

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

DESARROLLO DE UN MODELO DE PRONÓSTICO DE SEQUÍAS PARA PROYECTOS DE REFORESTACIÓN CON ESPECIES FORESTALES CEDRO Y GAÑAL - APLICACIÓN PARA LA ZONA DE LLAVIUCO Y MAZÁN, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO PAUTE

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Ambiental

AUTORAS:

Erika Tatiana Arévalo Coello

CI: 0105770911

Mishel Andrea Palacios Ortiz

CI: 0104856497

DIRECTOR:

Ing. Rolando Enrique Céleri Alvear, PhD.

CI: 0602794406

TUTORA:

Ing. Andrea Paola Maza León

CI: 0302146121

CUENCA - ECUADOR

2017



RESUMEN

Las sequías son un fenómeno climático que tiene impacto regional sobre el desarrollo ambiental y socioeconómico. Actualmente, el gobierno del Ecuador fomenta programas de reforestación; sin embargo, si durante las primeras etapas de estos programas ocurren eventos de sequía, todo el proceso puede fracasar. Por esta razón, es importante estudiar los pronósticos de sequías para la planificación y gestión de proyectos de restauración. El objetivo del estudio es desarrollar un modelo de pronóstico de sequías para proyectos de reforestación con las especies: *Cedrela montana* y *Oreocallis grandiflora*. La zona de estudio fueron los bosques de Llaviuco y Mazán en el Parque Nacional el Cajas. El modelo se desarrolló mediante Cadenas de Markov. Para ello se utilizaron datos de lluvia de las estaciones pluviográficas Piscícola Chirimachay y Sayausí Matadero. A la vez se analizó la resistencia de las especies expuestas a cuatro intensidades de sequía: normal, moderada, severa y extrema. Posteriormente, se diseñó un sistema de alerta temprana a partir del pronóstico de sequía y la respuesta de las especies para la toma de decisiones en proyectos de restauración. Los resultados mostraron que: i) en la matriz de pronóstico de sequía, al ocurrir un evento extremo este se mantiene, ii) la germinación de las especies es menor y tardía en el evento extremo, iii) para las dos especies estudiadas, los semáforos indican que menos del 50% de las semillas germinan en condiciones de sequía extrema. Este estudio será útil para instituciones encargadas de programas de restauración y gestión ambiental.

Palabras clave: Sequía, Pronóstico, Cadenas de Markov, Especies nativas, Bosques, Andes.



ABSTRACT

Droughts are a climatological phenomenon that have an impact on the environmental and socioeconomic development of a region. Currently, the Ecuadorian national government promotes reforestation programs; however, if a drought event takes place during the first stages of the programs the whole process could fail. For this reason, it is important to do research on drought forecasting as to be able to plan and manage a well-suited reforestation program. The aim of this study is to develop a drought forecasting model for reforestation projects with species *Cedrela montana* and *Oreocallis grandiflora*. The study area was Llaviuco and Mazán forests at the El Cajas National Park. The model was developed using Markov chains. For this, rainfall data from the Piscícola Chirimachay and Sayausí Matadero pluviographic stations were used. At the same time, it was analyzed the resistance of the species exposed to four drought intensities: normal, moderate, severe and extreme. Subsequently, an early warning system based on both the drought forecast and the response of the species for decision-making in restoration projects was designed. The results showed that: i) based on the drought forecast matrix, when an extreme event occurs, the event remains throughout the whole process ii) in an extreme event, there is a belated germination process and a fewer number of germinated species, iii) for the two studied species, the traffic lights show that less than 50% of the seeds germinate in conditions of extreme drought. This study could be useful for institutions in charge of restoration and environmental management programs.

Keywords: Drought, Forecast, Markov Chains, Native species, Forests, Andes.



CONTENIDO

RESUMEN 2

ABSTRACT 3

1. INTRODUCCIÓN..... 15

 1.1 Antecedentes 16

 1.2 Justificación..... 17

OBJETIVOS 18

 Objetivo general 18

 Objetivos específicos 18

2. MARCO TEÓRICO..... 19

3. MATERIALES Y MÉTODOS 21

 3.1 Descripción del área de estudio 21

 3.2 Datos 22

 3.2.1 Datos Meteorológicos 22

 3.2.2 Datos biológicos..... 22

 3.2.2.1 Especies forestales 22

 3.3 Metodología..... 23

 3.3.1 Desarrollo de un modelo estocástico de pronóstico de sequías basado en cadenas de Markov. 25

 3.3.2 Análisis de la sensibilidad de dos especies forestales nativas *Cedrela montana* y *Oreocallis grandiflora* frente a cuatro tratamientos de sequía (normal, moderado, severo y extremo) 27

 3.3.2.1 Análisis estadístico..... 28

 3.3.3 Generación de un semáforo para identificar la probabilidad de éxito de un programa de reforestación. 28

 3.3.3.1 Categorización de umbrales de sequía 28

 3.3.3.2 Clasificación de los umbrales y desarrollo de la técnica del semáforo 28

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 29

 4.1 Modelo de pronóstico de sequías basado en Cadenas de Markov..... 29



4.2 Análisis de la sensibilidad de dos especies forestales nativas *Cedrela montana* y *Oreocallis grandiflora* frente a cuatro tratamientos de sequía (normal, moderado, severo y extremo)..... 31

4.2.1 Porcentaje y velocidad de germinación de *C. montana* 31

4.2.2 Porcentaje y velocidad de germinación de *O. grandiflora* 33

4.3 Generación de un semáforo para identificar la probabilidad de éxito de un programa de reforestación..... 35

5. CONCLUSIONES..... 37

6. RECOMENDACIONES 39

7. REFERENCIAS 40

ANEXOS

Anexo 1. Diagrama del experimento de especies forestales bajo un sistema de exclusión de lluvia 47

Anexo 2. Matriz de transición de categorías mensuales por año. 51

Anexo 3. Porcentajes de probabilidad de transición de categorías mensuales por año..... 52

Anexo 4. Prueba de germinación (Control) de dos especies forestales de acuerdo a los parámetros ISTA 2007. 54

Anexo 5. Semáforos para las especies *C. montana* y *O. grandiflora*, tratamientos de sequía analizados con respecto al control de laboratorio 55

Anexo 6. Pronósticos probabilísticos mensuales de sequía. 56

Anexo7. Porcentaje de germinación y coeficiente de velocidad de la especie *C. montana*..... 57

Anexo 8. Porcentaje de germinación y coeficiente de velocidad de la especie *O. grandiflora* 58



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del sistema de exclusión de lluvia y área de estudio bosques de Llaviuco y Mazán, Parque Nacional El Cajas (PNC). 22

Figura 2. Porcentaje de germinación de la especie *C. montana* bajo cuatro escenarios de sequía simulados de lluvia y un control en campo. Las letras a y b representan los grupos con diferencias significativas después de un test post hoc. 32

Figura 3. Porcentaje de germinación y coeficiente de velocidad de la especie *C. montana* bajo cuatro escenarios simulados de lluvia y un control en campo. cv, es el coeficiente de velocidad para cada tratamiento. 32

Figura 4. Porcentaje de germinación de la especie *O. grandiflora* bajo cuatro escenarios de sequía simulados de lluvia y un control en campo. Las letras a y b representan los grupos con diferencias significativas después de un test post hoc. 34

Figura 5. Porcentaje de germinación y coeficiente de velocidad de la especie *O. grandiflora* bajo cuatro escenarios simulados de lluvia y un control en campo. cv, es el coeficiente de velocidad para cada tratamiento. 34



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Categorización de los eventos de sequía de acuerdo a los percentiles.....	26
Tabla 2. Descripción de los estados y la acción recomendada en un sistema de semáforo para el manejo de especies forestales.	29
Tabla 3. Pronóstico probabilístico del mes siguiente. Categoría 0 (evento normal Percentil 50), categoría 1 (evento moderado Percentil 20), categoría 2 (evento severo Percentil 10), categoría 3 (evento extremo Percentil 5).	30
Tabla 4. Semáforo para la especie <i>C. montana</i> (tratamientos analizados con respecto al control de campo)	35
Tabla 5. Semáforo para identificar la probabilidad de éxito en la germinación de la especie <i>C. montana</i> en diferentes tratamientos de sequía. Verde $\geq 75\%$ Naranja $< 50\%$ y $\geq 25\%$ Amarillo $< 75\%$ y $\geq 50\%$	35
Tabla 6. Semáforo para la especie <i>O. grandiflora</i> (tratamientos analizados con respecto al control de campo)	36
Tabla 7. Semáforo para identificar la probabilidad de éxito en la germinación de la especie <i>O. grandiflora</i> en diferentes tratamientos de sequía. Verde $\geq 75\%$ Naranja $< 50\%$ y $\geq 25\%$	36

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Erika Tatiana Arévalo Coello en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "DESARROLLO DE UN MODELO DE PRONÓSTICO DE SEQUÍAS PARA PROYECTOS DE REFORESTACIÓN CON ESPECIES FORESTALES CEDRO Y GAÑAL - APLICACIÓN PARA LA ZONA DE LLAVIUCO Y MAZÁN, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO PAUTE", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 8 de Diciembre de 2017



Erika Tatiana Arévalo Coello

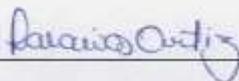
C.I: 0105770911

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Mishel Andrea Palacios Ortiz, en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "DESARROLLO DE UN MODELO DE PRONÓSTICO DE SEQUÍAS PARA PROYECTOS DE REFORESTACIÓN CON ESPECIES FORESTALES CEDRO Y GAÑAL - APLICACIÓN PARA LA ZONA DE LLAVIUCO Y MAZÁN, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO PAUTE", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 8 de Diciembre de 2017



Mishel Andrea Palacios Ortiz

C.I: 0104856497

Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Erika Tatiana Arévalo Coello, autora del trabajo de titulación "DESARROLLO DE UN MODELO DE PRONÓSTICO DE SEQUÍAS PARA PROYECTOS DE REFORESTACIÓN CON ESPECIES FORESTALES CEDRO Y GAÑAL - APLICACIÓN PARA LA ZONA DE LLAVIUCO Y MAZÁN, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO PAUTE", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 8 de Diciembre de 2017



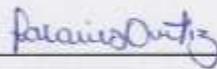
Erika Tatiana Arévalo Coello

C.I: 0105770911

Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Mishel Andrea Palacios Ortiz, autora del trabajo de titulación "DESARROLLO DE UN MODELO DE PRONÓSTICO DE SEQUÍAS PARA PROYECTOS DE REFORESTACIÓN CON ESPECIES FORESTALES CEDRO Y GAÑAL - APLICACIÓN PARA LA ZONA DE LLAVIUCO Y MAZÁN, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO PAUTE", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 8 de Diciembre de 2017



Mishel Andrea Palacios Ortiz

C.I: 0104856497



AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Rolando Céleri Alvear, PhD por su eficaz dirección, aporte de conocimientos y constante motivación.

A la Blga. Ximena Palomeque, PhD, al Ing. Alex Avilés, PhD y a la Ing. Andrea Maza por su valiosa contribución para el desarrollo de este trabajo de titulación.

Al Centro de Agroforestería y Manejo del Paisaje del Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Cuenca y al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) por proporcionar los datos requeridos para la elaboración del presente estudio.

Erika y Mishel



AGRADECIMIENTOS

A Dios por haber guiado mi vida y haberme dado las fuerzas y la sabiduría necesaria para culminar esta etapa. Por ser mi camino y mi luz en todo momento.

A mis padres por todo su amor, sacrificio, apoyo y paciencia, porque son los que me motivan a ser mejor cada día. Gracias por su ejemplo, valores y lecciones de vida.

A mi hermana Pame por ser mi cómplice, mi mejor amiga y la persona que con su amor, locura y ocurrencias me ha llenado de felicidad, porque contigo la vida es mejor y sin ti no estuviera completa.

A mis hermanos Jordy y Berni por todas sus travesuras, sus rebeldías, sus celos, su amor sincero y por ser los mejores hermanos del mundo.

A mis amigos, en especial a Joha, Lu, Cari Villegas y Galo que siempre han estado conmigo en las buenas y en las malas, gracias por su verdadera amistad. A Isma por ayudarme y alentarme incondicionalmente, gracias por creer y confiar en mí.

A las personas que Dios puso en mi camino Caro y Cari Calle por ser mis consejeras y mi apoyo, gracias por enseñarme tanto en tan poco tiempo, porque sé que con ustedes podré contar siempre.

Erika Tatiana Arévalo Coello

A Dios por ser mi guía y fortaleza en todo momento.

A Isabella por motivarme y acompañarme desde su primer día de vida en el logro de mis metas.

A mis padres Patricio y Mercedes y mis hermanas Daniela y Pamela por apoyarme incondicionalmente durante toda mi vida.

A mi familia y amigos por contribuir en el cumplimiento de mis objetivos.

Mishel Andrea Palacios Ortiz



DEDICATORIA

A Patricio, Rosy, Pamela, Jordy y Bernardo porque son el motor de vida y por ustedes vale la pena todo esfuerzo y sacrificio. Les amo.

Erika Tatiana Arévalo Coello

A Dios y mi dulce hija Isabella, todo mi amor, esfuerzo y vida.

Mishel Andrea Palacios Ortiz

1. INTRODUCCIÓN

Estudiar el clima y su variabilidad es una preocupación continua para los políticos y científicos del mundo, puesto que influye en la disponibilidad de recursos hídricos (Garreaud et al., 2003). Los eventos extremos causan interés en la sociedad debido a la evidencia sobre el posible cambio en los patrones de temperatura y precipitación en la región andina (IPCC, 2007; Lan et al., 2017). Proyecciones generales de modelos climáticos indican que el incremento de temperatura que aporta el calentamiento global, dará lugar a precipitaciones poco frecuentes y con mayor intensidad, ocasionando tanto largos períodos de sequía como riesgos de inundaciones (Cook et al., 2015; Meehl & Tebaldi, 2004; Trenberth et al., 2014).

A pesar de que la sequía representa una amenaza para el desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza, pocos países tienen planes nacionales preventivos para el manejo de los recursos naturales en eventos extremos. Mishra & Singh, (2010) mencionan que para la planificación y manejo de los recursos hídricos especialmente en regiones de montaña, se requiere de estudios detallados sobre los períodos de escasez de agua. En este contexto, los modelos de pronóstico de sequía en las cuencas andinas desempeñarían un rol importante para el manejo de recursos naturales, en el caso de nuestro estudio, para recursos no maderables del bosque siempre verde montano alto (Sierra, 1999).

En Ecuador existe vulnerabilidad a la degradación en los ecosistemas debido a actividades de explotación del recurso forestal (MAE, 2014). Con el propósito de restaurar tierras degradadas y conformar sumideros de carbono, el país ha desarrollado proyectos de reforestación. Estos proyectos analizan aspectos técnicos y económicos antes de ejecutarse (Goodwin et al., 2006). En este sentido, existe la necesidad de analizar los resultados de su ejecución para valorar las pérdidas económicas en casos extremos. Evidentemente, si las plantas no llegan a convertirse en árboles, el proceso de reforestación habrá fracasado, a un alto costo económico y social, e incluso ambiental, porque no se habrá cumplido el objetivo del proyecto. El principal problema dentro de este tipo de proyectos es la ausencia de datos para relacionar diferentes variables que generen información para la planificación y gestión. Por las razones expuestas, para minimizar los impactos económicos en los sectores productivos mediante la planificación estratégica, es importante el estudio de la resistencia de especies forestales nativas frente a tratamientos de sequía, que aporte en el éxito de un programa de restauración.

1.1 Antecedentes

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, (2017), las sequías han provocado la pérdida de 12 millones de hectáreas a nivel mundial. La intensificación de las sequías genera: dificultad en la producción e incremento en el costo de los alimentos (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2017), afecciones en el crecimiento de la vegetación, mortalidad de árboles (García-Haro et al., 2014; Moreno, 2009), incendios forestales, emisiones a la atmósfera (Duffy et al., 2015; Rivera, 2014) y fallas en los sistemas de abastecimiento de agua (Paredes & Guevara, 2010).

Como resultado de la ineficiencia o inexistencia de planes preventivos, existen grupos sociales perjudicados por ejemplo: En California, se perdieron 2.200 millones de dólares y 400.000 agricultores fueron perjudicados tras la sequía en el año 2014 (Diario EXPRESO., 2017).

Los eventos de sequía en el Ecuador han amenazado el abastecimiento de agua potable, servicio de electricidad y producción de alimentos, por ejemplo: en el año 2009 el episodio de estiaje que afectó a los habitantes de la ciudad de Cuenca (Diario EL TIEMPO, 2016). Adicionalmente, también se ha visto amenazada la integridad de los bosques y los servicios ambientales que estos proporcionan. Según la Secretaría de Gestión de Riesgos (2017) en el presente año se han registrado 50 incendios forestales comprometiendo bosques protectores dentro de la provincia del Azuay, estos eventos representaron 730.94 ha de cobertura vegetal quemada. A nivel nacional, para el 2017 la cifra de incendios forestales es de 596, que representa 9306.27 ha de cobertura vegetal quemada. El Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca (MAGAP) reportó que la sequía presentada en el 2016 causó la pérdida de cultivos que constituyen aproximadamente 50.000 dólares en daños. Además, 11.500 animales fueron afectados por la escasez de alimento (Diario EL MERCURIO, 2016).

En Ecuador han existido actividades de explotación irracional del recurso forestal, provocando vulnerabilidad a la degradación en los ecosistemas deforestados (MAE, 2014; Vázquez & Ulloa, 1997). En el periodo de 1990 a 2008 la tasa de deforestación anual neta fue de 753.9 km², perdiendo una extensión de 19000 km² de bosque natural (Sierra, 2013). Es por ello que en el país se ha implementado un “Plan Nacional de Restauración Forestal (2014-2017)” que tiene como meta alcanzar la tasa de deforestación cero, equivalente a la reforestación de 220.000 ha para el periodo 2014 – 2017 (MAE, 2014). Este programa parte de iniciativas internacionales como es “Bonn Challenge” que pretende restaurar 150 millones de hectáreas hasta el año 2020 y 350

millones para el 2030 (UICN, 2009). Por otra parte, pretende contribuir al cumplimiento del Objetivo 7 del Plan Nacional del Buen Vivir (2013-2017) que busca garantizar los derechos de la naturaleza y promover la sostenibilidad ambiental territorial y global.

1.2 Justificación

Una de las principales medidas que contrarrestan las sequías es el cuidado del ecosistema bosque, debido a los beneficios que este brinda a nivel mundial. Los bosques conservados aportan a la (i) absorción de CO_2 equivalente a de $1GtC_{eq}$ por año debido a la fotosíntesis; (ii) regulación del ciclo hidrológico en cantidad y calidad; y (iii) fuente de sustento para más de un billón de personas, en forma de alimento, medicina y comercio (Ojeda & Aguille, 2012; Tobón, 2009). Estos beneficios promueven el desarrollo sostenible. Por esta razón, se han generado programas de gestión en los bosques. Por ejemplo, El programa Regional para la Gestión Social de Ecosistemas Forestales Andinos (ECOBONA) y el Proyecto Páramo Andino tuvieron el propósito de generar, proporcionar y difundir conocimiento de todo el paisaje de montaña (Tobón, 2009). Además, existen estrategias en otras partes del mundo para rehabilitación y restauración de ecosistemas forestales a partir de recursos no maderables, como son las semillas. Por ejemplo, en los Estados Unidos para contrarrestar la sequía se está desarrollando “La Estrategia Nacional de Semillas para la Rehabilitación y la Restauración 2015-2020”, con el fin de identificar las necesidades de las semillas, desarrollar herramientas para administrar la tierra y difundir los conocimientos de la experiencia adquirida (Plant Conservation Alliance, 2015).

Según la Evaluación Nacional Forestal el estudio de especies forestales nativas aporta al diseño de planes y proyectos, toma de decisiones, y futuras negociaciones en los mercados de carbono (MAE & MFSCC, 2014). Es por eso que se analizarán dos especies forestales nativas del Parque Nacional Cajas: *C. montana* y *O. grandiflora*, debido a su importancia económica, ecológica y social en la región.

En conclusión, del análisis de la literatura se desprende que no se han realizado estudios interdisciplinarios que integren el pronóstico de sequía, la respuesta de las especies a los posibles eventos de sequía y un sistema de alerta preventiva para la toma de decisiones.

De todo esto nace la necesidad de contar con herramientas que permitan tomar decisiones sobre la ejecución de un proyecto de reforestación en un período

determinado, debido a que, si las condiciones climáticas de los meses venideros serán secas, el proyecto puede fracasar. Por esta razón, es preponderante el estudio de las sequías para implementar medidas preventivas en los proyectos de restauración y minimizar los impactos económicos (Vicario et al., 2015). Así, optimizar procesos de reforestación regional sería de suma importancia para el desarrollo de las iniciativas antes mencionadas. Si se contara con una herramienta de pronóstico se podría apoyar estas iniciativas locales y mundiales, lo que conllevará a mejorar la calidad ambiental de nuestro país e incluso reducir las posibles pérdidas económicas de un proyecto de reforestación. Además, el conocimiento generado estará a disposición de instituciones que financian la reforestación como el Ministerio del Ambiente (MAE) y la Corporación Financiera Nacional (CFN).

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un modelo de pronóstico de sequías para proyectos de reforestación con especies forestales Cedro y Gañal, aplicado para la zona de Llaviuco y Mazán, parte alta de la cuenca del Río Paute.

Objetivos específicos

1. Desarrollar un modelo estocástico de pronóstico de sequías basado en cadenas de Markov.
2. Analizar la resistencia de dos especies forestales nativas Cedro y Gañal frente a cuatro tratamientos de sequía (normal, moderado, severo y extremo).
3. Generar un semáforo para identificar la probabilidad de éxito de un programa de restauración.

2. MARCO TEÓRICO

Según la Organización Meteorológica Mundial, (2015) la variabilidad climática se define como la desviación temporal o espacial de las variables climáticas con respecto al promedio y se considera normal cuando el promedio estadístico de una variable climatológica es de mínimo 30 años.

La sequía se define como un fenómeno natural complejo, que se origina por la reducción significativa de las precipitaciones, durante un período de tiempo prolongado (Avilés et al., 2016; Morales et al., 2000; Ravelo et al., 2014). Cadier et al. (1994) mencionan que las causas más relevantes que dan origen a las sequías en el Ecuador son: (a) la influencia del fenómeno de “El Niño” sobre los regímenes hidroprecipitométricos del país, alterando las precipitaciones, (b) la situación septentrional anómala de la corriente de Humbolt y (c) la situación anticiclónica que impide la acción de los frentes, sistemas convectivos y depresiones.

De acuerdo a la clasificación de Wilhite & Glantz (1985), existen cuatro grupos de sequía: agrícola, hidrológica, socioeconómica y meteorológica. La sequía agrícola se registra cuando existe un déficit de humedad en el suelo, por lo que no se satisface los requerimientos necesarios para el desarrollo de cultivos (Martinez & Ruiz, 2005; Ravelo et al., 2014). La sequía hidrológica se presenta cuando los caudales superficiales o subterráneos alcanzan un nivel inferior al normal (Martinez & Ruiz, 2005; Valiente, 2001). La sequía socioeconómica hace referencia a la escasez de agua hasta el punto de provocar afecciones económicas y personales a la población (Rivera, 2014; Valiente, 2001) y la sequía que se analiza en el presente estudio, la sequía meteorológica, que tiene lugar cuando la precipitación para una región en particular, desciende por debajo de la media durante un período de tiempo determinado (Ravelo et al., 2014; Rivera, 2014; Valiente, 2001).

Para conocer la probabilidad de sequía meteorológica en nuestra zona de estudio, investigaciones anteriores (Avilés et al., 2015; Avilés et al., 2016) han desarrollado modelos basados en Cadenas de Markov (CM). Como resultado, Avilés et al., (2016) propone optimizar la planificación y la gestión de recursos naturales a partir de pronósticos de sequía.

En los métodos estocásticos, las Cadenas de Markov son herramientas para modelar la predicción del estado de varios sistemas, tales como: gestión de recursos, sistemas de decisión, entre otros (Ibe, 2013; Paegelow, 2003). Las CM fueron originadas por el matemático A. Markov y sus estudios han sido retomados por varios científicos; por

ende, en la actualidad, la teoría de las CM es la más eficaz para el análisis de varios fenómenos de todo el mundo (Basharin et al., 2004). Según (Rezaeianzadeh et al., 2016), el modelo de CM predice con precisión las condiciones de sequía. El método mencionado, considera las incertidumbres asociadas con el pronóstico basado en probabilidades.

El estudio de modelado de Hanson & Swanson, (2001) muestra la relevancia de los efectos del clima sobre las perturbaciones en los bosques, como la limitación en la disponibilidad de fuentes semilleras. Las fluctuaciones en la precipitación pueden influir en la longitud e intensidad de la perturbación causada por el cambio climático (Hanson & Swanson, 2001). Según Yigit et al., (2016) los territorios más vulnerables a la sequía son los espacios verdes, por esta razón el uso de plantas tolerantes a la sequía disminuye el costo de su mantenimiento. Según Hanson & Weltzin (2000) y Miranda et al., (2009) las afecciones a los bosques están relacionadas principalmente con el déficit hídrico (sequías) debido a que la disponibilidad de agua es un factor determinante en el desarrollo de las plantas (Moreno, 2009). En los últimos 100 años, tras el incremento de variaciones climáticas y factores de estrés hídrico, se ha visto la degradación de los ecosistemas mediante la pérdida de cultivos en la agricultura y silvicultura (Guo et al., 2012; Topacoglu et al., 2016).

Un ecosistema poco investigado es el bosque siempre verde montano alto, conocido también como ceja andina, tiene características similares al bosque nublado como en la cantidad de plantas epífitas y musgos (Duque, 2008). Este tipo de ecosistema es considerado fundamental ya que aporta en el control de la erosión del suelo y en la regulación y calidad del recurso hídrico (Tobón, 2009). Sin embargo, el aislamiento del bosque pone en peligro su supervivencia, por ende el papel que desempeña y la biodiversidad que existe en él (Duque, 2008). Las especies forestales *C. montana* y *O. grandiflora*, forman parte de la diversidad del bosque mencionado. *C. montana* tiene una distribución espacial desde los 1500 a 3500 m s.n.m. (Nieto & Rodríguez, 2000), presenta importancia ecológica al ser útil como sombrío en parcelas agroforestales (Restrepo & Murillo, 2007). *O. grandiflora* tiene una distribución espacial que abarca un rango altitudinal desde 1000 hasta 4000 m s.n.m. La especie mencionada presenta importancia ecológica por la capacidad de obtención de nutrientes a través de los racimos de raíces que la constituyen además sus semillas son fuente de alimento y sus flores atraen polinizadores (Cárdenas, 2015). Por otra parte, las dos especies presentan importancia económica y social por su utilidad maderable y medicinal (Palomeque et al., 2017). Por las razones expuestas, los árboles madre de las

especies mencionadas son fuentes semilleras idóneas para proyectos de restauración.

La selección de fuentes de semillas para zonas específicas garantizan el éxito de los programas de reforestación (Yigit et al., 2016) La restauración se puede ejecutar mediante la siembra de plántulas o siembra directa de semillas. La última es la que genera mayores beneficios puesto que es económicamente viable porque requiere una menor inversión, además la siembra directa cubre áreas más extensas, en menor tiempo (Cole, Holl, Keene, & Zahawi, 2011; Dorner, 2002). El pronóstico de la sequía sería de mucha utilidad para saber las épocas más adecuadas para reforestar. Sin embargo, estudios previos informan que el incremento del estrés hídrico causa la disminución en el porcentaje de germinación de semillas (Sevik & Cetin, 2016; Yigit et al., 2016).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del área de estudio

El sitio de investigación contempla el estudio de las especies nativas del Bosque Llaviuco y Bosque Protector de Mazán en el Parque Nacional el Cajas (PNC), provincia del Azuay, al noroccidente de la ciudad de Cuenca al sur del Ecuador. Los bosques se encuentran atravesados por las microcuencas del río Taitachugo y río Mazán a una altura entre 3000 y 3400 m s.n.m. y pertenecen al ecosistema bosque siempreverde montano alto (Sierra, 1999). Tienen una precipitación anual de 1111mm correspondiente al año 2015. La temperatura promedio anual en la zona es de 9,66°C y una humedad relativa promedio anual de 94,89% correspondiente al periodo 2015 – 2016 (Palomeque et al., 2017). Los tipos de suelo que predominan en el área de estudio son los Alfisoles e Inseptisoles y en menor proporción los Histosoles (Minga Ochoa, 2000; MAGAP, 2003; Palomeque et al., 2017)

En el Bosque Llaviuco se estableció el experimento en campo de las especies nativas, el cual fue desarrollado dentro de un sistema de exclusión de lluvia (Figura 1). Detalle de esta información Anexo 1.

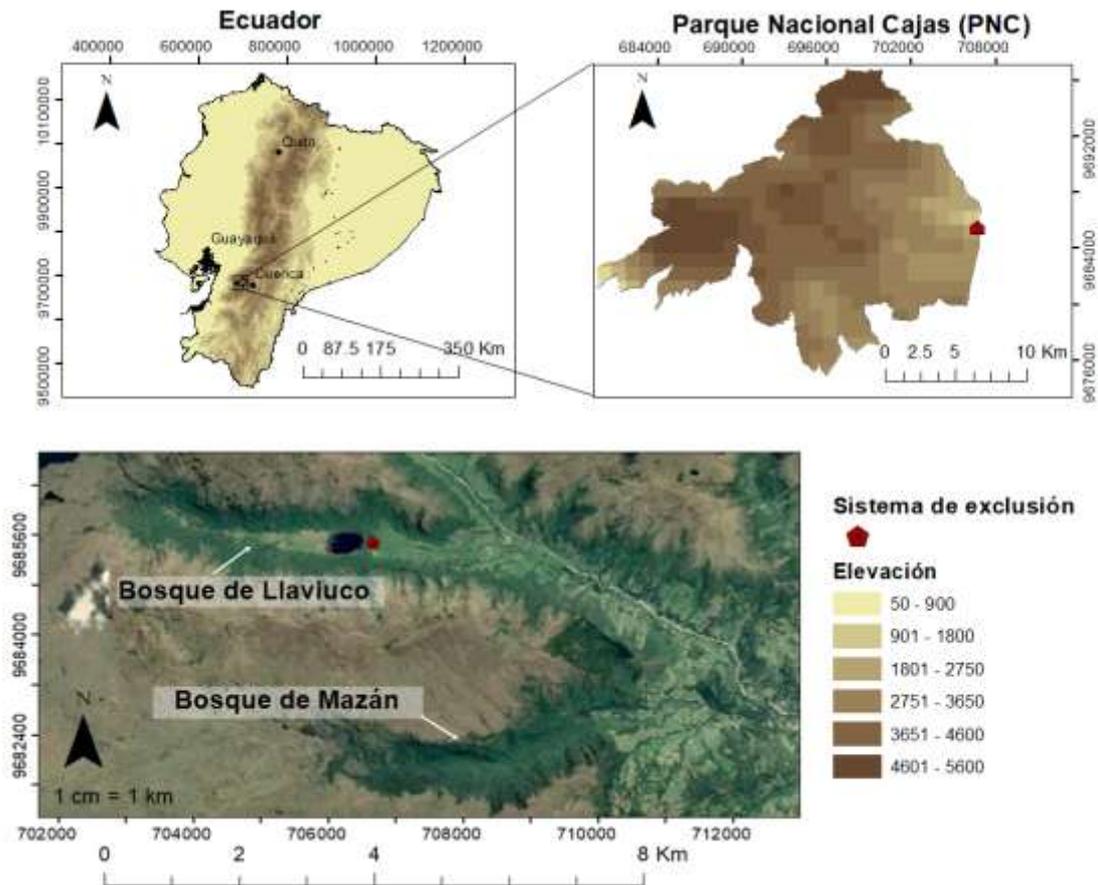


Figura 1. Ubicación del sistema de exclusión de lluvia y área de estudio bosques de Llaviuco y Mazán, Parque Nacional El Cajas (PNC).

3.2 Datos

3.2.1 Datos Meteorológicos

Para cumplir con el objetivo 1 se utilizó el registro del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), previamente revisado. Los datos tuvieron una frecuencia diaria, en el periodo 1976 - 2009 de lluvia de las estaciones pluviográficas Piscícola Chirimachay y Sayausí Matadero.

3.2.2 Datos biológicos

3.2.2.1 Especies forestales

Para el cumplir con el objetivo 2 y 3, se utilizó el registro proporcionado por el Centro de Agroforestería y Manejo del Paisaje del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHiCA) de la Universidad de Cuenca, quién ejecutó el experimento de especies forestales bajo un sistema de exclusión de lluvia. A partir del experimento, se generó la base de datos en series de tiempo de dos especies



forestales *Cedrela montana* (Cedro) y *Oreocallis grandiflora* (Gañal). La base de datos contó con un registro de germinación de semillas y viabilidad de semillas no germinadas, en un experimento control y cuatro tratamientos de sequía. Los datos de germinación se tomaron intercalando un día durante 90 días. El periodo de medición para la especie *C. montana* fue del 23 de diciembre de 2016 al 23 de marzo de 2017 y para el *Oreocallis grandiflora* fue del 4 de abril al 4 de julio de 2017. Detalle de la información del experimento en el Anexo 1.

3.3 Metodología.

Para cumplir con los objetivos planteados se siguió el procedimiento detallado en el Diagrama 1.

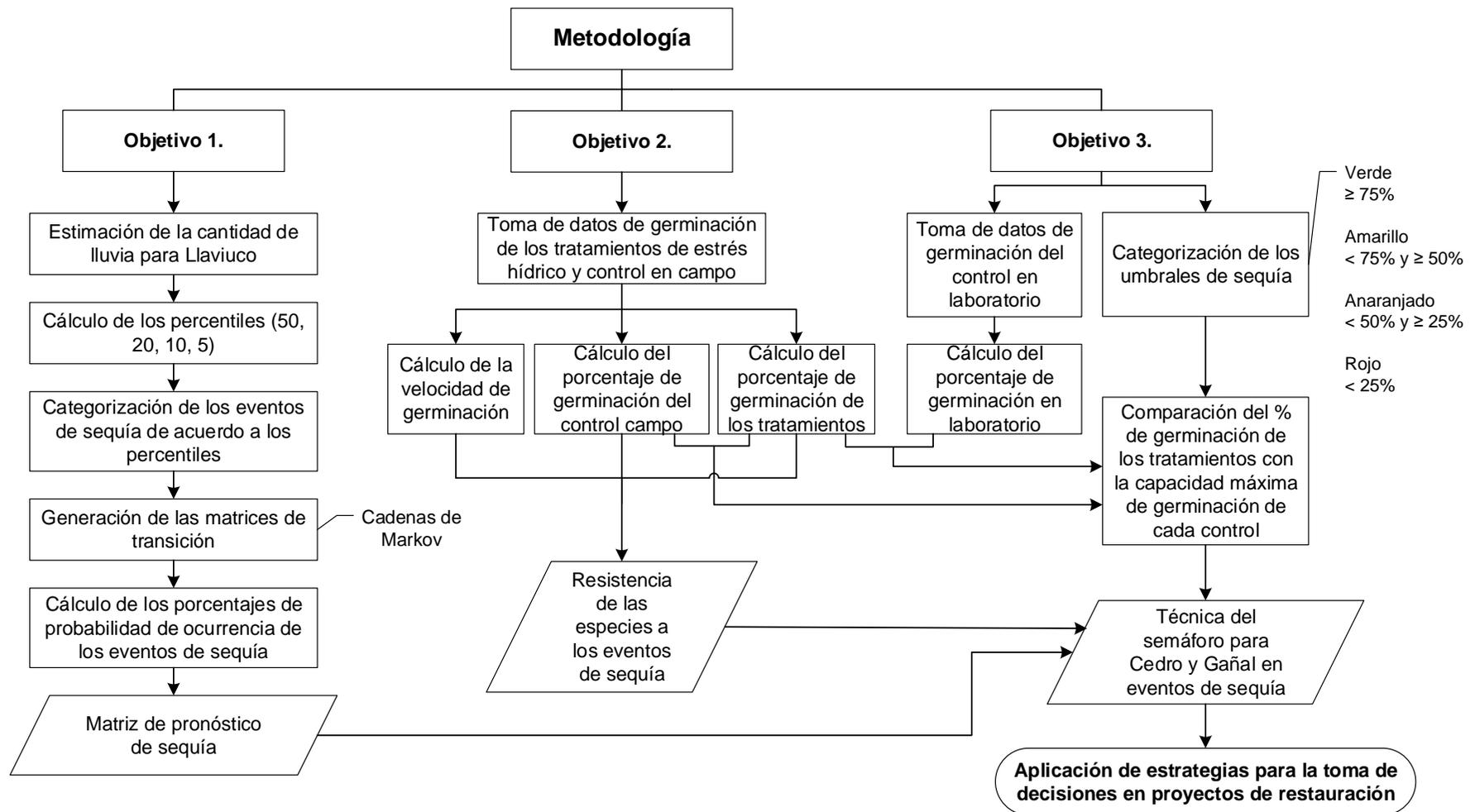


Diagrama 1. Descripción de la metodología para cumplir los objetivos del presente estudio.



Con el propósito de desarrollar un modelo de pronóstico de sequías para proyectos de reforestación, se calcularon los porcentajes de probabilidad de ocurrencia de los eventos de sequía. Se calculó la lluvia a escala mensual que ocurre en Llaviuco y los percentiles para categorizar los eventos de sequía y generar las matrices de transición mediante Cadenas de Markov. Finalmente, se generó la matriz de probabilidad de ocurrencia de los eventos de sequía.

Para analizar la resistencia de las especies forestales nativas *C. montana* y *O. grandiflora* frente a cuatro tratamientos de sequía se calculó la velocidad y el porcentaje de germinación de las semillas, a partir de la base de datos de germinación de las especies mencionadas. Se comparó cada tratamiento con el control de campo por medio de un análisis paramétrico ANOVA. Para generar un semáforo para identificar la probabilidad de éxito de un programa de restauración, se instaló el experimento control en laboratorio para tomar datos de la máxima capacidad de germinación de semillas en condiciones controladas. Luego, se categorizaron los umbrales de sequía del semáforo de acuerdo a cuatro rangos de porcentaje de germinación. Para clasificar los eventos de sequía según los umbrales establecidos se comparó el porcentaje de germinación de los tratamientos con respecto a los controles de campo y laboratorio. Finalmente, se generó el sistema semáforo, que en conjunto con la matriz de probabilidad de ocurrencia de los eventos de sequía, permiten predecir la probabilidad de éxito en la germinación de las semillas de las especies en estudio en un programa de restauración. A continuación, se detalla cada uno de los pasos seguidos.

3.3.1 Desarrollo de un modelo estocástico de pronóstico de sequías basado en cadenas de Markov.

Para el modelo estocástico se utilizaron datos diarios de lluvia de las estaciones pluviométricas Piscícola Chirimachay y Sayausí Matadero, y se agregaron en series de tiempo mensuales. A partir de estas se estimó la cantidad de lluvia para Llaviuco, mediante la Ecuación 1, en la que se consideró la distancia de Llaviuco a Chirimachay 8393,35 m y de Llaviuco a Matadero 7765,44 m.

$$z_j = \frac{\sum_i \frac{z_j}{d_{ij}^\beta}}{\sum_i \frac{1}{d_{ij}^\beta}} \quad (1)$$

Donde:

- z_j = Valor estimado para el punto j .
- β = Exponente de ponderación.
- d_{ij} = Distancia entre el punto i y el punto j .

Posteriormente, la lluvia mensual obtenida en Llaviuco fue categorizada de acuerdo a percentiles, tal como lo muestra la Tabla 1. Además, se establecieron cuatro categorías para cada evento de sequía: normal, moderado, severo y extremo (Avilés et al., 2015).

Tabla 1. Categorización de los eventos de sequía de acuerdo a los percentiles.

Eventos de sequía	Percentiles	Categorías
Normal	50	0
Moderado	20	1
Severo	10	2
Extremo	5	3

Fuente: Avilés et al., (2015)

A continuación, se calcularon las matrices de transición, obteniendo la transición de las categorías para cada mes del año. Para mayor detalle ver Anexo 2.

Las matrices de transición se calcularon mediante la siguiente fórmula:

$$P_{ij} = P_r \{J_{n+1} = j \mid J_n = i\} \quad (2)$$

De acuerdo con (Steinemann, 2003; Wilks, 2006), P_{ij} representa la probabilidad de transición de que J_{n+1} para un tiempo $n+1$ es igual a la categoría j , para un tiempo actual n . Dado que J_n es igual a la categoría i en el tiempo n .

Luego, se calculó la sumatoria de transiciones mensuales y el porcentaje de probabilidad de ocurrencia de los eventos de sequía, como se detalla en el Anexo 3.



La estimación de las probabilidades de ocurrencia (P_{ij}) se calculó a partir de la frecuencia relativa de las condicionales de transición, mediante la siguiente fórmula.

$$P_{ij} = \frac{m_{ij}}{\sum_j m_{ij}} \quad i, j = 1, \dots, s \quad (3)$$

Donde:

- m_{ij} = Frecuencia de que J_n es igual a la categoría i en el tiempo n e igual a la categoría j en el momento $n+1$.
- s = número de categorías de estados del sistema.
- P = matriz de probabilidad de ocurrencia de las transiciones (P_{ij}) para Cadenas de Markov de múltiples estados.

Finalmente, se utilizó el criterio de selección propuesto por Avilés et al (2015) y Zhang & Casey (2000), donde plantean que el valor más alto de probabilidad de transición del pronóstico probabilístico, sirve para generar la matriz de pronóstico de sequía. Cuando los eventos presentan igual probabilidad de ocurrencia, se mantiene el mismo evento para el mes siguiente. Sin embargo, cuando no se cumple esta condición se elige el evento que representa alto riesgo frente a los eventos de sequía restantes, para la adecuada gestión de propagación de especies forestales.

3.3.2 Análisis de la sensibilidad de dos especies forestales nativas *Cedrela montana* y *Oreocallis grandiflora* frente a cuatro tratamientos de sequía (normal, moderado, severo y extremo)

El porcentaje de germinación y coeficiente de velocidad de germinación de las dos especies se analizaron por separado.

Germinación: se calculó el porcentaje de germinación de cada especie por cada tratamiento.

Velocidad de germinación: El coeficiente de velocidad se calculó a partir de la siguiente fórmula (Baskin & Baskin, 2014; Kotowski, 1926; Palomeque et al., 2017).

$$VG = \frac{100(A_1 + \dots + A_x)}{(A_1 T_1 + A_2 T_2 + \dots + A_x T_x)} \quad (4)$$



Donde:

- VG = Coeficiente de la velocidad germinativa
- A_1, A_2, A_x = Número de semillas contadas desde el primer día, segundo día hasta el último día.
- T_1, T_2, T_x = Número de días entre la siembra y el primer día de registro de germinación, segundo día de registro de germinación hasta el último día.

3.3.2.1 Análisis estadístico

Para el cumplimiento del objetivo 2. los datos fueron analizados para identificar si mantenían la homogeneidad de varianza y seguían una distribución normal y una vez cumplido el primer supuesto se aplicó la prueba estadística ANOVA ($p < 0,05$), como lo indica (Quinn & Keough, 2002). Finalmente, el test de Tukey ($p \leq 0,05$) se utilizó para identificar las diferencias entre tratamientos por especie.

3.3.3 Generación de un semáforo para identificar la probabilidad de éxito de un programa de reforestación.

3.3.3.1 Categorización de umbrales de sequía

Los umbrales de sequía se categorizaron mediante cuatro colores (verde, amarillo, anaranjado y rojo) de la siguiente manera:

Verde cuando el porcentaje de germinación fue mayor o igual al 75%, amarillo cuando fue menor al 75% y mayor o igual al 50%, anaranjado cuando fue menor al 50% y mayor o igual al 25% y el rojo cuando los valores obtenidos fueron menores al 25%.

3.3.3.2 Clasificación de los umbrales y desarrollo de la técnica del semáforo

Basándose en el resultado del porcentaje de germinación de las semillas generado en la actividad 2.3.2 y en el Anexo 4 y de acuerdo a la clasificación 2.3.3.1 se diseñó una guía para la toma de decisiones mediante el denominado enfoque o técnica del “semáforo” (Almarcha, 2016; CYTED, 2013; Secchi & Arcuri, 2016). Se comparó el porcentaje de germinación de los tratamientos con respecto a los controles de laboratorio (Anexo 5) y campo. Posteriormente se clasificaron los porcentajes de germinación de los tratamientos

de acuerdo a los umbrales establecidos. Finalmente se generó un semáforo que permitió identificar fácilmente qué estado (color) presentan los eventos de sequía, cuál es su situación y probabilidad de éxito, como se observa en la Tabla 2. Debido a que cada especie tiene diferente resistencia al estrés hídrico, se desarrolló un semáforo para cada especie.

Tabla 2. Descripción de los estados y la acción recomendada en un sistema de semáforo para el manejo de especies forestales.

Color	Situación	Probabilidad de Éxito
Verde	Sin riesgo	$\geq 75\%$.
Amarillo	Bajo riesgo	$< 75\%$ y $\geq 50\%$
Anaranjado	Mediano riesgo	$< 50\%$ y ≥ 25
Rojo	Alto riesgo	$< 25\%$

Fuente: Autores, 2017

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Modelo de pronóstico de sequías basado en Cadenas de Markov.

Los resultados obtenidos muestran que a la ocurrencia de un estado inicial 0 (evento normal) en cualquier mes del año, el pronóstico para los meses restantes del año será el evento normal. Si partimos de una categoría 3 (evento extremo) entonces el pronóstico revela que es más probable que ocurran eventos extremos en los meses siguientes. En el caso de los eventos moderado y severo los resultados dependen del estado inicial del mes de partida; por ejemplo, si enero tuviera una categoría 1 (evento moderado), el pronóstico para febrero será un evento normal con una probabilidad de 80%. Por el contrario, si enero tuviera una categoría 2 (evento severo), el pronóstico para febrero será un evento severo con una probabilidad de 25%. Por lo tanto, el estado inicial que mostró el mes precedente indica el pronóstico para el mes siguiente. Para mayor detalle de la categoría del mes pronosticado y su probabilidad de ocurrencia se puede ver la Tabla 3 y Anexo 6.



En este estudio de acuerdo con la tabla 3 se observa que los eventos de sequía tienden a mantener su intensidad. Por lo tanto, si partimos de un evento normal, para el siguiente mes existe mayor probabilidad que ocurra un evento normal. Por ejemplo, se encontró que si en julio ocurre un evento normal 0 para agosto será un evento normal 0, con una probabilidad de ocurrencia de 77% o un evento moderado con probabilidad 23%, completando de esta manera el 100%. Resultados similares se encontraron en las cuencas hidrográficas andinas en el estudio de Avilés et al., (2016), realizado con datos de la estación El Labrado, ubicado a unos 30 km al norte de nuestro sitio de estudio, donde se menciona que la probabilidad de ocurrencia del evento normal para el mismo mes es 72%. Sin embargo, también se encontraron diferencias entre los dos estudios ya que para el pronóstico de agosto, si ocurre un evento severo en julio, nuestros datos indican el pronóstico de un evento normal para el mismo mes, mientras que en el estudio de Avilés et al., (2016) se mantiene el evento severo. Estas diferencias se pueden atribuir a las siguientes explicaciones: la topografía y elevación de los sitios en donde están ubicadas las estaciones pluviométricas y tipo de ecosistema. Por otro lado, la diferencia en las predicciones de sequía mediante cadenas de Markov se puede deber a la longitud del registro de datos utilizados (Banimahd & Khalili, 2013). El pronóstico generado se suma a las proyecciones de modelos climáticos que prevén la intensificación de sequías (Trenberth et al., 2014).

Tabla 3. Pronóstico probabilístico del mes siguiente. Categoría 0 (evento normal Percentil 50), categoría 1 (evento moderado Percentil 20), categoría 2 (evento severo Percentil 10), categoría 3 (evento extremo Percentil 5).

Categoría del mes actual	Categoría del mes pronosticado											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Normal 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Moderado 1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
Severo 2	0	2	2	2	2	0	2	0	0	2	2	2
Extremo 3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3



4.2 Análisis de la sensibilidad de dos especies forestales nativas *Cedrela montana* y *Oreocallis grandiflora* frente a cuatro tratamientos de sequía (normal, moderado, severo y extremo).

4.2.1 Porcentaje y velocidad de germinación de *C. montana*

En la figura 2 y Anexo 7, se presenta los resultados del porcentaje de germinación para *C. montana*. Se puede observar diferencias entre los tratamientos, que estadísticamente son significativas ($p=0.031$). Los tratamientos normal, moderado y severo fueron similares estadísticamente con valores de porcentaje de germinación de $44 \pm 20,33$ %; $53,33 \pm 9,43$ % y $38,67 \pm 26,42$ % respectivamente. El tratamiento extremo, con un promedio de $16 \pm 11,16$ %, no mostró similitud con respecto a los otros escenarios. El control en el campo, con un promedio de $61 \pm 23,64$ % difiere notablemente con los escenarios simulados de sequía. Con estos resultados, se demuestra que el estrés hídrico en esta especie, perjudica a la germinación de las semillas, en especial si existiese una sequía severa o extrema. Además, que todos los escenarios incluyendo las categorías normal y moderada, influyen en el desarrollo de las semillas, impidiendo que alcance su máximo de germinación.

Los meses de simulación de sequía para los tratamientos en esta especie, fueron diciembre, enero, febrero y marzo, que de acuerdo a la literatura, son considerados como meses secos en los Andes del sur del Ecuador (Buytaert et al., 2006). Sin embargo, para estos meses, de pronosticarse eventos de severa o extrema sequía, influenciaría en la germinación de las semillas para esta especie. Para el escenario moderado de sequía, *C. montana* presenta mayor porcentaje de germinación, superando el porcentaje de germinación en el escenario normal, por lo tanto, se demuestra que la cantidad de agua dosificada óptima para la especie, no siempre es la mayor, ya que cada especie tiene un umbral para soportar el estrés por humedad (alta o poca cantidad de agua) y la saturación de la misma disminuye el porcentaje de germinación (Vega & Nolasco, 1996).

Con respecto a la velocidad de germinación (Ver Figura 3 y Anexo 7), se puede observar que los tratamientos normal y moderado tuvieron índices de velocidad iguales de $1,61 \pm 0,035$ en los dos casos. Estos dos tratamientos presentaron índices de velocidad mayores al tratamiento severo y extremo con coeficientes $1,57 \pm 0,092$ y $1,56 \pm 0,045$ respectivamente. No obstante, se puede notar que el control en campo es el que se demoró 14 días más en germinar, con respecto al escenario simulado que mayor coeficiente de velocidad presentó, es decir en donde germinaron en menor tiempo las

semillas, como se puede observar en la Figura 3, con una velocidad de $1,48 \pm 0,018$. Esto se debe a que los diferentes tratamientos de sequía se encontraron en un sistema aislado y controlado, y el control en campo estuvo expuesto a las condiciones ambientales dentro del bosque, siendo estas una barrera que ocasiona la demora en la germinación de las semillas, ya sea influenciado por el viento, luz solar, como ya lo ha mencionado (Vega & Nolasco, 1996).

Por otro lado, en el estudio realizado por Palomeque et al., (2017) a nivel de laboratorio, a una dosificación de agua constante, según los parámetros ISTA The International Seeds Testing Association, (2007). Para *C. montana* (bosque de San Francisco, Loja) obtuvo valores del porcentaje de germinación de 0% para la réplica con porcentaje más bajo, y 29.25 ± 25.05 % para la réplica con porcentaje de germinación más alto.

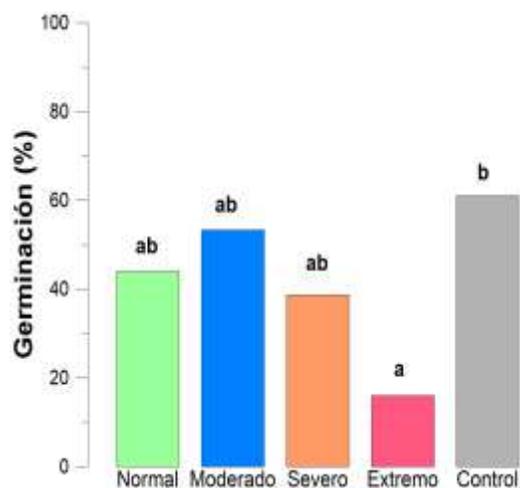


Figura 2. Porcentaje de germinación de la especie *C. montana* bajo cuatro escenarios de sequía simulados de lluvia y un control en campo. Las letras a y b representan los grupos con diferencias significativas después de un test post hoc.

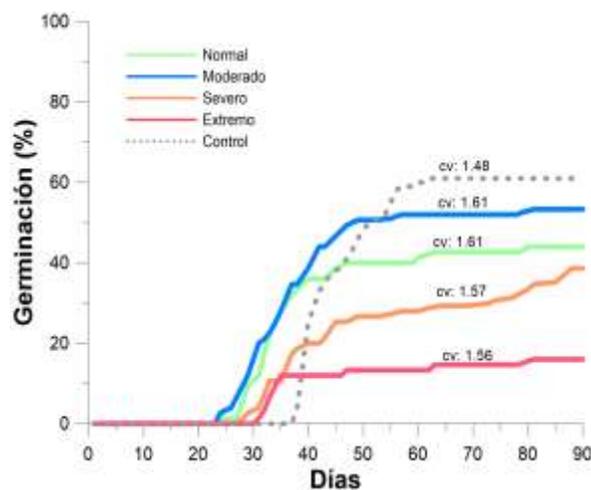


Figura 3. Porcentaje de germinación y coeficiente de velocidad de la especie *C. montana* bajo cuatro escenarios simulados de lluvia y un control en campo. cv, es el coeficiente de velocidad para cada tratamiento.



4.2.2 Porcentaje y velocidad de germinación de *O. grandiflora*

En la Figura 4 y Anexo 8, se presentan los resultados del porcentaje de germinación para *O. grandiflora*. Los resultados mostraron que hay diferencias entre los tratamientos y fueron estadísticamente significativas ($P < 0.5$). Los tratamientos control, normal, moderado y severo fueron similares estadísticamente con valores promedio de porcentaje de germinación de $89,07 \pm 7,19$, $78,67 \pm 7,3$, $92 \pm 10,95$ y $92 \pm 8,69$ respectivamente. El tratamiento extremo con un promedio de $22,67 \pm 11,16$ fue el que menor porcentaje de germinación tuvo y no mostró similitud con respecto a los otros tratamientos.

Con estos resultados, se demuestra que el estrés hídrico en esta especie, perjudica a la germinación de las semillas, en especial si existiese una sequía extrema. Además, se puede observar que en el control y tratamiento normal el porcentaje de germinación es menor que en los tratamientos moderado y severo, esto se puede atribuir al estrés hídrico por saturación de agua (Vega & Nolasco, 1996). Esto pudo provocarse por la precipitación en los meses de simulación de lluvia a la que estuvieron dispuestos los tratamientos en esta especie, los cuales fueron abril, mayo, junio y julio. De acuerdo a la literatura, los meses mencionados son considerados como lluviosos en los Andes del sur del Ecuador (Buytaert et al., 2006). Por lo tanto, se demuestra que la cantidad de agua dosificada óptima para la especie, no siempre es la mayor, ya que esta especie es capaz de germinar en mayor porcentaje con dosificaciones más bajas de las condiciones en campo.

Con respecto a la velocidad de germinación (Ver figura 5 y Anexo 8), se puede observar que los tratamientos Control, Normal, Moderado y Severo tuvieron índices de velocidad similares con valores promedios $1,55 \pm 0,025$, $1,52 \pm 0,033$, $1,52 \pm 0,022$ y $1,52 \pm 0,041$ de respectivamente. Estos dos tratamientos presentaron índices de velocidad mayores al tratamiento extremo con un coeficiente de $1,51 \pm 0,053$, este último indica que la germinación fue lenta.

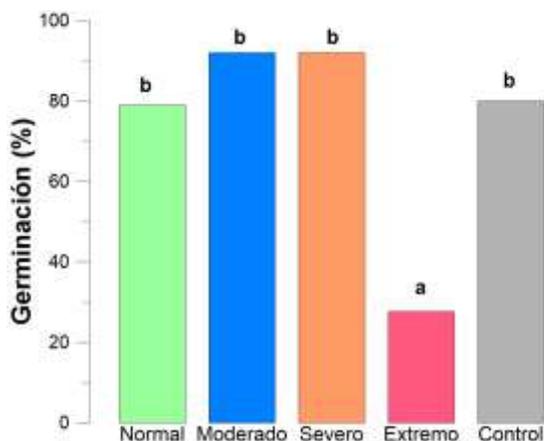


Figura 4. Porcentaje de germinación de la especie *O. grandiflora* bajo cuatro escenarios de sequía simulados de lluvia y un control en campo. Las letras a y b representan los grupos con diferencias significativas después de un test post hoc.

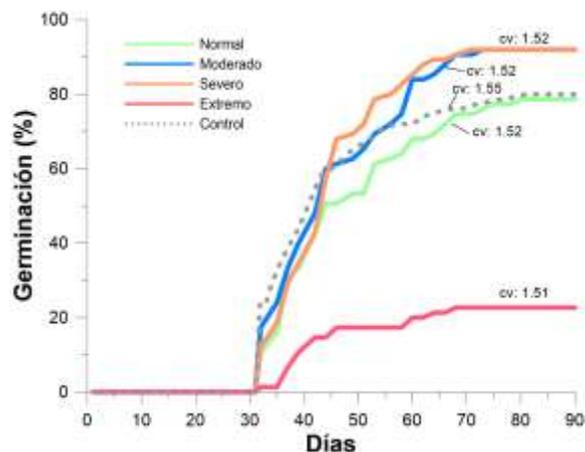


Figura 5. Porcentaje de germinación y coeficiente de velocidad de la especie *O. grandiflora* bajo cuatro escenarios simulados de lluvia y un control en campo. cv, es el coeficiente de velocidad para cada tratamiento.

Como es bien conocido en la literatura, el éxito de la germinación de semillas, entre otros factores, está relacionado a la óptima humedad del sustrato (campo) o el papel filtro (laboratorio) en el que esté sembrado, pues el estrés por agua puede afectar la germinación (Topacoglu et al., 2016; Yigit et al., 2016). Esta afirmación se vio reflejado en los resultados del experimento, en el tratamiento extremo para las dos especies, donde su germinación se redujo notablemente. Esta influencia del estrés hídrico en la germinación de las especies forestales también se ha visto reflejada en estudios similares con semillas de árboles en zonas tropicales en Malasia, a una latitud similar a la del Ecuador, donde demuestran una clara influencia del estrés hídrico en las semillas y el umbral preferencial de cada especie para un máximo porcentaje de germinación (O'Brien et al., 2015).

Por otro lado, en el estudio realizado por Palomeque et al., (2017) a nivel de laboratorio, a una dosificación de agua constante, según los parámetros ISTA The International Seeds Testing Association, (2007). Para la especie *O. grandiflora* (bosques de Llaviuco y Mazán), tuvo un porcentaje de germinación de 63 ± 59.96 % para la réplica con porcentaje de germinación más bajo y 91 ± 17.13 % para la réplica con porcentaje de germinación más alto., en nuestro estudio se obtuvo valores similares con los tratamientos normal y control para las mismas especies.

4.3 Generación de un semáforo para identificar la probabilidad de éxito de un programa de reforestación.

Los resultados obtenidos en la Tabla 4. muestran que el tratamiento moderado tiene la mayor probabilidad de éxito clasificada como sin riesgo. En los tratamientos normal y severo se tiene bajo riesgo y en el tratamiento extremo de mediano riesgo.

Tabla 4. Semáforo para la especie *C. montana* (tratamientos analizados con respecto al control de campo)

Color	Tratamiento	Situación	Probabilidad de éxito
	Normal	Bajo riesgo	< 75% y ≥ 50%
	Moderado	Sin riesgo	≥ 75%
	Severo	Bajo riesgo	< 75% y ≥ 50%
	Extremo	Mediano riesgo	< 50% y ≥ 25%

Los resultados obtenidos en la Tabla 5. muestran que algunos meses, el tratamiento moderado tiene la mayor probabilidad de éxito clasificada como sin riesgo. En los tratamientos normal y severo, tienen la probabilidad de éxito clasificada como bajo riesgo. En el tratamiento extremo tiene la probabilidad de éxito clasificada como mediano riesgo.

Tabla 5. Semáforo para identificar la probabilidad de éxito en la germinación de la especie *C. montana* en diferentes tratamientos de sequía. Verde ≥ 75% Naranja < 50% y ≥ 25% Amarillo < 75% y ≥ 50%.

Estado inicial del mes actual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Normal												
Moderado												
Severo												
Extremo												

Los resultados obtenidos en la Tabla 6. muestran que los tratamientos normal, moderado y severo tiene la mayor probabilidad de éxito clasificada como sin riesgo. En el tratamiento extremo tiene la probabilidad de éxito clasificada como mediano riesgo.

Tabla 6. Semáforo para la especie *O. grandiflora* (tratamientos analizados con respecto al control de campo)

Color	Tratamiento	Situación	Probabilidad de éxito
	Normal	Sin riesgo	$\geq 75\%$
	Moderado	Sin riesgo	$\geq 75\%$
	Severo	Sin riesgo	$\geq 75\%$
	Extremo	Mediano riesgo	$< 50\%$ y $\geq 25\%$

Los resultados obtenidos en la Tabla 7. muestran los tratamientos normal, moderado y severo tienen la mayor probabilidad de éxito clasificada como sin riesgo. En el tratamiento extremo tiene la probabilidad de éxito clasificada como mediano riesgo.

Tabla 7. Semáforo para identificar la probabilidad de éxito en la germinación de la especie *O. grandiflora* en diferentes tratamientos de sequía. Verde $\geq 75\%$ Naranja $< 50\%$ y $\geq 25\%$.

Estado inicial del mes actual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Normal												
Moderado												
Severo												
Extremo												

Los resultados descritos presentan por primera vez la susceptibilidad de especies frente a cuatro categorías de sequía con la finalidad de facilitar la gestión ambiental. Los colores representan el porcentaje de germinación que puede ocurrir en cada evento según la especie, lo cual es útil para la gestión de especies en eventos climáticos extremos.



El semáforo de cada especie es una herramienta de fácil interpretación para los tomadores de decisiones como se ha visto en CYTED, (2013) mediante la técnica de semáforo. También podría aportar en la construcción de calendarios de siembra (Meseth & Yu, 2010), para que se considere la sensibilidad de las especies a los periodos de sequía.

Por lo tanto, se puede recomendar el desarrollo del pronóstico de sequía como un instrumento de fácil ejecución e interpretación para diferentes zonas y aplicaciones, una de ellas restauración ecológica.

5. CONCLUSIONES

El propósito de este estudio fue proporcionar una herramienta de fácil aplicación y posible de replicar, que reduzca la subjetividad en la toma de decisiones en proyectos de restauración, frente a eventos de sequía mediante su pronóstico a corto plazo. Los modelos de pronóstico de sequía como, Cadenas de Markov, son una herramienta para el estudio del clima y su variabilidad, lo que hace posible contar con información para planificar estrategias frente a los eventos que amenacen proyectos de restauración a un alto costo económico, social, e incluso ambiental. El pronóstico de sequía junto al porcentaje máximo de germinación presentado en campo tiene varias aplicaciones prácticas. En primer lugar, señala la probabilidad de éxito de un programa de restauración mediante la técnica siembra directa de semillas de *C. montana* y *O. grandiflora*, dos especies forestales de gran importancia económica, social y ecológica. En segundo lugar, proporciona información básica de las especies mencionadas, como son el porcentaje de germinación y coeficiente de velocidad de germinación. De esta manera, la metodología presentada, podría adaptarse para el manejo de diferentes especies poco estudiadas de ecosistemas de alta montaña, para fines de restauración o producción de plantas forestales.

El segundo objetivo de este estudio fue investigar los efectos de la sequía sobre la germinación y el coeficiente de velocidad de germinación de semillas. Se observó que las dos especies forestales son capaces de germinar en todos los tratamientos de sequía, especialmente en el tratamiento sequía moderada. Sin embargo, germinan muy poco en el tratamiento sequía extrema. La especie *C. montana* obtuvo un mayor porcentaje y velocidad de germinación en el tratamiento moderado y normal. Sin embargo, la especie



O. grandiflora obtuvo un mayor porcentaje y velocidad de germinación en el tratamiento moderado y severo. Los resultados muestran las condiciones en las que se desarrollan rápidamente y en mayor proporción las semillas en estudio, esto aporta en la optimización de procesos y recursos al momento de seleccionar las condiciones de siembra.

El tercer objetivo facilita nuestra comprensión sobre el desarrollo de las especies forestales mientras responden a las variaciones climáticas. Por esta razón, generar un sistema de alerta preventiva que identifique fácilmente el mes óptimo para realizar proyectos de restauración, impulsa el manejo eficiente y económico de recursos no maderables. Mediante el presente estudio ahora se conoce que tanto la especie *C. montana* como la especie *O. grandiflora* pueden responder con un alto porcentaje de germinación, mayor al 50% de semillas germinadas, en eventos de sequía normal moderada y severa, información que aporta a la propagación de las especies, para el aumento de la resiliencia del ecosistema bosque. Mientras que en el evento de sequía extrema, las especies responden con un bajo porcentaje de germinación menor al 50% de semillas germinadas.

De acuerdo al conocimiento adquirido hasta el momento, la variabilidad climática en las cadenas montañosas es limitado debido a la escases de monitoreo en esas zonas. Por lo tanto, los andes tropicales al ser considerados uno de los lugares con mayor biodiversidad del mundo necesita ser estudiado a profundidad para reconocer fenómenos relacionados con la precipitación que afecten de manera directa a los recursos forestales. En el caso de nuestro estudio, se ha demostrado que únicamente los eventos de sequía extrema perjudican al desarrollo de especies nativas forestales como es el caso de *C. montana* y *O. grandiflora*.



6. RECOMENDACIONES

1. Actualizar la base de datos lluvia para validar el modelo y comparar los resultados con la presente investigación.
2. Utilizar diferentes especies de semillas para identificar su sensibilidad frente a los eventos de sequía.
3. Utilizar diferentes sustratos para identificar el efecto de las características físico-química del suelo en la sensibilidad de las semillas frente a los eventos de sequía.
4. Analizar los efectos de los eventos de sequía sobre las plántulas germinadas para identificar el porcentaje de crecimiento o la mortalidad en cada evento.



7. REFERENCIAS

- Almarcha, J. (2016). Las obligaciones de información y clasificación de los productos financieros : el « semáforo del riesgo », 1–6.
- Avilés, A., Célleri, R., Paredes, J., & Solera, A. (2015). Evaluation of Markov Chain Based Drought Forecasts in an Andean Regulated River Basin Using the Skill Scores RPS and GMSS, 1949–1963. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0921-2>
- Avilés, A., Célleri, R., Solera, A., & Paredes, J. (2016). Probabilistic Forecasting of Drought Events Using Markov Chain- and Bayesian Network-Based Models : A Case Study of an Andean Regulated River Basin. <https://doi.org/10.3390/w8020037>
- Banimahd, S. A., & Khalili, D. (2013). Factors Influencing Markov Chains Predictability Characteristics, Utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI Drought Indices in Different Climatic Zones. *Water Resources Management*, 27(11), 3911–3928. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0387-z>
- Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2014). *Variation in Seed Dormancy and Germination within and between Individuals and Populations of a Species. Seeds: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416677-6.00008-1>
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De, & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3–4), 413–421. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
- Cadier, É., Gomez, G., Calvez, R., & Rossel, F. (1994). Inundaciones y sequias en el Ecuador. *Scientific Publications of Institut de Recherche Pour Le Développement (IRD)*, 107–116.
- Cárdenas, F. (2015). *Ecología de polinización de Oreocallis grandiflora (Lam.) R. Br. (Proteaceae) en un matorral montano del sur del Ecuador.* Universidad del Azuay. Retrieved from <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/5069/1/11508.pdf>
- Cole, R. J., Holl, K. D., Keene, C. L., & Zahawi, R. A. (2011). Forest Ecology and Management Direct seeding of late-successional trees to restore tropical montane forest. *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1590–1597.



<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.06.038>

Cook, B. I., Ault, T. R., & Smerdon, J. E. (2015). Unprecedented 21st century drought risk in the American Southwest and Central Plains. *ScienceAdvances*, *107*(50), 21283–8. <https://doi.org/10.1073/pnas.0911197107>

Diario EL TIEMPO. (2016). Sequía golpea a los cuencanos. Cuenca. Retrieved from <http://www.eltiempo.com.ec/noticias/cuenca/2/403204/sequia-golpea-a-los-cuencanos>

Diario EXPRESO. (2017). La sequía no sólo acecha al Ecuador. Cuenca. Retrieved from <http://www.expreso.ec/economia/la-sequia-no-solo-acecha-a-ecuador-KM1493369>

Diario EL MERCURIO. (2016). Sequías y heladas dejan grandes daños. Cuenca. Retrieved from <https://www.elmercurio.com.ec/578281-sequia-y-heladas-dejan-graves-danos/>

Dorner, J. (2002). An introduction to using native plants in restoration projects.

Duffy, P. B., Brando, P., Asner, G. P., & Field, C. B. (2015). Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon, *112*(43). <https://doi.org/10.1073/pnas.1421010112>

Duque, D. S. (2008). Creating a High Andean Montane Forest Habitat Corridor Within a Paramo Mosaic in Northern Ecuador. *Ecoligía Aplicada*, *7*(1,2), 9–15.

García-Haro, Campos-Taberner, Sabater, N., Belda, F., Moreno, A., Gilabert, M. ., ... Meliá, J. (2014). Vulnerabilidad de la vegetación a la sequía en España. *Teledetección*, 29–37.

Garreaud, R., Vuille, M., & Clement, A. C. (2003). The climate of the Altiplano: Observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *194*(1–3), 5–22. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00269-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00269-4)

Goodwin, K., Marks, G., & Sheley, R. (2006). *Revegetation Guidelines for Western Montana: Considering Invasive Weeds* (The Missou). Missoula. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/265738955_Revegetation_Guidelines_for_Western_Montana_Considering_Invasive_Weeds



- Guo, R., Hao, W., & Gong, D. (2012). Effects of Water Stress on Germination and Growth of Linseed Seedlings (*Linum usitatissimum* L), Photosynthetic Efficiency and Accumulation of Metabolites. *Journal of Agricultural Science*, 4(10). <https://doi.org/10.5539/jas.v4n10p253>
- Hanson, P. J., & Swanson, F. J. (2001). Climate Change and Forest Disturbances. *BioScience*, 51(9), 723. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051)
- IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. *Nature* (Vol. 446). <https://doi.org/10.1038/446727a>
- Kotowski, F. (1926). Temperature relations to germination of vegetable seed. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, 23:176--184.
- Lan, S., Stiefel, M., Peralvo, M., Báez, S., Rist, S., Buytaert, W., ... Young, K. R. (2017). Research Priorities for the Conservation and Sustainable Governance of Andean Forest Landscapes. *Mountain Research and Development*, 37(3), 323–339. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-16-00093.1>
- MAE. (2014). Programa nacional de restauración forestal con fines de conservación ambiental, protección de cuencas hidrográficas y beneficios alternos, (593 2).
- Martinez, O. U., & Ruiz, M. (2005). Caracterización y análisis de la sequía en el estado de Coahuila.
- Meehl, G. A., & Tebaldi, C. (2004). More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305(5686), 994–997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>
- Meseth, E., & Yu, J. C. S. (2010). Mejora en los calendarios de cultivo para agricultura de secano en ceja de selva. *Scientia Agropecuaria*, 5, 187–197. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2014.04.03>
- Minga Ochoa, D. (2000). *Árboles y Arbustos del Bosque Mazán*. (E. de A. P. y A. (ETAPA), Ed.). Cuenca.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería, & (MAGAP). (2003). Servicio de Cartografía 1:50.000. Retrieved from <http://geoportal.agricultura.gob.ec/geoservicios.html>



- Ministerio del Ambiente, M., & Manejo Forestal Sostenible ante el Cambio Climático, M. (2014). Evaluación nacional forestal resultados.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A Review of Drought Concepts. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, (September). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.049>
- Morales Gil, A., Olcina Cantos, J., & Rico Amorós, A. M. (2000). Diferentes percepciones de la sequía en España: adaptación, catastrofismo e intentos de corrección. *Investigaciones Geográficas*, (23), 5–46.
- Moreno, L. P. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 27(2), 179–191.
- Nieto, V., & Rodríguez, J. (2000). Cedrela montana Moritz ex Turcz. *Tropical Tree Seed Manual*, (February), 384–385. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22515.94242>
- O'Brien, M. J., Burslem, D. F. R. P., Caduff, A., Tay, J., & Hector, A. (2015). Contrasting nonstructural carbohydrate dynamics of tropical tree seedlings under water deficit and variability. *New Phytologist*, 205(3), 1083–1094. <https://doi.org/10.1111/nph.13134>
- Ojeda, T., & Aguille, N. (2012). Los Bosques como aliados a la mitigación del cambio climático en el contexto de REDD+ en el Ecuador. *CEDAMAZ*, 2(1), 13–21.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, F. (2017). La FAO en situaciones de emergencia: Sequía. Retrieved from <http://www.fao.org/emergencias/tipos-de-peligros-y-de-emergencias/sequia/es/>
- Organización Meteorológica Mundial, (OMM). (2015). Clima. Naciones Unidas. Retrieved from <https://public.wmo.int/es/preguntas-frecuentes-clima>
- Palomeque, X., Maza, A., Iñamagua, J., Günter, S., Hildebrandt, P., Weber, M., & Stimm, B. (2017). Palomeque-2017-Variabilidad intraespecífica en la calidad de semillas. *Revista de Ciencias Ambientales Tropical Journal of Environmental Sciences*, 51(2), 52–72. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15359/rca.51-2.3>
- Paredes, F., & Guevara, E. (2010). Desarrollo y Evaluación de un Modelo para Predecir Sequías Meteorológicas en los llanos de Venezuela. *Bioagro*, 22, 3–10. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2014.23-2.11>
- Plant Conservation Alliance. (2015). National Seed Strategy for Rehabilitation and



- Restoration, i-50. Retrieved from <http://www.blm.gov/ut/st/en/prog/more/CPNPP/0/seedstrategy.html>
- Quinn, G., & Keough, M. (2002). *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. United Kingdom: The Press syndicate of the University of Cambridge. Retrieved from www.cambridge.com
- Ravelo, A. ., Sanz, R., & Douriet, J. C. (2014). Detección , evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, México. *Agriscientia*, 31(1), 11–24.
- Restrepo, M., & Murillo, J. (2007). Manejo de las Semillas y la Propagación de Diez Especies Forestales del Bosque Andino. *Boletín Técnico Biodiversidad No.1*, 72. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Rivera, J. A. (2014). *Aspectos climatológicos de las sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. Análisis regional y proyecciones futuras*. Universidad de Buenos Aires.
- Secchi, D., & Arcuri, C. R. (2016). relacionada con la salud en el ámbito escolar: un enfoque práctico para interpretar e informar los resultados, *XXVIII(1)*, 67–87.
- Secretaría de Gestión de Riesgos. Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos. (2017). Reporte de Incendios Forestales 2017. Guayaquil. Retrieved from <http://gestionriesgosec.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=82fe0f0a6c464b99964f5afddd58c9dc>
- Sevik, H., & Cetin, M. (2016). Effects of water stress on seed germination for select landscape plants. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24(2), 689–693. <https://doi.org/10.15244/pjoes/30119>
- Sierra, R. (1999). Propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador continental. *Proyecto INEFAN/GEF-BIRF ECOCIENCIA*, (Quito-Ecuador).
- Steinemann, A. (2003). October Drought Indicators And Triggers: A Stochastic Approach to Evaluation 1. *Journal of The American Water Resources Association*, 155.
- The International Seeds Testing Association (ISTA). (2007). *International Rules for Seed Testing* (2007/1). Bassersdorf, CH Swiezerland.



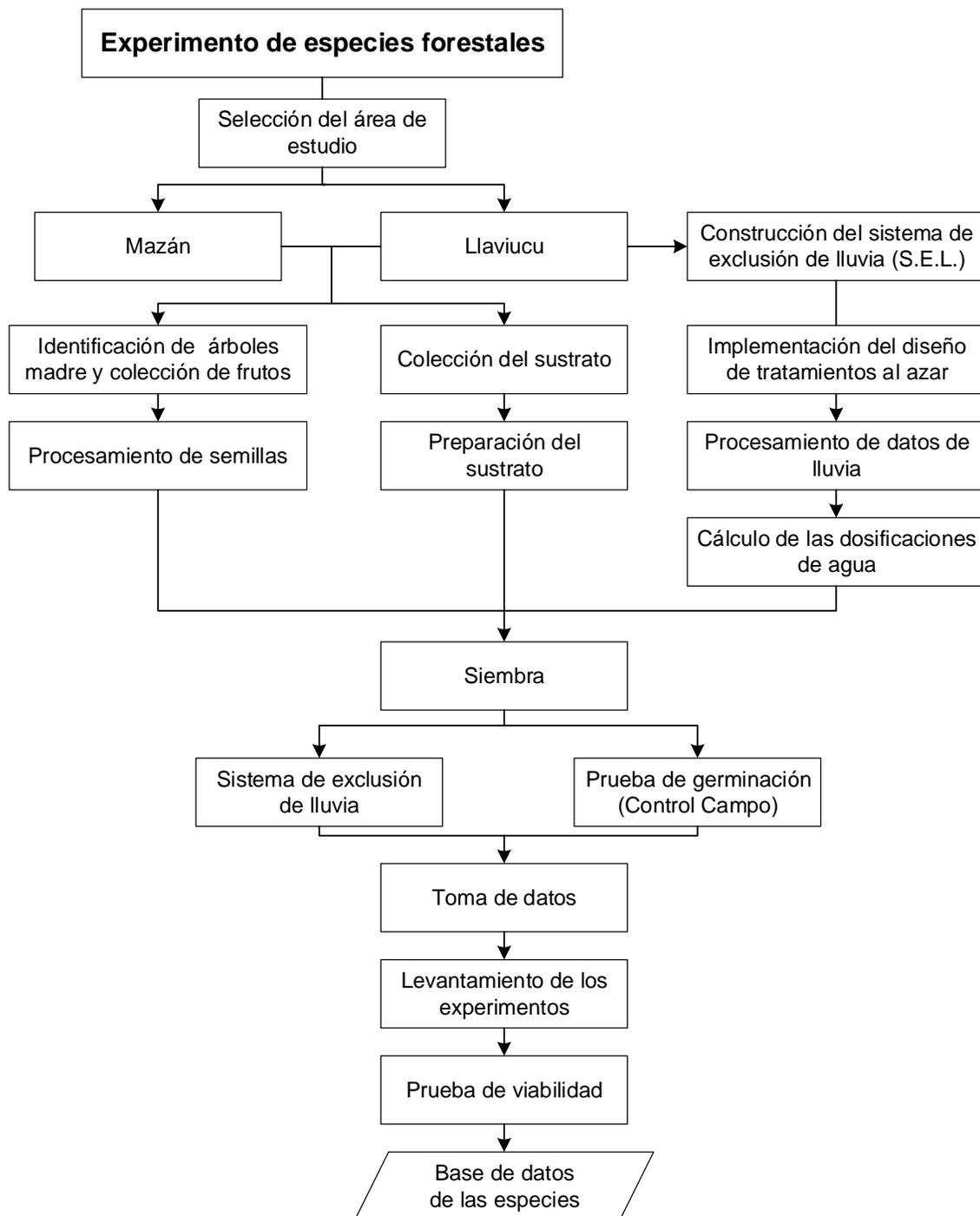
- Tobón, C. (2009). *Los Bosques Andinos y el Agua* (Serie inve). Quito: Programa Regional ECOBONA - INTERCOORPORATION, CONDESAN.
- Topacoglu, O., Hakan, S., & Akkuzu, E. (2016). Effects of Water Stress on Germination of *Pinus Nigra* Arnold. *Seeds*, 48(2), 447–453.
- Trenberth, K. E., Dai, A., Schrier, G. Van Der, Jones, P. D., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014a). Global warming and changes in drought, 17–22. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2067>
- Trenberth, K. E., Dai, A., Schrier, G. Van Der, Jones, P. D., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014b). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 17–22. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2067>
- UICN. (2009). The Bonn Challenge. Washington. Retrieved from <https://www.iucn.org/theme/forests/our-work/forest-landscape-restoration/bonn-challenge>
- Valiente, Ó. M. (2001). SEQUÍA: DEFINICIONES , TIPOLOGÍAS Y MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN, 26, 59–80.
- Vázquez P, M. Á., & Ulloa, R. (1997). *Estrategia para la conservación de la diversidad biológica en el sector forestal del Ecuador* (Mena, Patr). Quito.
- Vega, F., & Nolasco, H. (1996). Efecto de la temperatura, acidez, iluminación, salinidad, irradiación solar e iluminación sobre la germinación de semillas, (October 2015).
- Vicario, L., García, C. M., Teich, I., Bertoni, J., Ravelo, A., & Rodríguez, A. (2015). Caracterización de las sequías meteorológicas en la región central de la Argentina. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 6(1), 153–165.
- Wilks, D. S. (2006). *STATISTICAL METHODS IN THE ATMOSPHERIC SCIENCES*. (H. T. DMOWSKA, RENATA; HARTMANN, DENNIS; ROSSBY, Ed.) (Second Edi). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*.
- Yigit, N., Sevik, H., & Cetin, M. (2016). World's largest Science , Technology & Medicine Open Access book publisher Determination of the Effect of Drought Stress on the Seed Germination in Some Plant Species. *INTECH*. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.5772/63197>



Zhang, H., & Casey, T. (2000). Verification of Categorical Probability Forecasts. *Weather and Forecasting*, 15(1), 80–89. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2000\)015<0080:VOCPF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2000)015<0080:VOCPF>2.0.CO;2)

ANEXOS

Anexo 1. Diagrama del experimento de especies forestales bajo un sistema de exclusión de lluvia





Para la elaboración del experimento se estudiaron dos especies forestales (Tabla 8) del Parque Nacional Cajas: *Cedrela montana* y *Oreocallis grandiflora*. Primero, se identificaron árboles madre que presentaron visualmente las mejores características fenotípicas, para la colección de semillas. Luego, estas fueron colectadas durante los periodos de fructificación y se extrajeron de mínimo cinco individuos por especie, con la finalidad de mantener la diversidad genética. Las semillas de las especies en estudio fueron colectadas de los bosques Llaviuco y Mazán. En estos bosques fue recolectado el sustrato, que fue esterilizado y utilizado en la siembra de semillas en los tratamientos y el control.

Posteriormente, se tomaron datos de germinación de las dos especies sometidas a cuatro eventos de sequía durante 90 días por cada especie.

Tabla 8. Especies estudiadas y características principales

Especie	Nombre Común	Familia	Estatus ecológico
<i>Oreocallis grandiflora</i>	Gañal	Proteaceae	Sucesión Temprana
<i>Cedrela montana</i>	Cedro	Meliaceae	Sucesión Avanzada

Fuente: Cárdenas, (2015)

El experimento se desarrolló en un sistema de exclusión de lluvia, que está conformado por dos estructuras en donde se ubicaron las macetas y cuatro dosificadores automáticos uno para cada tratamiento.

En el sistema se simularon distintos eventos de sequía. Se agruparon los datos de lluvia de 32 años en series de tiempo semanales, se calculó cuatro percentiles (50, 20, 10 y 5) que representan los eventos de sequía. El percentil 50 simuló un estado normal, el percentil 20 una sequía moderada, el percentil 10 una sequía severa y el percentil 5 una sequía extrema. De esta manera, se calculó el volumen de agua semanal para cada nivel (Tabla 9). Este caudal fue dosificado diariamente en el experimento mediante un sistema de riego automatizado.

**Tabla 9.** Caudal semanal para cada evento de sequía (cm³)

Nº Semana	Percentil 50	Percentil 20	Percentil 10	Percentil 5
1	153	52	1	0
2	130	37	19	1
3	186	44	6	1
4	121	19	7	0
5	126	51	17	3
6	112	41	28	15
7	147	67	22	0
8	114	47	26	7
9	114	18	0	0
10	119	49	18	4
11	114	37	3	0
12	131	53	16	3
13	193	36	1	0
14	159	74	51	23
15	126	37	12	5
16	182	77	57	16
17	178	77	49	19
18	202	102	39	17
19	150	78	43	7
20	161	82	50	25
21	208	104	64	0
22	209	105	46	24
23	278	101	49	2
24	198	130	43	1
25	231	148	85	31
26	219	121	57	0
27	136	81	58	0
28	138	64	22	0
29	159	85	33	0
30	137	36	9	3
31	141	64	35	9
32	119	45	8	0
33	144	72	28	11
34	141	84	35	18
35	110	50	2	0

Se estableció el experimento mediante la siembra de semillas con el sustrato (mezcla de suelos procedentes de Mazán y Llaviuco) en macetas distribuidas de acuerdo a un diseño de tratamientos al azar. Los tratamientos representaron a los cuatro eventos de sequía (Normal, Moderado, Severo y Extremo). Se contó con cinco réplicas y cada una de ellas con 15 semillas, como se muestra en la Figura 6. El número total de semillas para el experimento fue de 300 por especie, distribuidas de la siguiente manera (15 semillas x 5 réplicas x 4 eventos de sequía).

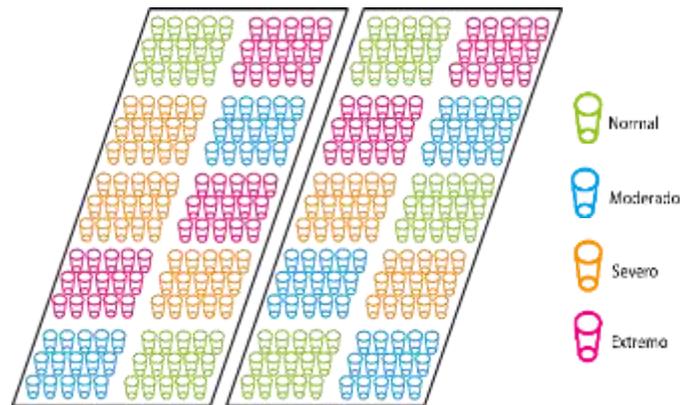


Figura 6. Diseño del experimento de eventos de sequía bajo el sistema de exclusión de lluvia.

La prueba de germinación (control en campo) fue desarrollada en el bosque de Llaviuco. Se realizó la siembra con el sustrato del experimento en recipientes colocados a la altura del suelo. Se emplearon 100 semillas distribuidas en 4 réplicas de 25 semillas cada una. Los datos de germinación de semillas de todo el experimento fueron tomados intercalando un día, durante 90 días.

**Anexo 2.** Matriz de transición de categorías mensuales por año.

AÑO	TRANSICIONES MENSUALES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1976	0-0	0-0	0-0	0-1	1-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-1	1-0	0-0
1977	0-0	0-0	0-0	0-1	1-0	0-1	1-1	1-0	0-0	0-1	1-0	0-1
1978	1-1	1-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-0	0-1
1979	1-1	1-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-1	1-1	1-1	1-0
1980	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
1981	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-2	2-0	0-1	1-0	0-0
1982	0-1	1-0	0-0	0-0	0-1	1-0	0-1	1-0	0-0	0-0	0-0	0-0
1983	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-0	0-1	1-1	1-0	0-1	1-0	0-1
1984	1-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1
1985	1-1	1-1	1-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
1986	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-0	0-1	1-0	0-0	0-0	0-0	0-0
1987	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-0
1988	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
1989	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-0	0-0	0-1	1-1	1-0
1990	0-0	0-1	1-0	0-0	0-0	0-1	1-1	1-1	1-0	0-0	0-0	0-0
1991	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-2	2-1	1-0	0-0	0-0	0-2
1992	2-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-2	2-0	0-0	0-0	0-0	0-0
1993	0-0	0-0	0-0	0-1	1-0	0-0	0-1	1-0	0-0	0-0	0-0	0-0
1994	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0
1995	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-2	2-2	2-0	0-0	0-0	0-0
1996	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-0
1997	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-0	0-0	0-0	0-0	0-0
1998	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-0	0-0	0-0	0-0
1999	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-2	2-2	2-0	0-0	0-1	1-0	0-0
2002	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-2	2-0	0-0	0-0	0-1
2003	1-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-2	2-0	0-0	0-0	0-0	0-2
2004	2-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-0	0-0	0-0	0-0	0-0
2005	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-2	2-1	1-2	2-0	0-0	0-0	0-0
2006	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-1	1-1	1-0	0-0	0-0	0-0
2007	0-1	1-0	0-0	0-0	0-0	0-2	2-0	0-1	1-0	0-0	0-1	1-0
2008	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-1	1-0
2009	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	0-2	2-2	2-1	1-0	0-0	0-0



Anexo 3. Porcentajes de probabilidad de transición de categorías mensuales por año.

ENERO	0	1	2	3	SUMA
0	0,92	0,08	0,00	0,00	1,00
1	0,40	0,60	0,00	0,00	1,00
2	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00
3	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00

FEBRERO	0	1	2	3	SUMA
0	0,96	0,04	0,00	0,00	1,00
1	0,80	0,20	0,00	0,00	1,00
2	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00
3	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00

MARZO	0	1	2	3	SUMA
0	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00
1	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00
2	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00
3	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00

ABRIL	0	1	2	3	SUMA
0	0,91	0,09	0,00	0,00	1,00
1	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00
2	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00
3	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00

MAYO	0	1	2	3	SUMA
0	0,86	0,14	0,00	0,00	1,00
1	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00
2	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00
3	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00

JUNIO	0	1	2	3	SUMA
0	0,71	0,18	0,11	0,00	1,00
1	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00
2	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00
3	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00



JULIO	0	1	2	3	SUMA
0	0,50	0,38	0,13	0,00	1,00
1	0,00	0,60	0,40	0,00	1,00
2	0,33	0,33	0,33	0,00	1,00
3	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00

AGOSTO	0	1	2	3	SUMA
0	0,77	0,23	0,00	0,00	1,00
1	0,54	0,23	0,23	0,00	1,00
2	0,50	0,17	0,33	0,00	1,00
3	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00

SEPTIEMBRE	0	1	2	3	SUMA
0	0,95	0,05	0,00	0,00	1,00
1	0,86	0,14	0,00	0,00	1,00
2	0,80	0,20	0,00	0,00	1,00
3	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00

OCTUBRE	0	1	2	3	SUMA
0	0,79	0,21	0,00	0,00	1,00
1	0,33	0,67	0,00	0,00	1,00
2	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00
3	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00

NOVIEMBRE	0	1	2	3	SUMA
0	0,83	0,17	0,00	0,00	1,00
1	0,75	0,25	0,00	0,00	1,00
2	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00
3	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00

DICIEMBRE	0	1	2	3	SUMA
0	0,73	0,19	0,08	0,00	1,00
1	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00
2	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00
3	0,25	0,25	0,25	0,25	1,00



Anexo 4. Prueba de germinación (Control) de dos especies forestales de acuerdo a los parámetros ISTA 2007.

En el presente estudio se ejecutó una prueba de germinación control en el laboratorio para aislar efectos ambientales que dificulten la capacidad germinativa de las semillas. Primero, se escogieron 400 semillas distribuidas en cuatro réplicas de 100 semillas cada una. Luego, se siguió el protocolo estándar de desinfección de semillas del laboratorio de la Universidad de Cuenca. Esto consiste en lavar las semillas con agua corriente. Inmediatamente, se dispersó y homogenizó 0,5 cm³ de jabón líquido. A continuación, se lavaron las semillas con abundante agua destilada durante tres minutos para remover completamente el jabón. Después, las semillas fueron sumergidas en alcohol por dos minutos y lavadas con agua destilada para retirar los residuos de alcohol.

Posteriormente, en el cuarto de crecimiento del Laboratorio se realizó la siembra de semillas sobre papel absorbente completamente húmedo dentro de cajas Petri. Para evitar contaminación, en el momento de la siembra se utilizó un mechero, guantes, mascarilla y mandil. Finalmente, se dio seguimiento al experimento para mantener el papel absorbente en condiciones húmedas. Los datos de germinación de las semillas fueron tomados intercalando un día durante 90 días. Se puede ver el porcentaje de germinación en la tabla 10.

Tabla 10. Porcentaje de germinación en laboratorio de las especies *C. montana* y *O. grandiflora*

<i>Especie</i>	Réplica	% Germinación	% Germinación (promedio) ± σ
<i>C. montana</i>	1	40	51,5 ± 9,29
	2	48	
	3	58	
	4	60	
<i>O. grandiflora</i>	1	89	93 ± 3,56
	2	91	
	3	96	
	4	96	

Anexo 5. Semáforos para las especies *C. montana* y *O. grandiflora*, tratamientos de sequía analizados con respecto al control de laboratorio

La Tabla 11. muestra que los tratamientos normal, moderado y severo, tienen la mayor probabilidad de éxito clasificada como sin riesgo. En el tratamiento extremo se tiene mediano riesgo y en el tratamiento extremo de mediano riesgo.

Tabla 11. Semáforo para la especie *C. montana*

Color	Tratamiento	Situación	Probabilidad de éxito
	Normal	Sin riesgo	$\geq 75\%$
	Moderado	Sin riesgo	$\geq 75\%$
	Severo	Sin riesgo	$\geq 75\%$
	Extremo	Mediano riesgo	$< 50\%$ y $\geq 25\%$

La Tabla 12. muestra que algunos meses, los tratamiento la especie *O. grandiflora* en los tratamientos normal, moderado y severo tienen una probabilidad de éxito tiene la mayor probabilidad de éxito clasificada como sin riesgo. En los tratamientos normal y severo, tienen la probabilidad de éxito clasificada como bajo riesgo. En el tratamiento extremo tiene la probabilidad de éxito clasificada como alto riesgo.

Tabla 12. Semáforo para la especie *O. grandiflora*

Color	Tratamiento	Situación	Probabilidad de éxito
	Normal	Sin riesgo	$\geq 75\%$
	Moderado	Sin riesgo	$\geq 75\%$
	Severo	Sin riesgo	$\geq 75\%$
	Extremo	Alto riesgo	$< 25\%$



Anexo 6. Pronósticos probabilísticos mensuales de sequía.

Categoría del mes actual	Categoría del mes pronosticado	Probabilidad de ocurrencia de cada categoría											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0	0	0,92	0,96	1,00	0,91	0,86	0,71	0,50	0,77	0,95	0,79	0,83	0,73
	1	0,08	0,04	0,00	0,09	0,14	0,18	0,38	0,23	0,05	0,21	0,17	0,19
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0	0,40	0,80	1,00	0,25	1,00	1,00	0,00	0,54	0,86	0,33	0,75	1,00
	1	0,60	0,20	0,00	0,25	0,00	0,00	0,60	0,23	0,14	0,67	0,25	0,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,40	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	1,00	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,33	0,50	0,80	0,25	0,25	0,25
	1	0,00	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,33	0,17	0,20	0,25	0,25	0,25
	2	0,00	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,33	0,33	0,00	0,25	0,25	0,25
	3	0,00	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,00	0,00	0,00	0,25	0,25	0,25
3	0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	1	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	3	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

Anexo7. Porcentaje de germinación y coeficiente de velocidad de la especie *C. montana*

Tratamiento	Réplica	% Germinación	% Germinación (promedio)	Coef. de velocidad	Coef. de velocidad (promedio)
Normal	1	40	44 ± 20,33	1,62	1,61 ± 0,035
	2	73,33			
	3	33,33			
	4	53,33			
	5	20			
Moderado	1	66,67	53,33 ± 9,43	1,66	1,61 ± 0,035
	2	53,33			
	3	40			
	4	53,33			
	5	53,33			
Severo	1	60	38,67 ± 26,42	1,59	1,57 ± 0,092
	2	73,33			
	3	26,67			
	4	20			
	5	13,33			
Extremo	1	6,67	16 ± 11,16	1,64	1,56 ± 0,045
	2	20			
	3	33,33			
	4	13,33			
	5	6,67			
Control Campo	1	84	61 ± 23,64	1,50	1,48 ± 0,018
	2	64			
	3	68			
	4	28			

**Anexo 8.** Porcentaje de germinación y coeficiente de velocidad de la especie *O. grandiflora*

Tratamiento	Réplica	% Germinación	% Germinación (promedio)	Coef. de velocidad	Coef. de velocidad (promedio)
Normal	1	73,33	78,67 ± 7,3	1,51	1,52 ± 0,033
	2	73,33			
	3	86,67			
	4	73,33			
	5	86,67			
Moderado	1	100	92 ± 10,95	1,51	1,52 ± 0,022
	2	93,33			
	3	93,33			
	4	73,33			
	5	100			
Severo	1	100	92 ± 8,69	1,57	1,52 ± 0,041
	2	93,33			
	3	86,67			
	4	100			
	5	80			
Extremo	1	33,33	22,67 ± 11,16	1,51	1,51 ± 0,053
	2	20			
	3	33,33			
	4	6,67			
	5	20			
Control Campo	1	96	89,07 ± 7,19	1,54	1,55 ± 0,025
	2	94,44			
	3	81,82			
	4	84			