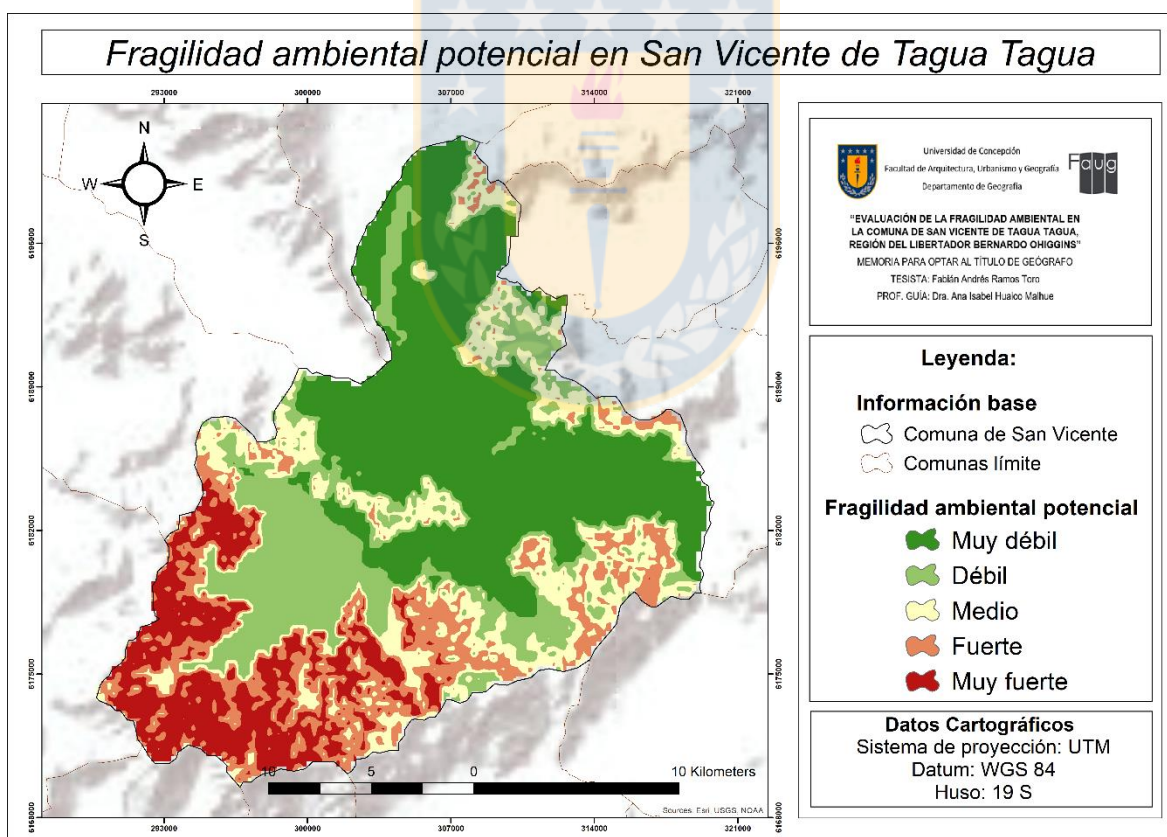
clase VI, clase VII y la clase VIII, las precipitaciones en estas áreas van desde los 632 mm/año y los 664 mm/año.

**Tabla 15:** Clases de fragilidad ambiental potencial en San Vicente de Tagua Tagua.

Clase de fragilidad potencial	Superficie en km2	Porcentaje (%)
Muy débil	178,54	37,46
Débil	93,01	19,51
Media	74,2	15,57
Fuerte	63,46	13,31
Muy fuerte	67,34	14,13

Fuente: Elaboración propia

**Figura 14:** Fragilidad ambiental potencial en San Vicente de Tagua Tagua.



Fuente: elaboración propia.



## **Fragilidad Ambiental Emergente**

La fragilidad ambiental emergente, es el producto de las interrelaciones entre los factores naturales y antrópicos, por lo que, a través de la superposición ponderada de los resultados de la fragilidad potencial y los usos de suelo, se obtiene una cartografía del impacto de estas actividades sobre los componentes del medio biofísico.

La categoría de fragilidad ambiental emergente muy débil posee una superficie de 128,51 km<sup>2</sup>, lo que equivale a un 27,06% de la superficie de la comuna, las áreas con una fragilidad muy débil se ubican principalmente en zonas con una fragilidad ambiental potencial muy débil y débil, junto con usos de suelo con niveles muy débil, débil y medio de cobertura.

Los niveles de fragilidad ambiental emergente débil poseen una superficie de 102,32 km<sup>2</sup> lo que equivale a un 21,54% de la comuna, las principales características que se muestran es que en relación con la fragilidad ambiental potencial se encuentra en zonas con índices muy débiles, débiles y medios, los usos de suelo en estas áreas abarcan todas las clases de protección (desde clases muy débiles hasta clases muy fuertes)

Las clases de fragilidad ambiental emergente media, es la segunda con mayor superficie en la comuna con 124,65 km<sup>2</sup> lo que es equivalente a un 21,54% de la superficie de la comuna, las principales características en relación con la fragilidad ambiental potencial se destacan por estar en niveles débiles, fuertes y muy fuertes (variando en los grados de fragilidad), en cuanto a la cobertura del suelo van desde clases débiles, medias, fuertes y muy fuertes.

La clase de fragilidad emergente con una menor superficie es la fuerte, presentando una superficie de 59,35 km<sup>2</sup> o así mismo un 12,49% de la comuna, se ubican en zonas con una fragilidad ambiental potencial débil, media y fuerte, los niveles de cobertura vegetal abarcan zonas con usos de suelo con una cobertura muy débil, débil, media y fuertes.

Por ultimo las áreas con una fragilidad ambiental emergente muy fuerte, presentan un área de 59,9 km<sup>2</sup> o un 12,63% de San Vicente de Tagua Tagua, sus principales características es que se ubican en niveles de fragilidad ambiental potencial fuerte

y muy fuertes, en el ambiente de usos de suelo son zonas con niveles débiles y muy débiles.

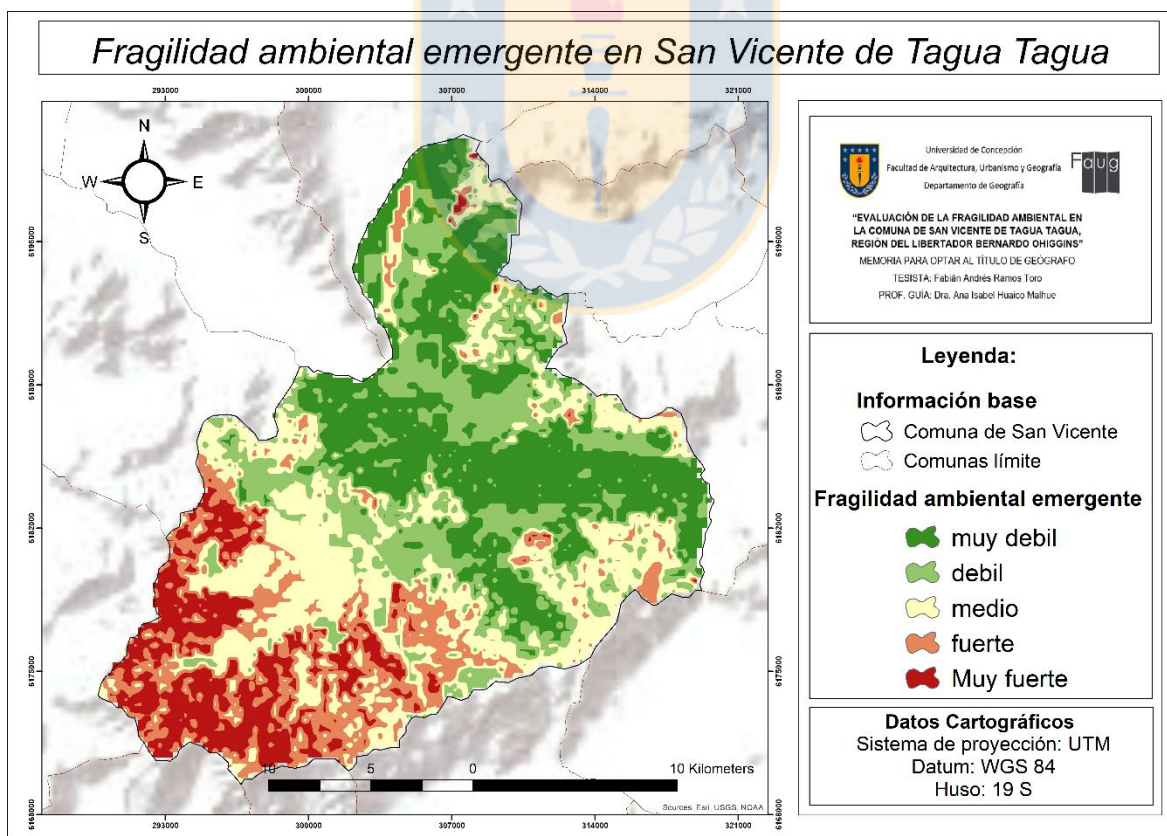
En la Tabla 16 se puede observar la superficie de fragilidad ambiental y en la Figura 15 se puede observar las áreas que esta abarca.

**Tabla 16:** Clases de fragilidad ambiental emergente en San Vicente de Tagua Tagua.

Clase de fragilidad Emergente	Superficie en km2	Porcentaje (%)
Muy débil	128,51	27,06
Débil	102,32	21,54
Media	124,65	26,25
Fuerte	59,35	12,49
Muy fuerte	59,9	12,63

Fuente: elaboración propia.

**Figura 15:** Fragilidad ambiental emergente en San Vicente de Tagua Tagua.

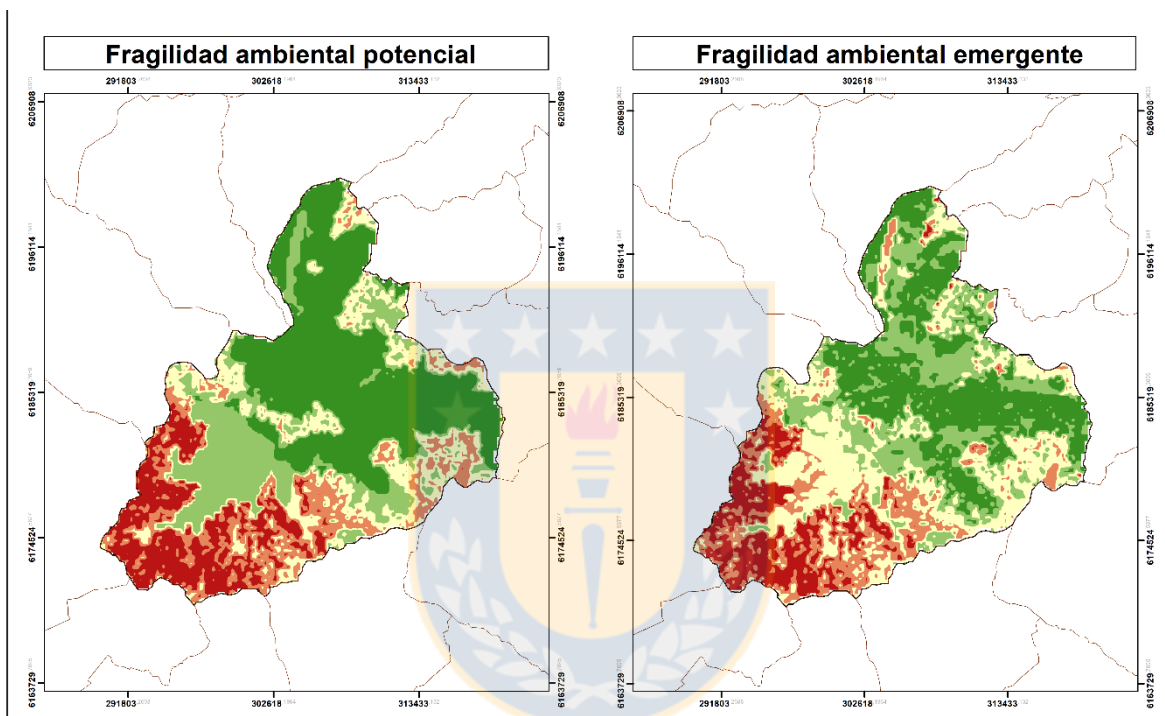


Fuente: elaboración propia.

### 4.3 Análisis comparativo entre fragilidad ambiental potencial y emergente.

La comparación que se aprecia entre las dos fragilidades ambientales tiende a presentar características similares, aunque gracias a los usos de suelo tienden a cambiar estas características, a continuación, se mostraran las principales diferencias entre estas fragilidades ambientales potencial y emergente. (figura 16)

Figura 16: Comparación entre las dos fragilidades ambientales.



Fuente: elaboración propia

La fragilidad ambiental potencial muy débil se caracteriza por poseer una superficie de 178,54 Km<sup>2</sup> producto de los factores naturales (pendientes nulas o bajas, en clases agrológicas entre la clase I y la clase III, en cuanto al factor de precipitaciones se encuentra en zona media), mientras que la fragilidad ambiental emergente muy débil una superficie de 128,51Km<sup>2</sup>, se ve reducida al compararla con la fragilidad ambiental potencial debido a la presencia de usos de suelo con niveles muy débil, débil, medio, fuerte y muy fuertes de cobertura, ya que la comuna está intervenida con arbustos, pastos en buen estado, cultivos agrícolas (ciclo corto y ciclo largo) y áreas urbanas.

La fragilidad ambiental potencial débil presenta una superficie de 93,01 Km<sup>2</sup> producto de los factores naturales (que van desde pendientes bajas que van desde los 0° hasta los 12° de inclinación, en clases agrológicas que van desde la II hasta la clase V, en cuanto a precipitaciones van desde medias a fuerte), mientras que la fragilidad ambiental emergente débil tiene una superficie de 102,32 Km<sup>2</sup>, aumenta los niveles en comparación con la fragilidad potencial debido a los usos de suelo que presenta la comuna, esto hace que ciertas clases de fragilidad ambiental potencial se vean reducidas por la protección que brinda los usos de suelo.

La fragilidad ambiental potencial media presenta una superficie de 74,2 Km<sup>2</sup> producto de los factores naturales (pendientes desde los 12° hasta los 30° de inclinación, clases agrológicas entre VI y VII, en cuanto a las precipitaciones desde zonas medias y fuertes), mientras que la fragilidad ambiental emergente 124,65 Km<sup>2</sup> lo que muestra una gran expansión de estos niveles de susceptibilidad producto de la cobertura del suelo que va desde la clase débil, medio, fuerte y muy fuerte (Arbustos naturales, cultivos de ciclo largo, cultivos de ciclo corto, áreas deforestadas, suelo expuesto y urbanización), lo cual muestra que la intervención antrópica afecta a los sistemas naturales en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua.

La fragilidad ambiental potencial fuerte, presenta una superficie de 63,46 Km<sup>2</sup> producto de sus factores naturales (pendientes desde los 20° hasta superar los 30° de inclinación, clases agrológicas incluyen las clases VI, las clases VII y las clases VIII, las precipitaciones desde las zonas medias y fuertes), mientras que la superficie de fragilidad ambiental emergente es de 59,35 Km<sup>2</sup>, siendo la que posee una menor área en la comuna en comparación con las otras fragilidades, esta se ve reducida gracias a los usos de suelo con una cobertura muy débil, débil, media y fuertes de cobertura de arbustos naturales, cultivos de ciclo largo, pastos degradados, cultivos de ciclo corto y silvicultura.

La fragilidad ambiental potencial muy fuerte, presenta superficies de 67,34 Km<sup>2</sup> producto de factores naturales con características muy fuertes (pendientes desde los 20° hasta superar los 30° de inclinación, clases agrológicas desde la clase VI, la

clase VII y la clase VIII, mientras que las precipitaciones van desde los 615 mm/año hasta los 663 mm/año), mientras que la fragilidad ambiental emergente presenta un área de 59,9 Km<sup>2</sup>, la disminución entre estas dos fragilidades, se debe a que los usos de suelo presentan altos niveles de protección, lo que se ve reflejado en bosques nativos, arbustos naturales y pastos en buen estado (clasificados con una clase de fragilidad muy débil y débil respectivamente). Estas diferencias de superficie se observan en la Tabla 17.

**Tabla 17:** Comparación entre la superficie de la fragilidad ambiental potencial y la emergente en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua.

Clase de fragilidad ambiental	Fragilidad ambiental potencial	Fragilidad ambiental emergente
Muy débil	178,54 Km <sup>2</sup>	128,51Km <sup>2</sup>
Débil	93,01 Km <sup>2</sup>	102,32 Km <sup>2</sup>
Media	74,2 Km <sup>2</sup>	124,65 Km <sup>2</sup>
Fuerte	63,46 Km <sup>2</sup>	59,35 Km <sup>2</sup>
Muy fuerte	67,34 Km <sup>2</sup>	59,9 Km <sup>2</sup>

Fuente: elaboración propia

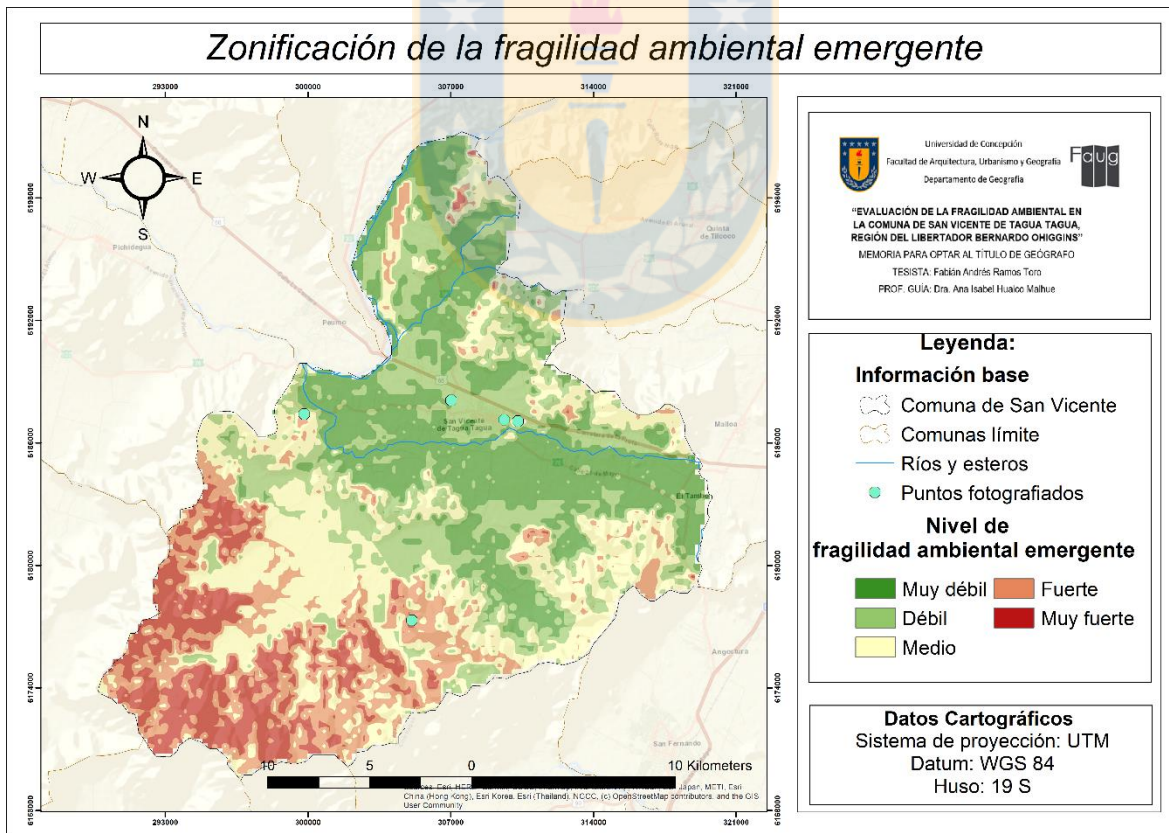


#### 4.4 Recomendaciones:

A raíz del estudio de la fragilidad ambiental, se observan distintos niveles de fragilidad ambiental en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua, se recomienda observar la zonificación derivada de este trabajo, ya que permite prevenir procesos, tales como la erosión que puede ser un problema si se cambia el uso de suelo. Es así como se realizó una cartografía con la fragilidad ambiental emergente (debido a que incluye los usos de suelo) de la comuna de San Vicente de Tagua Tagua, con sus respectivas calles y avenidas para tener una mejor localización de los sectores (Figura 16).

Como principal recomendación es que se realice un monitoreo de la comuna para ver los cambios a futuro en sus índices de fragilidad ambiental, teniendo un catastro de estos y ver si se ha reducido o aumentado en la comuna

Figura 17: Zonificación de la fragilidad ambiental emergente.



Fuente: elaboración propia.

Además, que se fotografió ciertas zonas con distintos niveles de fragilidad ambiental empezando por las clases muy débiles, débiles, medias, fuertes y muy fuertes. Mostrando las distintas características que presentan estos lugares y algunas recomendaciones para poder reducir el fenómeno de la fragilidad ambiental.

### **Fragilidad ambiental muy débil:**

La fragilidad ambiental muy débil, se vio reflejada en varias partes de San Vicente de Tagua Tagua, presentando pendientes nulas o bajas, con usos de suelo que no afectaban de gran medida a al terreno y además de presentar zonas que son ideales para la agricultura.

Para las áreas presentan una fragilidad ambiental muy débil, se sugiere educar e informar sobre las características que estos suelos poseen a la comunidad y a los tomadores de decisiones, de tal forma priorizar esta área, por ejemplo, para el uso agrícola sobre el urbano.

En la Figura 18 se presenta un lugar con niveles muy débiles de fragilidad ambiental que se encuentra en la calle “El Cristo-Pencahue”.

**Figura 18: Fotografía de paisaje con niveles muy débiles de fragilidad ambiental.**



Fuente: elaboración propia.



### **Fragilidad ambiental débil:**

La fragilidad ambiental débil, se caracterizó por presentar pendientes nulas o bajas, con usos de suelo que son propicios para la agricultura, con bajos niveles de erosión y con uso de suelo que no presentan una amenaza para las características de los suelos.

Para estas zonas se recomienda algo similar a los suelos con fragilidad muy débil, con respecto a informar a la comunidad sobre estos suelos, ya que es importante concientizar a la población para que resguarden las características ambientales y no aumenten su fragilidad.

En la Figura 19 se puede observar un ejemplo de suelos con una fragilidad ambiental débil, ubicada en San Vicente de Tagua Tagua específicamente en la calle “Carlos Walker Martínez”

**Figura 19:** Fotografía de paisaje con un nivel débil de fragilidad ambiental.



Fuente: elaboración propia.

### **Fragilidad ambiental media:**

La clasificación media, presenta pendientes medias (no altas y no tan bajas), áreas que se encuentran en una transición entre los niveles bajos y los niveles altos de fragilidad ambiental, son zonas que con un cambio pueden aumentar sus niveles de fragilidad ambiental.

Para las zonas que presentan una fragilidad ambiental media, se recomienda que se dé a estos lugares un uso sustentable (por ejemplo, permitir que se cambie el uso de suelo, pero que se cuenten con planes de manejo de suelo).

En la Figura 20 se puede observar un ejemplo de suelos con una fragilidad ambiental media, ubicada en San Vicente de Tagua Tagua específicamente en la calle “Avenida Central”

**Figura 20** Fotografía de paisaje con un nivel medio de fragilidad ambiental.



Fuente: elaboración propia.

### **Fragilidad ambiental emergente fuerte:**

La clasificación fuerte de la fragilidad ambiental se ubicó principalmente en áreas con grandes pendientes, que poseen cobertura vegetal permanente, ciertos suelos pantanosos y/o quebradizos, siendo zonas no aptas para la agricultura.

La recomendación que se hace para estos tipos de suelo con fragilidad ambiental fuerte es crear zonas de recuperación y que no se utilicen para la agricultura intensiva ni la silvicultura, esto es debido a la gran erosión que ya poseen, se propone implementar la plantación de ciertas especies de árboles nativos para no aumentar los niveles de fragilidad ambiental y evitar la realización de actividades recreativas de alto impacto como lo es andar en motocicleta.

En la Figura 21 se puede observar un ejemplo de fragilidad ambiental fuerte, ubicada en el cerro “El Niche” perteneciente a la comuna estudiada.

**Figura 21:** Fotografía de paisaje con un nivel fuerte de fragilidad ambiental.



Fuente: elaboración propia.



### **Fragilidad ambiental emergente muy fuerte:**

Las zonas con una fragilidad ambiental muy fuerte se ubicaron principalmente en áreas con grandes pendientes, que poseen una cobertura vegetal permanente, con altos niveles de precipitación y/o nieve, con grandes alturas sobre el nivel del mar y con suelo no aptos para la agricultura.

Para las que presentan una fragilidad ambiental muy fuerte, se recomienda crear una zona de conservación para poder mantener sus valores ambientales, para poder proteger estos sistemas naturales, restringiendo el cambio de usos de suelo.

En la Figura 22 se puede observar un ejemplo de fragilidad ambiental muy fuerte en la comuna de San Vicente, esta corresponde a una imagen capturada en el cerro “La sepultura”.

**Figura 22:** Fotografía de paisaje con un nivel muy fuerte de fragilidad ambiental.



Fuente: elaboración propia.

## **CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

### **5.1 Discusión**

En el área de estudio el factor de las pendientes tiene una relación directa con los mayores índices de fragilidad ambiental, esto es debido a que las zonas que poseen una clase de fragilidad fuerte a muy fuerte se encuentran en zonas montañosas, esto se aprecia en el área suroeste de la comuna de San Vicente de Tagua Tagua. En este contexto los resultados son similares a las investigaciones de Santos (2014), de Cruz (2017), de Campos (2019) y de Silva (2020) que mencionan que en las zonas de pendientes pronunciadas predominan los altos niveles de fragilidad ambiental. Valle (2016) en su investigación realizada en la cuenca del río Aldeia Velha (estado Rio de Janeiro, Brasil) menciona que las áreas de relieve montañoso fueron las que presentaron valores fuertes y muy fuertes, aunque presenten una cubierta vegetal permanente, y Bahr (2012) en su estudio realizado en la cuenca hidrográfica Arroio Uvaranal (estado de Paraná, Brasil) menciona que, aunque tengan un alta cubierta vegetal igual son zonas susceptibles a movimientos de remoción en masa (caídas y desplazamientos de tierra).

La fragilidad ambiental asociada al factor suelo indicó que los mayores índices están localizados en los cerros o montañas en el área de estudio (las cuales corresponden a las clases agrológicas VI y VII) siendo suelos muy susceptibles a la erosión, pero con vegetación permanente. Los índices de las zonas agrológicas se asemejaron a los factores impuestos por Ross (2012) los cuales presentan un valor de clase de fragilidad fuerte en Brasil (correspondiente a las clases agrológicas VI y VII), presentando similitudes ya que “es propicia para la ocurrencia de procesos erosivos por acción de escorrentías superficiales, lo que corresponde a su clasificación como altamente vulnerable a los agentes erosivos” (Cola Valle, 2016).

Por otro lado, igual se apreciaron zonas de la comuna que presentaron distintas clases agrológicas, en las que se encuentra los suelos que tienen una clasificación de muy baja, baja y media la que según Bahr (2012) esta clase de suelo se caracteriza por una gran profundidad y un suelo bien drenado; Maganhotto (2009) los describe con un muy bajo índice de fragilidad ambiental.

En cuanto al factor de precipitaciones de la comuna de San Vicente de Tagua Tagua, el promedio total de las lluvias fue de 652 mm/año, este factor según los datos propuestos en la adaptación de la metodología (son de una fragilidad ambiental media, las lluvias tienen una gran relevancia en este método debido a la intensidad, a su volumen y a la duración que posean, además de poseer gran importancia en nuestros días debido a que Chile es uno de los países más vulnerables al cambio climático. Según Camino (2014) existe un aumento de temperatura y disminución de las precipitaciones, esto afectando directamente al área agrícola, por lo que Navea (2021) en una investigación realizada en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, dice que el sector agrícola es más sensible a los efectos del cambio climático, debido al alza de las temperaturas, la disminución del recurso hídrico, la incidencia de plagas y la pérdida de la idoneidad de zonas ligadas a cierto tipo de cultivos.

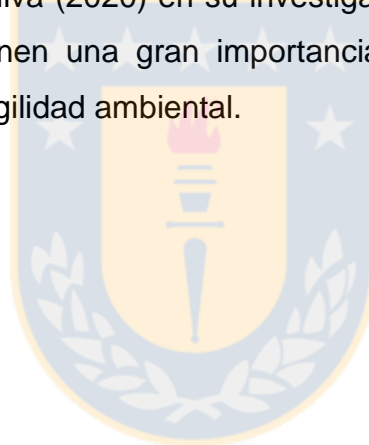
La cobertura vegetal es la defensa natural que posee el terreno en contra de los procesos erosivos, la cual ejerce la función de estabilizador, en terrenos empinados (Bertoni, 2008), el área de estudio se caracteriza por tener en mayor porcentaje de uso de suelo bosques y bosque nativo (37,6% de la superficie de la comuna), el cual observando los parámetros impuestos por Ross (2012) es una gran protección para el suelo, esto concuerda con Bahr (2012) que dice que la cobertura de bosques posee un mayor grado de protección debido a que evita de una mejor manera el impacto de las lluvias protegiendo el suelo y para Silva (2012) los bosques son la cobertura vegetal que posee una mayor protección hacia el suelo.

Mientras que las zonas con una menor cobertura vegetal solo poseen un 3,4% de la superficie de la comuna presentando coberturas de suelo inadecuadas mostrando un mayor índice de fragilidad ambiental ya que no se reduce el impacto de la lluvia sobre el suelo y no se disminuye la velocidad de escorrentía, según Da Silva Anjinho (2021) se puede entender que la reducción o eliminación de la vegetación natural puede conducir a la erosión y sedimentación.

La combinación de los factores naturales fue lo que posibilitó obtener la fragilidad ambiental potencial siguiendo el modelo propuesto por Ross (2012), los valores

altos y muy altos de la comuna se encuentran principalmente en la zona suroeste donde se encuentran las mayores pendientes de San Vicente de Tagua Tagua (partiendo desde los 12 grados hasta superar los 30°), siendo suelos con una mayor incidencia de lluvias. Según Anguiló (2014) caracteriza estos suelos como no aptos para la agricultura, debido a sus grandes pendientes siendo suelos pedregosos y áridos.

En comparación entre la fragilidad ambiental potencial y la fragilidad ambiental emergente, varios autores le dan una gran importancia a la cobertura de suelo ya que al existir vegetación esta reduce la fragilidad ambiental; este es el caso de Silva (2012) el cual resalta que el parámetro de uso del suelo es el más importante para determinar los cambios en el porcentaje de áreas con mediana o más fragilidad del paisaje, mientras que Da Silva (2020) en su investigación realizada en menciona que los usos de suelo tienen una gran importancia debido a que, en buenas condiciones se redujo la fragilidad ambiental.





## 5.2 Conclusiones

En la presente investigación se identificaron las distintas clases de fragilidad ambiental en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua. Los niveles de fragilidad ambiental potencial y emergente, mostraron clases muy débiles y débiles en sectores llano o con poca pendiente (0° hasta los 12° de inclinación) mientras que los sectores montañosos presentan niveles más elevados de fragilidad ambiental (clases fuertes y muy fuertes), estos presentan pendientes desde los 20° superando los 30° de inclinación, siendo comprobada la hipótesis del trabajo.

La metodología propuesta por Ross (2012) y por Da Silva Anjinho (2021) debió ser modificada en esta investigación debido a que no se encontraban algunos antecedentes tal cual lo presentaba el modelo, como por ejemplo algunos datos de suelo, de esta forma se logro homologar gracias al estudio de las clases agrológicas de la comuna. Otro aspecto que se tuvo que adaptar del modelo fueron los datos de precipitaciones debido a que el modelo original fue pensado e implementado en las zonas con climas tropicales lluviosos, por lo cual se tuvo que adecuar a un clima mediterráneo. De esta forma se concluye que el modelo es adaptable en cuanto a sus indicadores.

Los estudios de fragilidad ambiental con el modelo de Ross adaptado como en este trabajo son un buen método para la planificación y para la toma de decisiones, además de que los datos se encuentran disponibles para la mayoría de las comunas del país.

Para los resultados de las fragilidad ambiental potencial y fragilidad potencial emergente:

- Para el análisis de la fragilidad ambiental potencial, la cual fue obtenida gracias a los factores naturales de la comuna (suelos, precipitaciones y pendientes) los resultados entre estos factores mostraron que en la comuna hay una predominancia de fragilidad ambiental muy débil, la cual tiene una superficie del 37,46% de la comuna siendo el resultado de que en estas zonas no hay pendientes muy fuertes, poca cantidad de precipitaciones en el área, además de

que las clases agrológicas eran bajas, siendo así una comuna con bajos niveles de fragilidad ambiental. Las otras clases de fragilidad ambiental potencial que se pueden observar en la comuna seguidas en orden de superficie: Muy débil, débil, media, muy fuerte y fuerte.

- En el caso de la fragilidad ambiental emergente, en la cual nuevamente la clase más frecuente fue fragilidad ambiental muy débil, la cual sigue teniendo la predominancia en la comuna con un 27,06% de la superficie, esto siendo producto de los usos de suelo empleados en la comuna, otras clases de fragilidad ambiental emergente que se encuentran en la comuna según los resultados en orden de superficie es: muy débil, media, débil, muy fuerte y fuerte.

La principal similitud en los resultados de la aplicación de ambas metodologías de fragilidades ambientales es que ambas presentan valores muy altos en zonas montañosas, las cuales debido al valor que poseen las pendientes, los suelos y la cobertura vegetal hace que sean zonas bien frágiles ambientalmente.

La gran importancia que tiene la cubierta vegetal en los índices de fragilidad ambiental es que es la que les da estabilidad a ciertas zonas de la comuna, destacándose la reducción de fragilidad ambiental fuerte y muy fuerte en ciertas zonas de San Vicente de Tagua Tagua, siendo unos de los factores que hace posible el análisis de la fragilidad ambiental emergente.

## CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA

- Adami, S. F., Coelho, R. M., Chiba, M. K., & de Moraes, J. F. L. (2012). Environmental fragility and susceptibility mapping using geographic information systems: applications on Ribeirão do Pinhal watershed (Limeira, State of São Paulo. *Acta Scientiarum. Technology*, 34(4), 433-440.
- Aguayo, M., Pauchard, A., Azócar, G., & Parra, O. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX: Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista chilena de historia natural*, 82(3), 361-374.
- Aguiló Alonso, M., Albaladejo Montoso, J., Aramburu Maqua, M. P., Carrasco González, R. M., Castillo Sánchez, V., Ceñal González-Fierro, M. A., ... & Valero Huete, F. (2014). Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología.
- Andrade, L. H. (2009). Fragilidad ambiental de la cuenca hídrica del Lago Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.
- Andrade, M. I., Pérez Ballari, A., Plot, B., & Anzoátegui, M. (2017). Crecimiento urbano sobre áreas de fragilidad ambiental. *XVI EGAL*, 26.
- ArcGIS. (s.f.). Suma ponderada. enero 22, 2022, de ArcGIS Sitio web: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/weighted-sum.htm>
- Arias, P., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R., Krinner, G., Marotzke, J., ... & Zickfeld, K. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Technical Summary.
- BAHR, G., & CARVALHO, S. (2012). IDENTIFICAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO UVARANAL, COMO SUBSÍDIO AO PROJETO DE EXPANSÃO URBANA DE TELÊMACO BORBA – PR. *Raega-OEspaçoGeográficoemAnálise*, 26.
- Bascuñán Chaparro, S. (2010). Relación Entre la Erosión Producida por un Flujo Superficial en Suelos Finos y Algunas Propiedades de Estos. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103881>
- Benavidez-Silva, C., Jensen, M., & Pliscoff, P. (2021). Future Scenarios for Land Use in Chile: Identifying Drivers of Change and Impacts over Protected Area System. *Land*, 10(4), 408. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/land10040408>
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. 4. ed. São Paulo: Ícone, 1999.

-Biblioteca del Congreso Nacional de Chile [BCN]. Estadísticas regionales. PIB Regional por sector económico. <https://www.bcn.cl/siit/estadisticasterritoriales/tema?id=74>

-BRANDÃO, A. M. P. M. Clima urbano e enchentes na cidade do Rio de Janeiro. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (orgs.). Impactos ambientais urbanos no Brasil. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 5. ed., 2009, p. 47 – 110.

- CALIJURI, M. L., ALVES, J. E. M., BAPTISTA, A. C., SANTIAGO, A. D. F., & LOURES, S. S. P. (2007). Proposta metodológica para geração da carta de fragilidade ambiental, utilizando lógica fuzzy e combinação linear ponderada. *Proceedings of XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis, Brasil*, 3311-3318.

-Camino, E. R., Ruggeroni, J. R. P., & Hernández, F. H. (2014). Quinto informe de evaluación del IPCC: Bases físicas. *Revista Tiempo y Clima*, 5(43).

- Casanova, Manuel, Ticona, Berthin, Salazar, Osvaldo, Gratacós, Eduardo, Pfeiffer, Marco, Ávila, Gonzalo, Tapia, Yasna, Seguel, Oscar, & Sabaini, Carlo. (2020). Physical assessment of a Mollisol under agroecological management in the Quillota Valley, Mediterranean Central Chile. *International journal of agriculture and natural resources*, 47(3), 261-279. <https://dx.doi.org/10.7764/ijanr.v47i3.2290>

- Coheci, R. M., Ianos, I., Sarbu, C. N., Sorensen, A., Saghin, I., & Secareanu, G. (2019). Assessing environmental fragility in a mining area for specific spatial planning purposes. *Moravian Geographical Reports*.

- Crepani, E., Medeiros, J. D., Hernandez Filho, P., Florenzano, T. G., Duarte, V., & Barbosa, C. C. F. (2001). *Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial* (p. 124). São José dos Campos: Inpe.

-Da Silva Anjinho, P. (2021) Environmental fragility analysis in reservoir drainage basin land use planning: A Brazilian basin case study, *Land Use Policy*, Volume 100,2021,104946,ISSN02648377,<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104946>

-Da Silva, T. A., Duarte, M. L., Gato, L. C., & Guandique, M. E. G. (2020). Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do rio Candeias, RO. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 5(1), 058-068.

-Dalla Corte, Ana Paula, Klein Hentz, Ângela Maria, Doubrawa, Betina, & Sanquetta, Carlos Roberto. (2015). Environmental fragility of Iguaçu River watershed, Paraná, Brazil. *Bosque (Valdivia)*, 36(2), 287-297. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002015000200014>

- Devaraju, N., Bala, G., & Nemani, R. (2015). Modelling the influence of land-use changes on biophysical and biochemical interactions at regional and global scales. *Plant, cell & environment*, 38(9), 1931–1946. <https://doi.org/10.1111/pce.12488>
- Dellavedova, M. (2011). Guía metodológica para la elaboración de una evaluación de impacto ambiental. *La Plata*.
- Donha, A. G., Souza, L. C. D. P., & Sugamoto, M. L. (2006). Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10, 175-181.
- De Mesquita Oliveira, R. C., Lima, P. V. P. S., & Sousa, R. P. (2017). Gestão ambiental e gestão dos recursos hídricos no contexto do uso e ocupação do solo nos municípios. *Gestão & Regionalidade*, 33(97), 48-64.
- Dellavedova, M. (2011). Guía metodológica para la elaboración de una evaluación de impacto ambiental. *La Plata*.
- Duque Escobar, G., & Escobar P, C. E. (2017). Geomecánica. Biblioteca Digital Universidad Nacional de Colombia
- Ellies, A., Ramírez, C., & Mac Donald, R. (1993). Cambios en la porosidad de un suelo por efecto de su uso. *Turrialba Volumen 43*.
- García-Fayos, P. (2004). Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica.
- Gómez, D. (2003). La ordenación territorial: carácter, alcance y contenido. In *Ponencia presentada en el II Congreso Internacional de Ordenación del Territorio, Toluca, México* (pp. 26-28).
- Heald, C. L., & Spracklen, D. V. (2015). Land use change impacts on air quality and climate. *Chemical reviews*, 115(10), 4476-4496.
- Huang, C., Gascuel-Odoux, C., & Cros-Cayot, S. (2002). *Hillslope topographic and hydrologic effects on overland flow and erosion*. *CATENA*, 46(2-3), 177–188. doi:10.1016/s0341-8162(01)00165-5
- Hurtt, G. C., Chini, L., Sahajpal, R., Frohling, S., Bodirsky, B. L., Calvin, K., ... & Zhang, X. (2020). Harmonization of global land use change and management for the period 850–2100 (LUH2) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 13(11), 5425-5464.
- Hussain, F., Nabi, G., & Wu, R. S. (2021). Spatiotemporal Rainfall Distribution of Soan River Basin, Pothwar Region, Pakistan. *Advances in Meteorology*, 2021.
- INE (2017). Síntesis resultados Censo 2017. Recuperado el 03 diciembre 2021 de <https://www.ine.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda/poblacion-y-vivienda>

- Jackson, D., Aspillaga, E., Rodríguez, X. P., Jackson, D., Santana, F., & Méndez, C. (2012). Las ocupaciones humanas del sitio arqueológico de Santa Inés, Laguna de Tagua Tagua, Chile central. *Revista Chilena de Antropología*, (26).
- Jaramillo, D. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. Enero 26, 2021, de Universidad nacional de Colombia Sitioweb: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/70085>.
- Kawakubo, F., Morato, R.G., Campos, K.C., Luchiari, A., Luciano, J., Ross, S., & Prestes, L. (2005). Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento.
- Kysely, J. (2010). Coverage probability of bootstrap confidence intervals in heavy-tailed frequency models, with application to precipitation data. *Theoretical and Applied Climatology*, 101(3), 345-361.
- López, S., & Sierra, R. (2010). Agricultural change in the Pastaza River Basin: A spatially explicit model of native Amazonian cultivation. *Applied Geography*, 30(3), 355-369.
- Loyola, C. Hernández, E. (2013). Crecimiento del sector urbano en la comuna de San Vicente de Tagua Tagua. Enero 22, 2021, de Universidad del Bío-Bío. Escuela de Pedagogía en Historia y Geografía (Chile) Sitio web: <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/1360>.
- Maganhotto, R. F., Santos, L. J. C., & de Oliveira Filho, P. C. (2011). Análise da fragilidade ambiental como suporte ao planejamento do ecoturismo em unidades de conservação: estudo de caso Flona de Irati-PR. *Floresta*, 41(2).
- Mahowald, N. M., Randerson, J. T., Lindsay, K., Munoz, E., Doney, S. C., Lawrence, P., ... & Hoffman, F. M. (2017). Interactions between land use change and carbon cycle feedbacks. *Global Biogeochemical Cycles*, 31(1), 96-113.
- Manfré, L. A., Da Silva, A. M., Urban, R. C., & Rodgers, J. (2013). Environmental fragility evaluation and guidelines for environmental zoning: a study case on Ibiuna (the Southeastern Brazilian region). *Environmental Earth Sciences*, 69(3), 947-957
- Martins, T. I. S., & Rodrigues, S. C. (2012). The use of geotechnologies in the landscape fragility analysis of medium lower Araguari river basin, Brazil. *Investigaciones Geográficas*, (44), ág-3.
- Maza Asquet, C. (2007). Evaluación de Impactos Ambientales. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/120397>.
- Messias, C. G. (2012). Análise empírica de fragilidade ambiental utilizando técnicas de geoprocessamento: o caso da área de influência da hidrelétrica do Funil-MG. *Revista Geonorte*, 3(5), 112-125.



- Navea Barrera, J. (2021). Marco analítico para evaluación de seguridad alimentaria en contexto de cambio climático: Región del Libertador Bernardo O'Higgins como caso de estudio. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181599>
- Naveas, A.M., 1979. Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales-Corfo. Fragilidad de los Ecosistemas Naturales de Chile.
- ODEPA (2019). Región del Libertador Bernardo O'Higgins. Recuperado el 05 de diciembre 2021 de <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/07/OHiggins.pdf>
- Pizarro Tapia, M. R., Balocchi Contreras, F., Morales Calderón, C., Olivares Santelices, C., Valdés, R., & Vega, L. (2009). Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile.
- Ramos-Reyes, Rodimiro, Palomeque-De la Cruz, Miguel Ángel, Megía-Vera, Héctor Javier, & Landeros-Pascual, Daniel. (2021). Modelo del cambio de uso de suelo en el sistema lagunar Carmen-Pajonal-Machona, México. *Terra Latinoamericana*, 39, e587. Epub 05 de abril de 2021. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.587>
- Rodrigues, S. C., & de Souza, N. C. (2013). MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL NO TRECHO DE VAZÃO REDUZIDA DO RIO ARAGUARI (MG) UTILIZANDO TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO. *GEOUSP Espaço e Tempo (Online)*, 17(3), 129-142.
- Rojas Vilches, O. E. (2015). Cambios ambientales y dinámica de inundaciones fluviales en una cuenca costera del centro sur de Chile.
- Ross, J. L. S. (1994). Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. *Revista do departamento de geografia*, 8, 63-74.
- Ross, J. L. S. (2012). Landforms and environmental planning: Potentialities and Fragilities. *Revista do Departamento de Geografia*, 38-51.
- Santos, J. R. N., Junior, C. H. L. S., & Pereira, D. C. A. (2015) Zoneamento da fragilidade ambiental utilizando Lógica Fuzzy e Processo Analítico.
- Sarricolea Espinoza, P., Herrera Ossandón, M. y Meseguer Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146887>
- Seguel, O., Farías, E., Luzio, W., Casanova, M., Pino, I., Parada, A., Videla, X., & Nario, A. (2015). Propiedades físicas de suelo posterior al cambio de uso de bosque nativo a viña. *Agro Sur*, 43(2), 29-39. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2015.v43n2-05>



- Silva Martins, T., & Rodrigues, S. (2012). The use of geotechnologies in the landscape fragility analysis of medium lower Araguari river basin, Brazil. *Investigaciones Geográficas*, (44), Pág. 3-16. doi:10.5354/0719-5370.2013.26366
- Socorro García, M. Lamata Jiménez, T (2004). Consideraciones a tener en cuenta a la hora de utilizar el método de la suma ponderada.VIII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos,2004 Bilbao,pp 742-749
- Spröl, C., & Ross, J.L. (2006). ANÁLISE COMPARATIVA DA FRAGILIDADE AMBIENTAL COM APLICAÇÃO DE TRÊS MODELOS.
- Suárez, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. Colombia: Universidad industrial de Santander, Bucaramanga- Colombia.
- Tayupanta, J. R. (1993). *La erosión hídrica: proceso, factores y formas*. INIAP Archivo Historico.
- Terra, L.G., Schiavo, B.N., Borba, W.F., & Duarte, M.M. (2016). GEOPROCESSAMENTO ALGÉBRICO UTILIZADO NA CARACTERIZAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE SANTIAGO-RS.
- Tricart, J. (1977). Ecodinamica [ecologia, conservacao, meio ambiente. geomorfologia, Brasil].
- Turner, B. L., Lambin, E. F., & Reenberg, A. (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52), 20666-20671.
- Valle, Ivana Cola, Francelino, Márcio Rocha, & Pinheiro, Helena Saraiva Koenow. (2016). Mapeamento da Fragilidade Ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. *Floresta e Ambiente*, 23(2), 295-308. Epub April 01, 2016.<https://doi.org/10.1590/2179-8087.107714>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning* (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Yue, C., Ciais, P., Luyssaert, S., Li, W., McGrath, M.J., Chang, J., & Peng, S. (2017). Representing anthropogenic gross land use change, wood harvest and forest 1 age dynamics in a global vegetation model ORCHIDEE.