



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/10.01.16.35-TDI

PROCESSOS DE DESERTIFICAÇÃO ASSOCIADOS A PASTAGENS NO CHILE PARA O CLIMA PRESENTE E FUTURO

Rosa Carolina Zamora Aguirre

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Mariane Mendes Coutinho, Angélica Giarolla e Fernando Santibañez Quezada, aprovada em 28 de agosto de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/43BLCK5>>

INPE
São José dos Campos
2020

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/10.01.16.35-TDI

PROCESSOS DE DESERTIFICAÇÃO ASSOCIADOS A PASTAGENS NO CHILE PARA O CLIMA PRESENTE E FUTURO

Rosa Carolina Zamora Aguirre

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Mariane Mendes Coutinho, Angélica Giarolla e Fernando Santibañez Quezada, aprovada em 28 de agosto de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/43BLCK5>>

INPE
São José dos Campos
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Zamora Aguirre, Rosa Carolina.

Za14p Processos de desertificação associados a pastagens no Chile para o clima presente e futuro / Rosa Carolina Zamora Aguirre. – São José dos Campos : INPE, 2020.
xxviii + 101 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/10.01.16.35-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.

Orientadores : Drs. Mariane Mendes Coutinho, Angélica Giarolla e Fernando Santibañez Quezada.

1. Desertificação. 2. Pastagem de terra seca. 3. Produtividade da biomassa. 4. Variabilidade da precipitação. 5. Mudanças climáticas. I.Título.

CDU 504.123(83)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Rosa Carolina Zamora Aguirre**

Título: "PROCESSOS DE DESERTIFICAÇÃO ASSOCIADOS A PASTAGENS NO CHILE PARA O CLIMA PRESENTE E FUTURO."

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Doutor(a)** em **Ciência do Sistema Terrestre**

Dra. Ana Paula Dutra de Aguiar



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado **Reprovado**

Dra. Mariane Mendes Coutinho

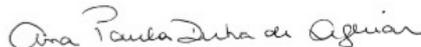


Orientador(a) / IAE/DCTA / São José dos Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado **Reprovado**

Dra. Angélica Giarolla



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado **Reprovado**

Dr. Fernando Santibañez Quezada



Orientador(a) / UCHILE / Chile - CL

Participação por Video - Conferência

Aprovado **Reprovado**

Dr. Flavio Rodrigues do Nascimento



Convidado(a) / UFC / Fortaleza - CE

Participação por Video - Conferência

Aprovado **Reprovado**

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Ciência do Sistema Terrestre

Dr. Marcos Paulo Santos Pereira



Convidado(a) / UFAL / Maceló - AL

Participação por Video - Conferência

Aprovado **Reprovado**

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 28 de agosto de 2020

*Caminante, son tus huellas
el camino y nada más;
Caminante, no hay camino,
se hace camino al andar.
Al andar se hace el camino,
y al volver la vista atrás
se ve la senda que nunca
se ha de volver a pisar.
Caminante no hay camino
sino estelas en la mar.*

Antonio Machado

A meus pais, Rosa e Luis, e a minhas irmãs Dany, Gaby e Barbara

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, Rosa e Luis, minhas irmãs Dany, Gaby e Bárbara, pelo apoio, amor e companhia, além da distância. Também estendo meus agradecimentos aos meus avós, tios e primos.

À vida por me dar a oportunidade de conhecer pessoas maravilhosas no Brasil, que me acompanharam nos últimos anos, obrigada pelo apoio e amor desses últimos anos, tornando-se minha família, “meus amigos de aqui”. Em particular, à minha amiga Aline pela companhia, apoio e o acreditar sempre em mim ... e claro, por compartilhar comigo o amor da Melzinha!

Aos meus amigos de "lá" (no Chile), que apesar da distância, sempre estiveram comigo de algum jeito, por sua confiança, força e amor.

Aos meus orientadores Mariane Coutinho, Angélica Giarolla e Fernando Santibáñez, pelo tempo, apoio e compreensão durante todo aos anos do doutorado. Foi uma sorte escolher vocês.

A toda equipe do CCST e do INPE pelo apoio destes anos. À CAPES pela contribuição financeira desta pesquisa.

RESUMO

A desertificação é um processo de degradação da terra que afeta as regiões áridas, semiáridas e subúmidas do mundo. A baixa precipitação e a concentração das chuvas em poucos meses do ano, associadas à dinâmica de uso da terra, favorecem os processos de perda de vegetação e de erosão hídrica e eólica, que são mecanismos causadores de desertificação. As pastagens das regiões áridas do Chile são fundamentais para a subsistência de pequenas comunidades agrícolas que tem parte de seu sustento baseado no pastoreio de cabras. Esta região apresenta sérios problemas associados à desertificação. O clima caracteriza-se por um regime de precipitações que se concentra em poucos meses, com longos períodos secos durante o ano, e com uma alta variabilidade climática interanual, associada principalmente ao fenômeno “El Niño, Oscilação do Sul”. Além disso, essa região tem sido historicamente sobre explorada por diferentes atividades humanas. Considerando que a desertificação é um processo complexo, que envolve critérios sociais e ambientais, além de ser bastante susceptível às mudanças no uso da terra e às mudanças climáticas, avaliações e critérios interdisciplinares são importantes para um melhor entendimento do problema, de modo a contribuir para melhorar os indicadores, determinar as zonas vulneráveis e auxiliar nos programas de combate à desertificação. O objetivo desta tese foi contribuir com o conhecimento de alguns mecanismos associados a fatores que influenciam os processos de desertificação nas pastagens de regiões áridas de Chile, bem como das possíveis mudanças nesses mecanismos a partir de projeções climáticas futuras. Para isso, investigou-se o impacto das variabilidades interanual e sazonal de variáveis climáticas na biomassa na região de Coquimbo e sua associação à degradação da terra na região, além de pesquisar possíveis mudanças futuras. As análises foram realizadas nos períodos 1980-1999 e 2000-2016 para o presente; e 2020-2044 e 2070-2094 sob cenários climáticos futuros. A produção de biomassa foi simulada utilizando o modelo SIMPRAD, com base em informações climáticas e fisiológicas da vegetação. Os dados meteorológicos utilizados foram obtidos a partir de observações do presente e de projeções climáticas futuras fornecidas por simulações do modelo regional RegCM4. Além disso, foram utilizados dados de NDVI para o período 2000-2016 e mapa de cobertura de solo. Para o presente, a distribuição anual da precipitação apresenta um comportamento bastante distinto entre os dois períodos avaliados, o que também altera a distribuição anual do total de biomassa fornecido pelo modelo SIMPRAD. No primeiro período, o acúmulo máximo de biomassa ocorre em julho, juntamente com o máximo de chuva. Já no segundo período, a biomassa começa a crescer mais cedo, levando a um alto acúmulo de biomassa em junho para em seguida apresentar um declínio em julho, provavelmente associado à queda de temperatura normal nessa época do ano, em conjunto com uma redução na chuva para este mês no segundo período de análise. Nas projeções futuras, os máximos de precipitação se mantêm em

junho, mas a biomassa e o seu máximo acumulado são diferentes para os dois períodos futuros, provavelmente devido a mudanças na distribuição da precipitação anual e de outras variáveis como temperaturas médias e mínimas. Os resultados da aplicação do método RESTREND mostram grande parte da região com problemas de degradação, que seriam independentes das chuvas, principalmente do tipo antrópico, mas mudanças nas chuvas poderiam agravar os problemas de desertificação na região. Alterações no regime de chuva são importantes, não somente em termos de quantidade, mas também em relação a como esta quantidade se distribui no ano, afetando a produção de biomassa em localidades vulneráveis do ponto de vista tanto climático quanto socioeconômico. Por sua vez, mudanças na cobertura vegetal podem aumentar os processos de degradação nesta região.

Palavras-Chave: Desertificação, Regiões áridas, Produtividade da biomassa, Variabilidade da precipitação, Mudanças climáticas.

DESERTIFICATION PROCESSES ASSOCIATED WITH PASTURES IN CHILE FOR THE PRESENT CLIMATE AND FUTURE CLIMATE SCENARIOS

ABSTRACT

The desertification is the soil degradation process the lost of vegetation and which affect the semi-arid and sub-humid areas in the world. The low precipitation and its concentration in few months of the year, associated to the land use dynamics, favor the lost of vegetation and the water and wind erosion, which are the mechanisms that causes desertification. The pasture in dry land in Chile is central to the subsistence of agricultural communities that have part of their sustenance based in the grazing goats. This area presents serious problems related to the desertification. The region is characterized by a rainfall regime that is concentrated in a few months, with long dry periods in the year, and also with a high climatic variability, as consequence of the “El Niño, Oscilação do Sul”. Besides, the area has been over explored by human activity, as agriculture and livestock. The desertification is a complex process which evolve social and environmental criteria, besides being quite susceptible to land use and climate changes. For these reasons, it needs interdisciplinary assessments and criteria for a better understanding of the problem, in order to be able to contribute to improve the indicators, determine the vulnerable zones and help with programs to combat desertification. The objective of this thesis was to contribute with the knowledge of some mechanisms associated with factors that influence desertification processes in Chile's dry land pastures, and the possible changes in these mechanisms in the future climate projections. To achieve this goal, the seasonal and interannual variability of climate variables can affect the biomass in the Coquimbo Region, in Chile, and how it can be associated to its degradation, and also evaluate possible changes that may happen in the future. The analysis was made using two different periods: 1980-1999 and 2000-2016 to the present and 2020-2044 and 2070-2094 to the future projections. The biomass was simulated using the SIMPRAD model, with basis on the climate and physiological characteristics of vegetation information. The meteorological data was obtained from observation in the present and from projections using the RegCM4 model to the future. The NDVI and land cover map was also used in the evaluations. To the present, the annual distribution of precipitation presents a distinct behavior in the two periods, which changes the total biomass distribution during the year. In the first period, the biomass maximum occurs in July, while in the second period the biomass start growing earlier and presents a reduction in July, probably related to the low temperature, common at this time of the year, together with a reduction in the precipitation in this month to the second period. In the future projections, the precipitation maximum still in June, but the accumulated biomass maximum change between

periods, probably due to changes in the precipitation distribution in the year and in others variables, as minimum and mean temperature. The results using the RESTREND method show a large area of Coquimbo with potential degradation, independent of the precipitation. If included, the precipitation changes could aggravate the desertification in the region. Thus, changes in the rainfall are important, not only in quantity, but also in how this quantity is distributed in the year, affecting the biomass production in a location that shows to be vulnerable from both a climatic and socioeconomic point of view. Changes in the land cover can also intensify the degradation in this area.

Keywords: Desertification, Dryland grassland, productivity of biomass, rainfall variability, climate change, Agro-climatic modeling.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 - Distribuição geográfica das terras áridas. Delimitadas com base no Índice de Aridez (IA).....	9
Figura 1.2 - Diagrama representando as influências humanas e climáticas sobre a pastagem	10
Figura 1.3 - Pressão atmosférica média ao nível do mar, para os meses de a) inverno austral (junho, julho e agosto) e b) verão austral (dezembro, janeiro, fevereiro) para a América do Sul.....	13
Figura 1.4 - Índice pluviométrico no Chile.	14
Figura 2.1 - Localização e cobertura do solo na região de Coquimbo, Chile (2014), e localidades selecionadas para estudo.	22
Figura 2.2 - Mapa de altimetria na região de Coquimbo	23
Figura 2.3 - Função da regulação térmica do crescimento.	25
Figura 2.4 - Diagrama de funcionamento do modelo SIMPRAD	29
Figura 2.5 - Diagrama do funcionamento SIMPRAD-DEG.....	32
Figura 2.6 - Regressão linear entre precipitação e NDVI e tendência no resíduo.	34
Figura 3.1 – Biomassa de pastagens (kg/ha) e precipitação anual (mm) para La Serena e Vicuña.....	45
Figura 3.2 – Biomassa de pastagens (kg/ha) e precipitação anual (mm) para Ovalle, Punitaqui e Combarbala.....	46
Figura 3.3 – Biomassa de pastagens (kg/ha) e precipitação anual (mm) para La Canela, Illapel, Salamanca e Los Vilos.	47
Figura 3.4 – Médias mensais da biomassa acumulada (kg/ha) e da precipitação (mm). 49	
Figura 3.5 - Médias de precipitação (mm) e biomassa acumulada (kg / ha) para os períodos P1 e P2.....	50
Figura 3.6 – Comparação da ETP para o mês de julho entre algumas das localidades estudadas no presente.	51

Figura 3.7 - Número de semanas com precipitação por ano para o presente em algumas localidades.....	52
Figura 3.8 - Tendência da precipitação anual (mm/ano) de maio a novembro para a região de Coquimbo no presente.....	56
Figura 3.9 - Tendência da temperatura média (°C/ano) de maio a novembro para a região de Coquimbo no presente.....	57
Figura 3.10 - Tendência da temperatura máxima (°C/ano) de maio a novembro para a região de Coquimbo no presente.....	58
Figura 3.11 - Tendência da temperatura mínima (°C/ano) de maio a novembro para a região de Coquimbo no presente.....	59
Figura 3.12 - Total de dias úmidos (de maio a novembro) para a região de Coquimbo no presente.....	60
Figura 3.13 - Máximo número de dias secos consecutivos (de maio a novembro) para a região de Coquimbo no presente.....	61
Figura 4.1 - Médias de precipitação (mm) e biomassa acumulada (kg / ha) para os períodos P1-proj e P2-proj.	64
Figura 4.2 - Médias mensais da biomassa acumulada (kg / ha) e da precipitação (mm).	66
Figura 4.3 - Número de semanas com precipitação por ano para as projeções em Ovalle e Punitaqui.	67
Figura 4.4 – Médias semanais de precipitação e biomassa acumulada em Ovalle, Punitaqui e Illapel para o segundo período das projeções futuras...	68
Figura 4.5 - Comparação da ETP em Illapel e Salamanca no mês de julho para as projeções futuras.....	68
Figura 4.6 - Tendência da projeção da precipitação (mm/ano) de maio a novembro para a região de Coquimbo.....	70
Figura 4.7 - Tendência da projeção da temperatura média (°C/ano) de maio a novembro para a região de Coquimbo.....	71
Figura 4.8 - Tendência da projeção da temperatura máxima (°C/ano) de maio a novembro para a região de Coquimbo.....	72

Figura 4.9 - Tendência da projeção da temperatura mínima (°C/ano) de maio a novembro para a região de Coquimbo.....	73
Figura 4.10 - Total de dias úmidos projetados (de maio a novembro) para a região de Coquimbo.....	74
Figura 4.11 – Total de dias secos consecutivos projetados (de maio a novembro) para a região de Coquimbo.....	75
Figura 5.1 - Relação espacial entre o NDVI médio e a soma da precipitação e tendência dos resíduos do NDVI observado e o previsto	78
Figura 5.2. Relação espacial entre o NDVI médio e a soma da precipitação e tendência dos resíduos do NDVI pra El Trapiche, La Serena e Vicuña.	79
Figura 5.3 - Relação espacial entre o NDVI médio e a soma da precipitação e tendência dos resíduos do NDVI pra Monte Grande, Hurtado e Ovalle.	81
Figura 5.4 - Relação espacial entre o NDVI médio e a soma da precipitação e tendência dos resíduos do NDVI pra Punitaqui, Combarbala e La Canela. .	82
Figura 5.5 - Relação espacial entre o NDVI médio e a soma da precipitação e tendência dos resíduos do NDVI pra Illapel, Salamanca e Los Vilos.....	83
Figura 5.6 - Capacidade de carga das pastagens para todas as localidades ..	85
Figura 5.7. Média da biomassa máxima (kg/ha) para todas as localidades	86
Figura 5.8. Carga animal (UA/ha) e Estado de conservação da pastagem (%) para Ovalle.....	88

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Variáveis de entrada usadas nas simulações do modelo SIMPRAD no presente e no futuro.	30
Tabela 3.1 - Relação entre a soma do NDVI e a biomassa acumulada (kg/ha) simulada pelo modelo SIMPRAD para o período 2000-2016 entre os meses de maio e novembro.	42
Tabela 3.2 - Relação entre a precipitação em mm e a biomassa (kg/ha), 10 simulada pelo modelo SIMPRAD para diferentes períodos.	43
Tabela 3.3 - Média da precipitação total anual (mm) (esquerda) e precipitação total anual máxima (mm) (direita) nos períodos 1980-2016, 1980-1999 e 2000-2016 para todas as localidades.	44
Tabela 4.1 - Média da precipitação total anual (mm) (esquerda) e precipitação total anual máxima (mm) (direita), nos períodos 2020-2044 e 2070-2094 para todas as localidades.....	62
Tabela 4.2. Relação entre a precipitação e a biomassa simulada pelo modelo SIMPRAD para os períodos 2020-2044 e 2070-2094.....	63

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AGRIMED	Centro de Agricultura e Meio Ambiente (AGRIMED)
APS	Anticiclone do Pacífico Sul (APS),
APS	Anticiclone do Pacífico Sul
AR5,	Fifth Assessment Report
BIOM	Biomassa
BIOMt	Biomassa aérea total
CApot	Capacidade de Carga animal (CC) baseada apenas nas condições climáticas
CAreg	Carga animal de regeneração
CA	Carga animal
CAsus	Carga animal para um estado sustentável
CC	Capacidade de carga animal
CMIP5	Quinta fase do Coupled Model Intercomparison Project
CONAF	Corporação Nacional Florestal
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CR2	Centro do Clima e a Resiliência
CR2	Center for Climate and Resilience Research
CR2MET	The Center for Climate and Resilience Research Meteorological dataset
CREr	Crescimento real da pastagem
CREt	Taxa de crescimento potencial da pastagem
CRU-JRA	Climatic Research Unit- Japanese Reanalysis
DGA	Dirección General de Aguas
DMC	Dirección Meteorológica de Chile
Ef	Eficiência fotossintética
ENSO	El Niño, Oscilação do Sul
EP	evaporação potencial
Et	A evapotranspiração da pastagem
ETP	evapotranspiração potencial

GEE	gases de efeito estufa
GLDAS	Global Land Data Assimilation System
HadCM3	Hadley Center Model, versão 3
IA (IA)	índice de aridez
IAF	índice de área foliar
MCGs	Modelos de Circulação Geral
MCRs	Modelos Climáticos Regionais
MIROC5	Model for Interdisciplinary Research On Climate
MODIS LST	Moderate resolution imaging spectroradiometer - Land Surface Temperature
MPI-ESM	Max Planck Institute Earth System Model
MS	Mega Seca
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NLHPC	Laboratório Nacional de Computação de Alto Rendimento
P	Pressão do ar
P1	Período 1980-1999
P1-proj	Periodo 2020-2044
P2	Período 2000-2015
P2-proj	Periodo 2070-2094
PARo	Radiação fotossinteticamente ativa incidente
PDO	Oscilação Decadal do Pacífico do inglês Pacific Decadal Oscillation
PRECIS	Providing Regional Climates for Impact Studies
PU	Pressão de uso
R	Rorrelação de Pearson
RCPs	Representative Concentration Pathways
RegCM4	do inglês Regional Climate Model, version 4
RESTREND	Tendência do resíduo
RI	Radiação solar líquida
RS	Radiação solar mensal
RUE	Rainfall Use efficiency
SEN	Senescência natural
SIMPRAD,	Simulador de Praderas

SIMPROC	Simulador da Produtividade dos Cultivos
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
SSP2	Shared Socioeconomic Pathways
T	Temperatura média do ar
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification
UR	Umidade Relativa
WRF	Weather Research and Forecasting)

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Albedo foliar
B	Coeficiente associado à velocidade do vento
β	Coeficiente de cada tipo de pastagem
BU	Fração de biomassa útil
C	Fator de relação (C) entre o observado e o modelado para cálculo de fator de correção de bias
CT	Coeficientes térmicos
Δ	Curva de pressão de saturação
E_a	Evaporação associada a processos aerodinâmicos
e	Pressão de vapor
E_r	Evaporação associada ao balanço de energia
e_s	Pressão de vapor de saturação
FH	Fator água da produção
K_e	Coeficiente de extinção da luz dentro da forragem
K_h	Coeficiente que depende da textura do solo, da demanda atmosférica e do tipo de pastagem
k_{max}	ET / ETP quando a pastagem cobre completamente o solo
K_y	Fator de sensibilidade da pradaria ao déficit hídrico
ETmax	Et quando FH = 1
γ	Constante psicométrica
KA	Consumo animal
K_c	Índice da cultura
l_v	Calor latente de vaporização
nanos	Número de anos considerados no período histórico
q	Umidade específica
ρ_w	Massa específica da água
T_u	Temperatura limiar de crescimento
T_o	Temperatura ótima
σ	Constante psicrométrica

T_{mx}	Temperatura máxima de crescimento da biomassa
u	Velocidade do vento
z_1	Altura da medida de velocidade do vento
z_2	Altura de rugosidade da superfície

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
1.1. Hipótese e objetivos	5
1.1.1. Hipótese	5
1.1.2. Objetivo geral	5
1.1.3. Objetivos específicos.....	5
1.2. Revisão bibliográfica	6
1.2.1. Desertificação: definições, causas e regiões de ocorrência	6
1.2.2. As regiões áridas do Chile e suas condições climáticas	11
1.2.3. Mudanças climáticas	17
2. MATERIAL E MÉTODOS	21
2.1. Área de estudo	21
2.2. Metodologia.....	23
2.2.1. Modelo SIMPRAD (simulador da produção das pastagens)	23
2.2.2. Método RESTREND (tendência do resíduo)	32
2.3. Dados	35
2.3.1. Presente	35
2.3.2. Cenários climáticos futuros	38
3. IMPACTOS DA VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO EM PASTAGENS DA REGIÃO DE COQUIMBO NO CLIMA PRESENTE	41
3.1. Variabilidade climática e biomassa das pastagens na região de Coquimbo.....	41
3.1.1. Precipitação e produção de pastagens	41
3.1.2. Tendências e índices climáticos.....	55
4. PROJEÇÕES FUTURAS: VARIABILIDADE CLIMÁTICA E BIOMASSA DAS PASTAGENS NA REGIÃO DE COQUIMBO	62
4.1. Séries temporais de projeções futuras de precipitação anual e biomassa anual	62
4.2. Tendências e índices climáticos em projeções futuras	69

5. DEGRADAÇÃO DAS PASTAGENS NA REGIÃO DE COQUIMBO	76
5.1. Degradação das pastagens através do método RESTREND	76
5.2. Capacidade de carga e carga animal.....	84
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	89
6.1. Trabalhos futuros	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A desertificação é um processo de degradação das terras que ocorre em regiões áridas, semiáridas e subúmidas¹ devido a variações climáticas e atividades humanas, principalmente devido às dinâmicas de uso da terra (UNCCD (Convenção das Nações Unidas para o Combate à Desertificação, do inglês *United Nations Convention to Combat Desertification*), 1994; D'ODORICO et al., 2013). De forma mais específica, a desertificação pode ser compreendida como a perda da produtividade biológica ou econômica do solo que, na maior parte dos casos, implica numa perda persistente da vegetação (D'ODORICO et al., 2013).

As regiões onde são identificados processos de desertificação caracterizam-se por serem muito vulneráveis a processos de degradação devido à alta variabilidade climática, com precipitações que se concentram em poucos meses do ano e com uma alta probabilidade de secas, incluindo eventos em anos seguidos (D'ODORICO et al., 2013). Essas ocorrências de secas constituem um importante fator climático associado à desertificação, que também torna mais acentuadas as consequências da ação humana (MORALES; PARADA, 2005).

Entre os fatores pertinentes à ação humana que atuam na desertificação, destacam-se o desmatamento, a extração florestal excessiva, os incêndios florestais, o sobrepastoreio (BEZERRA, 2016), a utilização e o manejo não sustentáveis do solo e o uso de tecnologias não apropriadas para ecossistemas frágeis. A extração de biomassa dos ecossistemas é uma das mais importantes intervenções condutoras de desertificação, pois pode acarretar a redução da proteção dos solos, tornando-os mais vulneráveis à ação erosiva do vento ou da água. A erosão da camada superficial do solo reduz a fertilidade e a capacidade de retenção de água, o que contribui para a retroalimentação da deterioração da cobertura vegetal, agravando o processo

¹ De aqui na frente se chamara de regiões áridas as regiões áridas, semiáridas e subúmidas (Verbist et al., 2010)

de desertificação (UNCCD, 1994; SANTIBÁÑEZ; SANTIBÁÑEZ, 2007). Do ponto de vista agrícola, a desertificação necessariamente ocasiona queda na produtividade e, conseqüentemente, leva à marginalização da agricultura local (SANTIBÁÑEZ; SANTIBÁÑEZ, 2007).

As regiões áridas cobrem aproximadamente 41% da superfície terrestre do planeta, sendo que, deste total, estima-se que 70% sofra algum processo de desertificação. Na América do Sul, três quartos das regiões áridas, semiáridas e subúmidas apresentam problemas de desertificação (DE NYS et al., 2016). No Chile, 58% de seu território corresponde a regiões áridas (VERBIST et al., 2010). PANCD, 2016, indicou que 22% da superfície do Chile apresentava algum grau de desertificação, o que corresponde a 16.379.342 hectares, com uma população de 31,9% do total. Na zona norte do país, a região de Coquimbo, é a que apresenta uma superfície maior com risco de desertificação grave, com 2.243.834 hectares, afetando a mais de 400 mil pessoas. (EMANUELLI et al., 2016), sendo o sobrepastoreio uma de suas principais causas (SALINAS, 2011), intensificada por fatores climáticos adversos (CASANOVA et al., 2013).

As pastagens das regiões áridas são fundamentais para a subsistência de pequenas comunidades agrícolas que têm parte de seu sustento baseado no pastoreio, sendo na região de Coquimbo, principalmente, o das cabras. Uma vez que esse sustento depende de pastagens de sequeiro, processos de desertificação agravados pela alta variabilidade climática podem exacerbar problemas econômicos e sociais associados à vulnerabilidade dos recursos naturais (SALCEDO; GUZMAN, 2014). Considera-se uma pastagem como “de sequeiro” quando a disponibilidade de água para o crescimento das plantas provém só da precipitação. O ciclo produtivo das regiões áridas do Chile inicia-se com as primeiras chuvas de outono, e pode se desenvolver pouco devido às baixas temperaturas no inverno, retomando seu crescimento mais no final da estação de inverno (TURNER, 2004).

Alterações nas condições climáticas podem conduzir a alterações na estrutura e funcionamento da vegetação, afetando o balanço da água nestes

ecossistemas (CHEN et al., 2014). O crescimento das pastagens responde fortemente a extremos de precipitação, sendo que esta resposta pode ser associada à intensidade e duração dos eventos e aos intervalos entre ocorrências (SWEMMER et al., 2007). A vegetação na região semiárida do Chile está adaptada a condições de alta variabilidade climática (GRANADOS-SÁNCHEZ et al., 2011), sendo que a distribuição e o crescimento das pastagens estão associados a esta variabilidade climática. No entanto, a ocorrência de anos com um atendimento hídrico favorável pode levar a um aumento do número de animais por hectare, de modo a ocasionar problemas de sobrelotação de animais em anos seguintes que se apresentarem mais secos. Esse pastoreio excessivo pode ter como consequência a degradação das pastagens (SANTIBÁÑEZ; SANTIBÁÑEZ, 2007).

A forte variabilidade climática no Chile e, especificamente, na sua região árida, inclui anos com secas e com precipitação acima da média associadas ao El Niño, Oscilação do Sul (ENSO), em sua fase “El Niño” e “La Niña”, respectivamente (MONTECINOS e ACEITUNO, 2003). A variabilidade climática sazonal se caracteriza pela concentração da precipitação em poucos meses da estação de inverno, principalmente entre junho e agosto, devido ao predomínio do Anticiclone do Pacífico Sul (APS), que apresenta um deslocamento para o norte no inverno austral e para o sul no verão austral, associado aos máximos de radiação solar, de modo a permitir que as frentes frias associadas a ciclones migratórios, guiadas pelo fluxo de oeste, contribuam com precipitação na região por volta do inverno (GARREAUD; ACEITUNO, 2002). Essas características climáticas das regiões áridas de Chile têm levado a uma exploração excessiva dos recursos naturais ao longo da história do país (SANTIBÁÑEZ; SANTIBÁÑEZ, 2007).

Garreaud et al. (2019) mostraram que a precipitação na região centro-norte do Chile, que inclui a região árida, tem experimentado desde o ano 2010 uma diminuição de aproximadamente 30%. De modo distinto das secas historicamente observadas, essa longa seca, que vem sendo chamada de “Mega Seca” (MS), tem ocorrido principalmente em condições de ENSO neutro.

Precipitações intensas e mudanças na distribuição das chuvas ao longo do ano também podem afetar a produção de biomassa das pastagens. Sarricolea et al. (2019) encontraram uma tendência positiva no índice de concentração diário das precipitações na região semiárida chilena, o que estaria associado a uma mudança na distribuição anual das chuvas entre 1965 e o 2015. Meza (2013), usando um índice padronizado da evapotranspiração, observou um aumento nas tendências de frequência de secas, principalmente no vale de Limari, na região de Coquimbo, para o período de 1970 a 2011. Glade et al. (2016) encontraram, que as características da precipitação levaram a uma diminuição na produtividade da vegetação no vale do Limari em praticamente todos os locais do estudo em altitudes abaixo dos 2000 m durante o período 2000-2013.

Projeções futuras fornecidas por modelos climáticos globais mostram um aumento na frequência e na intensidade de eventos extremos nas regiões semiáridas do mundo (PACHAURI et al., 2014). Para o Chile, projeções climáticas obtidas utilizando-se o modelo RegCM4 (Regional Climate Model versão 4), com resolução espacial de 10 km, para regionalizar as projeções do modelo global “Max Planck Institute Earth System Model” (MPI-ESM), mostram uma diminuição na precipitação na região semiárida para o período 2021-2050 sob os cenários RCP2.6 (~20%) e RCP8.5 (~10%). Em relação à temperatura, essas projeções indicam uma maior frequência de noites e eventos quentes (ROJAS et al., 2018). Projeções futuras de produtividade da vegetação natural no vale de Limari, em diferentes cenários climáticos, mostram uma possível diminuição da produtividade em torno ao 12% no período 2060-2100, o que poderia levar a uma degradação severa da vegetação (GLADE et al., 2016).

A desertificação é um processo que envolve uma cadeia complexa de causa e consequências entre fatores ambientais e socioeconômicos. Assim, para o entendimento do processo de desertificação, seria desejável dispor de modelos conceituais que integrassem a relação que existe entre as componentes físicas, biológicas, políticas e sociais das áreas onde ocorrem (PANCD, 2016). No entanto, devido à complexidade extrema envolvida em estudar todos os fatores e processos associados à desertificação, esta pesquisa se propõe a

estudar possíveis relações/mecanismos associados ao problema, considerando especificamente as pastagens da região de Coquimbo nos contextos de variabilidade climática e de mudanças climáticas, usando diferentes ferramentas, como dados de estações meteorológicas e modelagem agroclimática. Devido à falta de medições de campo de biomassa das pastagens, considera-se a modelagem agroclimática como um instrumento útil para auxiliar no entendimento dos processos envolvidos na relação entre a produção de biomassa e a variabilidade climática, bem como dos possíveis impactos das mudanças climáticas, que podem levar a uma intensificação dos processos de desertificação na região.

1.1. Hipótese e objetivos

1.1.1. Hipótese

A variabilidade do clima e as mudanças climáticas podem afetar profundamente o estado de conservação das pastagens, tornando-se um importante fator de desertificação nas regiões áridas do Chile.

1.1.2. Objetivo geral

Contribuir com conhecimento de alguns mecanismos associados a fatores climáticos e de manejo animal nas pastagens das regiões áridas de Chile que influenciam os processos de desertificação; e pesquisar possíveis mudanças nesses mecanismos a partir de projeções climáticas futuras.

1.1.3. Objetivos específicos

1. Entender como a produção da biomassa das pastagens das regiões áridas de Chile, a partir de simulações agroclimáticas (utilizando o modelo SIMPRAD), é influenciada pela variabilidade climática nas últimas décadas (1980-2016).

2. Avaliar como mudanças climáticas podem afetar a produção da biomassa das pastagens das regiões áridas de Chile, utilizando simulações agroclimáticas (SIMPRAD) e projeções climáticas futuras (RegCM4/MPI-ESM).
3. Avaliar os efeitos que pode ter a variabilidade climática na degradação da vegetação nas regiões áridas do Chile.
4. Explorar como a carga animal pode influir nos processos de degradação nas regiões áridas, a partir de experimentos com o modelo agroclimático SIMPARD e evidências de degradação no presente.
5. Fornecer conhecimentos que permitam o estabelecimento de sistemas de produção mais sustentáveis em regiões áridas, para prevenir a desertificação.

1.2. Revisão bibliográfica

1.2.1. Desertificação: definições, causas e regiões de ocorrência

O conceito de desertificação tem sido modificado no tempo, com controvérsias em relação à sua definição e confusão com outros termos, como “desertização”, por exemplo, que se trata do processo evolutivo normal de uma região para condições morfológicas, climáticas e ambientais conhecidas como deserto, onde a natureza alcança certa estabilidade; e não depende do homem (MORALES; PARADA, 2005). A UNCCD (1994) é responsável por uma das definições oficiais para o termo desertificação, como se segue: “A degradação das terras em zonas áridas, semiáridas e subúmidas devido às variações climáticas e às atividades humanas”. Uma definição que complementa a definição da UNCCD é a de D’odorico et al. (2013), onde se considera a desertificação como a perda de serviços ambientais fundamentais para a manutenção da vida. Essa perda pode resultar de uma perda de produtividade biológica ou econômica do solo que, na maioria dos casos, implica em um aumento persistente de perda de vegetação, provocando solos desnudos.

A UNCCD (1994) define terra como *“o sistema bioproductivo terrestre que inclui vegetação, solo, outros componentes da biota e os processos ecológicos e*

hidrológicos que se desenvolvem dentro do sistema”; e a degradação da terra como:

“Redução ou perda de produtividade biológica ou econômica e da complexidade das terras agrícolas de sequeiro, das terras de culturas de irrigação e das pastagens, ocasionadas, em zonas áridas, semiáridas e subúmidas, pelos sistemas de utilização da terra ou o processo ou uma combinação de processos, incluídos os resultantes de atividades humanas e padrões de povoamento”.

A UNCCD (1994) indica como algumas das causas principais de degradação da terra: a erosão hídrica e eólica do solo, a deterioração das propriedades físicas, químicas e biológicas ou das propriedades econômicas do solo e a perda prolongada da vegetação natural. O fenômeno pode começar com a degradação da cobertura vegetal, devido a diferentes demandas da população. A seguir, com um regime de chuvas irregulares e muitas vezes intensas, começam os processos erosivos, com a diminuição da capacidade de retenção de água nos solos e a consequente redução da biomassa. Nesse caso, a vegetação torna-se cada vez mais escassa, favorecendo que a radiação solar atinja mais o solo e acelere a erosão, aumentando a aridez e retroalimentando o processo (PACHECO et al., 2006). A regeneração da vegetação em muitas regiões áridas acontece só a cada 5 a 7 anos, com dois anos sucessivos de condições favoráveis (CASANOVA et al., 2013). Morales e Parada (2005) destacam como fatores humanos que conduzem à degradação da terra, o desmatamento, a extração excessiva de produtos florestais, queimadas, a sobrecarga animal, o uso intensivo do solo e o manejo inadequado de tecnologias não apropriadas para ecossistemas frágeis. Nesse mesmo trabalho, as recorrentes e prolongadas secas são apontadas como uma causa climática. A desertificação resulta, portanto, de complexas interações entre fatores biofísicos e humanos, em diversas escalas espaciais e temporais, com

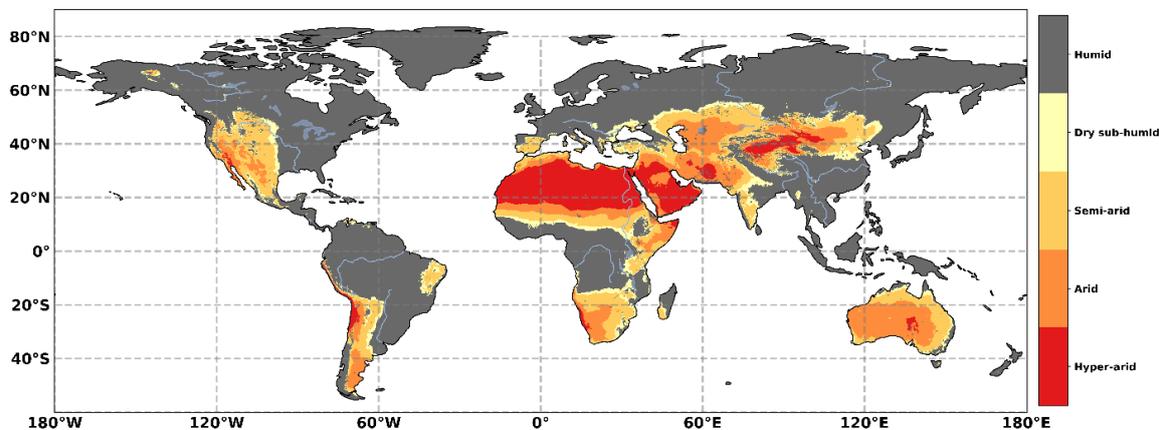
uma difícil quantificação (REID et al., 2005; REYNOLDS et al., 2007; D'ODORICO et al., 2013).

De acordo com as definições de desertificação, a degradação da terra deve ocorrer em regiões áridas. O programa nas Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 1992) define o índice de aridez (IA) como a relação entre a precipitação e a evapotranspiração potencial (ETP) e classifica como zonas áridas, semiáridas e subúmidas as regiões onde o IA tem valores entre 0,05 e 0,65. Dessa forma, as condições climáticas são associadas à disponibilidade de água no solo, dependendo da entrada de precipitação, das perdas por evapotranspiração e das propriedades do solo (D'ODORICO et al., 2013). Existe uma distinção fundamental entre a aridez e as secas: o primeiro é um fenômeno climático de longa duração, enquanto que o segundo refere-se a um fenômeno temporário (MALIVA; MISSIMER, 2012).

As regiões áridas (Figura 1.1) ocupam cerca de 41% da superfície terrestre (REID et al., 2005), com aproximadamente 3 bilhões de habitantes. Para o ano 2050, projeta-se no cenário de trajetórias socioeconômicas compartilhadas (SSP2; do inglês *Shared Socioeconomic Pathways*), que a população em terras áridas aumente em 40% a 50% (VAN DER ESCH et al., 2017).

Essas regiões se caracterizam por uma grande variabilidade climática sazonal e interanual, onde a precipitação se concentra em poucos meses ao longo do ano e é seguida de períodos secos prolongados (D'ODORICO et al., 2013). Assim, os ecossistemas nas regiões áridas podem estar sujeitos a vários processos de degradação, provavelmente associados a mau uso e má gestão do solo em um clima severo (CASANOVA et al., 2013). Além disso, essas regiões são muito suscetíveis a erosão hídrica e eólica (SIVAKUMAR, 2007; LAL, 2001), principalmente devido a solos pouco desenvolvidos e pouco protegidos por vegetação (VÁSQUEZ-MÉNDEZ et al., 2011) e a regimes de precipitação irregulares, muito variáveis no tempo e espaço.

Figura 1.1 - Distribuição geográfica das terras áridas. Delimitadas com base no Índice de Aridez (IA).



Dados: precipitação TerraClimate e evapotranspiração potencial (1980-2015).

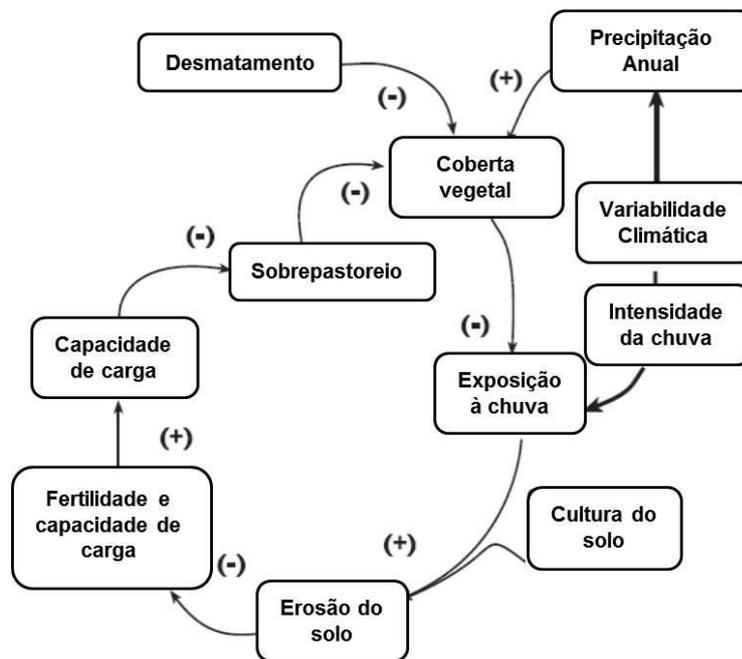
Fonte: Abatzoglou et al. (2018) e IPCC (2019).

A deterioração da cobertura vegetal, juntamente com um aumento na intensidade da precipitação, pode ser um fator importante na aceleração das perdas de solo (SANTIBÁÑEZ; SANTIBÁÑEZ, 2007). Com a perda da cobertura vegetal, produz-se uma redução no armazenamento de umidade e um aumento nos processos erosivos do solo, visto que a estrutura deste torna-se mais instável devido à diminuição da matéria orgânica disponível para incorporar-se ao solo, retroalimentando a deterioração da cobertura vegetal, acelerando a desertificação (BOT; BENITES, 2005; SANTIBÁÑEZ; SANTIBÁÑEZ, 2007).

Em regiões áridas com criação de animais pode ocorrer o sobrepastoreio devido a um mau manejo, ao se incrementar a quantidade de animais ou diminuir a área de pastagem, ou seja, tem-se um aumento do número de animais em uma área, o que conduz a danos na produção de vegetação. Como consequência, há uma redução na infiltração e o solo é exposto à erosão, o que, com o tempo, pode levar a processos de desertificação (GRANADOS-SÁNCHEZ et al., 2012).

O diagrama da Figura 1.2 sintetiza relações entre as influências humanas e climáticas que podem levar a desertificação. A desertificação tem como resultado uma grande diminuição espacial da biomassa e da produtividade biológica dos sistemas naturais. As áreas atingidas podem ser abandonadas uma vez que os manejos inadequados tenham levado ao esgotamento dos nutrientes do solo e os rendimentos tenham começado a se reduzir.

Figura 1.2 - Diagrama representando as influências humanas e climáticas sobre a pastagem.



Fonte: Adaptado de Santibáñez e Santibáñez, (2007).

Na América Latina, quase um quarto da superfície corresponde a regiões áridas, sendo três quartos desse total, áreas que apresentam problemas de degradação. Vivem nessas regiões, aproximadamente, 83 milhões de pessoas, muitas em situação de pobreza e, conseqüentemente, vulneráveis aos processos de desertificação, disponibilidade de água e mudanças climáticas (DE NYS et al., 2016). Economicamente, a desertificação custa entre 8 e 14% do produto agrícola bruto em muitos países da América do Sul e Central (MORALES et al., 2012)

A vulnerabilidade nessas regiões é causada, principalmente, por fortes restrições no uso de recursos naturais devido à limitada disponibilidade dos mesmos e a uma alta densidade populacional (KROL et al., 2006; MORALES; PARADA, 2005). Um dos grupos mais vulneráveis são as famílias pastoris e agropastoris (ARNETH et al., 2019). Muitas vezes, os pequenos produtores das zonas afetadas intensificam a exploração dos escassos recursos naturais, o que pode levar a mais degradação e pobreza. As secas e a desertificação são exemplos que favorecem a pobreza nestas zonas, já que rompem as estruturas sociais e familiares, provocando instabilidade econômica. Muitas vezes estas restrições levam a processos migratórios, que são muito característicos das regiões áridas e degradadas (MORALES; PARADA, 2005).

1.2.2. As regiões áridas do Chile e suas condições climáticas

O Chile contém uma proporção significativa de regiões áridas, 58% de seu território (VERBIST et al., 2016), com práticas agrícolas pobres que vêm do tempo da chegada dos espanhóis, conhecida como “La Colônia”. A desertificação é um dos maiores problemas ambientais e ocorre principalmente nas áreas rurais. A variabilidade climática nessas regiões inclui secas e precipitações acima da média, associadas em muitas ocasiões ao “ENSO”. Essas características climáticas levaram a uma exploração intensiva dos recursos naturais ao longo da história do país (CASANOVA et al., 2013; SANTIBÁÑEZ; SANTIBÁÑEZ, 2007). A Corporação Nacional Florestal de Chile (CONAF), em 1999, mostrou que, entre as regiões do Atacama (região III do Chile) e do Biobío (região VIII do Chile) e na região de Magallanes (região XII do Chile), 90% dos solos apresentam algum grau de desertificação. PANCD, 2016, indicou que 22% da superfície do Chile apresentava algum grau de desertificação, o que corresponde a 16.379.342 hectares, com uma população de 31,9% do total. As principais causas da desertificação no Chile são as secas, o desflorestamento, os incêndios florestais, os processos de mudança de uso da terra e o uso inadequado da agropecuária. A mineração também é um fator que contribui com os processos de desertificação (PANCD, 2016).

As pastagens das terras áridas e semiáridas do Chile são fundamentais para a subsistência de pequenas comunidades agrícolas que tem parte de seu sustento baseado no pastoreio de cabras. Já que esse sustento depende de pastagens de sequeiro, podem ocorrer problemas econômicos e sociais associados à vulnerabilidade dos recursos naturais (SALCEDO; GUZMAN, 2014). Considera-se uma pastagem como “de sequeiro” quando a disponibilidade de água para o crescimento das plantas provém só da precipitação. O ciclo produtivo inicia-se com as primeiras chuvas de outono e, devido às baixas temperaturas de inverno, pode se desenvolver pouco, iniciando seu crescimento no final do inverno (TURNER, 2004).

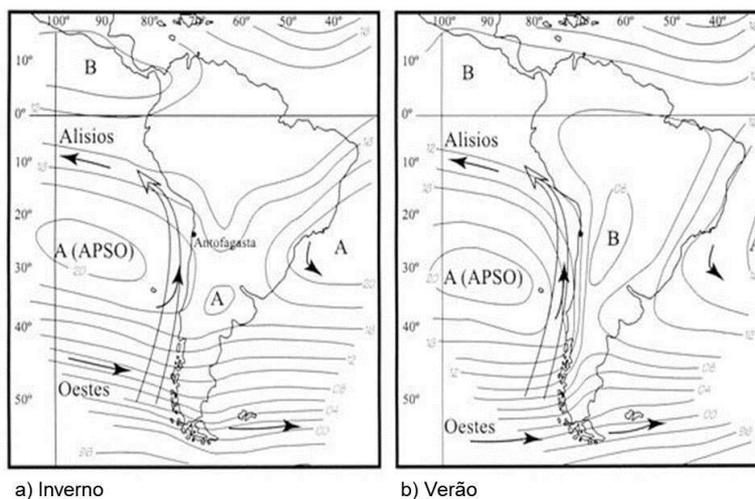
As regiões áridas do Chile, assim como outras regiões com essas características no mundo, têm uma relação muito alta entre a produção de biomassa em pastagens de sequeiro com a variabilidade climática, principalmente a da precipitação, tanto em escala sazonal quanto interanual (LE HOUEROU et al., 1988). Também está relacionada às características do solo, como taxas de infiltração e capacidade de armazenamento de água; e às características da vegetação, como biomassa permanente, composição e eficiência no uso da água. A vegetação pode ser afetada pelo número de animais que, por sua vez, tende a variar com a quantidade e composição da forragem para sua alimentação e depender de decisões humanas sobre onde e quando devem se alimentar (RICHARDSON; HAHN, 2007).

Considerando que a dinâmica da distribuição e o crescimento da vegetação estão associados às condições climáticas, alterações nessas condições podem conduzir a alterações na estrutura e funcionamento de vegetação, que afetam o balanço da água nestes ecossistemas (CHEN et al., 2014). Assim, modificações nos padrões de precipitação associados a mudanças climáticas podem ter impactos significativos sobre a produtividade da vegetação (HUXMAN et al., 2004; HSU et al., 2012). Resultados de vários estudos mostram que o crescimento de pastagens responde fortemente aos extremos de precipitação. A resposta das pastagens aos eventos extremos da chuva também pode ser associada aos intervalos entre os eventos e sua duração

(SWEMMER et al., 2007). Além disso, a ocorrência de anos com um atendimento hídrico favorável pode levar a um aumento do número de animais por hectare, de modo a ocasionar problemas de sobrelotação de animais em anos seguintes que se apresentarem mais secos. Esse pastoreio excessivo pode ter como consequência a degradação das pastagens (SANTIBÁÑEZ, 1997).

A variabilidade climática sazonal na região árida do Chile se caracteriza pela concentração da precipitação em poucos meses da estação de inverno devido ao predomínio do Anticiclone do Pacífico Sul (APS), que se desloca para o norte no inverno austral e para o sul no verão austral, em associação aos máximos de radiação solar. As chuvas que ocorrem nos meses de inverno estão associadas ao deslocamento do APS para o norte indicado na Figura 1.3, que permite que as frentes frias associadas a ciclones migratórios, guiadas pelo fluxo de oeste, contribuam com precipitação na região (GARREAUD; ACEITUNO, 2002).

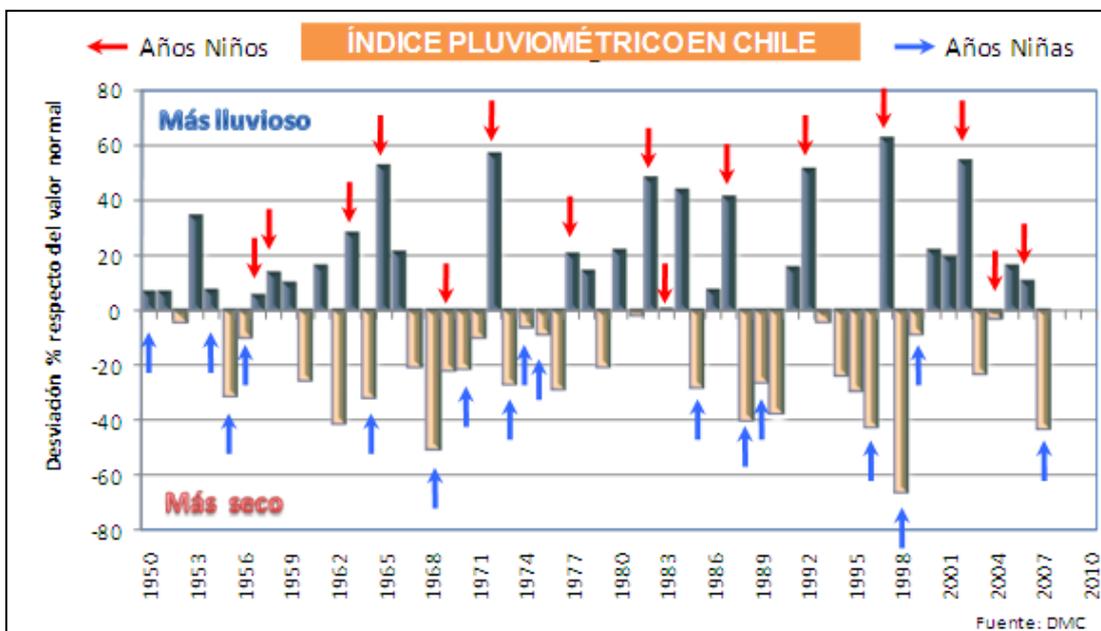
Figura 1.3 - Pressão atmosférica média ao nível do mar, para os meses de a) inverno austral (junho, julho e agosto) e b) verão austral (dezembro, janeiro, fevereiro) para a América do Sul.



Fonte: Vargas et al. (2000).

A Figura 1.4 mostra a variabilidade interanual nessa região, que se caracteriza pela ocorrência de anos secos e úmidos. Essa variabilidade é explicada, em grande parte, pelo fenômeno ENSO. Em anos de El Niño, o APS se debilita, possibilitando que um maior número de frentes frias chegue à região. Isso leva à ocorrência de uma maior quantidade de precipitação do que em anos normais. Já em anos de La Niña, acontece uma intensificação do APS que dificulta a chegada de frentes frias e leva a uma menor quantidade de precipitação (MONTECINOS; ACEITUNO, 2003). As variações das chuvas também estão relacionadas com a Oscilação Decadal do Pacífico (PDO; do inglês *Pacific Decadal Oscillation*). Sua fase fria tende a produzir períodos que em média são mais secos que a média histórica e a fase quente tende a produzir períodos mais chuvosos (GARREAUD et al., 2009). Assim, na fase fria da PDO, a probabilidade de ter secas importantes aumenta (BOISIER et al., 2016).

Figura 1.4 - Índice pluviométrico no Chile.



As barras azuis representam anomalias positivas e as barras bege as anomalias negativas na chuva, apresentando também as ocorrências de El Niño (setas vermelhas) e La Niña (setas azuis). Imagem publicada 2010 em <https://slideplayer.es/slide/3292801/>.

Fonte: Direção Meteorológica de Chile (DMC) (2010).

A precipitação na zona centro-norte do Chile mostra uma tendência positiva entre os anos setenta e oitenta e uma tendência negativa durante as últimas três décadas. A grande amplitude da tendência das precipitações de 1979 a 2014 na zona central de Chile em parte é compensada pelos anos recentes de déficit de precipitação (BOISER et al., 2016).

O Atlas de Secas da América Latina e Caribe (NUÑEZ; VERBIST, 2018) faz referência a três eventos de secas importantes nos últimos 100 anos no Chile: a seca de 1968, a de 1998 e a atual “mega-seca” que começou no ano 2010. A seca de 1998 inclui os anos 1994, 1995, 1996 e 1998, sendo este último o mais seco de todos. Esse período seco foi interrompido, no ano 1997, por um dos invernos mais chuvosos do registro histórico (QUINTANA, 2000). Especificamente, essa seca teve como consequência na região de Coquimbo a morte do gado caprino e, portanto, baixa produção de queijo e leite (ALDUNCE; GONZALEZ, 2009).

A seca que começou em 2010 registrou uma diminuição de aproximadamente 30% na precipitação da região desde seu início. O déficit hídrico associado a essa diminuição na precipitação sofre uma intensificação associada às temperaturas, já que ocorre na década considerada como a mais quente dos últimos 100 anos. Esse evento vem ocorrendo principalmente em condições de ENSO neutro. GARREAUD et al., (2019), estudando o período 2010-2018, mostraram uma importante associação entre a seca e o aumento da temperatura superficial do mar no sudoeste do Pacífico subtropical observado nesse período. Além disso, mostraram que a tendência positiva do modo anular meridional, associada a fatores antropogênicos, também contribui para o déficit pluviométrico observado. A duração deste evento tem poucos similares na reconstrução de mil anos de precipitação no Chile (GARREAUD et al., 2017). No entanto, nenhum ano desta seca registrou déficit tão importante quanto na seca de 1968 ou na de 1998.

Em relação às temperaturas, para o período 1979-2005 há diminuição ao longo da costa, um ligeiro aumento no vale central e um aumento acentuado na cordilheira dos Andes. É importante destacar que 30 anos de dados é um

período relativamente curto; e que as tendências podem corresponder a uma oscilação natural. No entanto, comparando-se com resultados de modelos climáticos e de outras análises pode-se atribuir, parcialmente, estas tendências ao aumento de gases de efeito estufa (GEE). O resfriamento da costa parece ser consequência de uma intensificação dos ventos ao longo do litoral devido a uma expansão ao sul do domínio do APSO (FALVEY; GARREAUD, 2009).

Precipitações intensas e mudanças na distribuição da precipitação ao longo do ano também podem afetar a produção de biomassa das pastagens. Sarricolea et al. (2019) encontraram uma tendência positiva no índice de concentração diário das precipitações na região semiárida chilena, o que estaria associado a uma mudança na distribuição anual das chuvas. Meza (2013), usando um índice padronizado da evapotranspiração, observou um aumento nas tendências de frequência de secas, principalmente no vale de Limari para o período de 1970 a 2011. Resultados de GLADE et al. (2016) sobre a produtividade da vegetação no Vale de Limari, mostraram uma diminuição na produtividade da vegetação em praticamente todos os locais do estudo em altitudes abaixo dos 2000 m durante o período 2000-2013, sendo a precipitação o principal fator explicando essa redução na produtividade.

A região de Coquimbo é a que apresenta maiores problemas associados aos processos de desertificação no Chile. Nessa região ocorrem episódios recorrentes de secas, eventos intensos e redução na quantidade histórica das chuvas, levando a uma tensão recorrente entre o uso dos recursos naturais e as atividades econômicas para o desenvolvimento rural. Em grande parte da zona rural da região, a posse da terra está a cargo de Comunidades Agrícolas, que são organizações sociais de pequenos agricultores, unidas por laços familiares ou amizade, vivendo de propriedade comunitária, basicamente uma extensão indivisível de terra. Muitas dessas comunidades baseiam sua economia em atividades associadas a condições de sequeiro. Essas características significam que essa região é extremamente propensa a escoamento superficial e erosão do solo, especialmente quando o solo está desprotegido pela vegetação (CASANOVA et al. 2013).

Como uma das causas antrópicas principais de desertificação nesta região se considera o sobrepastoreio (SALINAS, 2011), sendo ainda mais intensificada pelos fatores climáticos desfavoráveis, como secas recorrentes, eventos intensos de chuvas e tendências negativas da precipitação no tempo (CASANOVA et al., 2013). A desertificação afeta mais intensamente as comunidades mais pobres e vulneráveis, já que elas dependem fortemente da qualidade da terra para seu sustento (EMANUELLI et al., 2016).

1.2.3. Mudanças climáticas

As mudanças climáticas têm sido, cada vez mais, uma das grandes problemáticas ambientais e sociais nas agendas científicas e políticas. O quinto relatório (AR5, do inglês *Fifth Assessment Report*) do IPCC (PACHAURI et al., 2014) afirma que o aquecimento do sistema climático é inequívoco e que muitas das mudanças observadas desde 1950 não têm precedentes nos últimos decênios a milênios. A atmosfera e os oceanos têm se aquecido, volumes de gelo e neve têm diminuído e o nível do mar tem aumentado (PACHAURI et al., 2014).

É provável que existam mais regiões no globo em que as precipitações intensas aumentem em comparação com as regiões em que diminuem. As mudanças da frequência e intensidade das secas e alagamentos afetam o abastecimento de alimentos e o seu acesso (PACHAURI et al., 2014). Os eventos climáticos extremos, como precipitações intensas, chuvas e vento erosivo, secas, podem agravar os processos de degradação da terra (CLARKE; RENDELL, 2011).

Os cenários climáticos são utilizados para investigar as consequências de longo prazo das decisões tomadas hoje, tendo em conta a inércia tanto no sistema socioeconômico quanto no físico (VAN VUUREN et al., 2011). No projeto CMIP5 (quinta fase do *Coupled Model Intercomparison Project*), utilizado para a formulação do AR5 do IPCC, foram formulados quatro cenários de emissão de gases poluentes e aerossóis, denominados RCPs. Esses cenários se baseiam numa gama de projeções de crescimento futuro da

população, desenvolvimento tecnológico e respostas sociais. Os números nos nomes dos cenários fornecem uma estimativa da forçante radiativa no ano de 2100, em relação às condições pré-industriais. A forçante radiativa no RCP8,5 aumenta ao longo do século XXI até chegar a um nível de $8,5 \text{ W/m}^2$ no final do século. Há também, dois cenários intermediários, o RCP 4,5 e o RCP 6,0, e um cenário de decaimento, o RCP2,6 no qual a forçante radiativa atinge um máximo próximo ao meio do século XXI para depois diminuir chegando a $2,6 \text{ W/m}^2$ (TAYLOR et al., 2012).

Neste estudo utiliza-se o cenário RCP 8.5, usualmente considerado como o cenário “business as usual”. Esse cenário assume que as emissões de GEE aumentam com o tempo levando a altos níveis de concentração (mais detalhes em RIAHI et al., 2007). Em relação ao do uso da terra, o cenário apresenta as seguintes características (HURTT et al., 2011):

Aumento da terra cultivada em aproximadamente 186 milhões de hectares de 2000-2050 e outros 120 milhões de hectares em 2050-2100;

O uso da terra arável em países desenvolvidos diminui ligeiramente e todos os aumentos líquidos ocorrem em países em desenvolvimento;

A cobertura florestal diminui ao longo do século em 300 milhões de hectares em 2000-2050 e outros 150 milhões de hectares em 2050-2100.

Os Modelos de Circulação Geral (MCGs) são uma ferramenta útil para analisar possíveis mudanças climáticas. As resoluções utilizadas nos MCGs vêm melhorando ao longo do tempo, mas ainda tendem a ser muito baixas para uma representação detalhada em escala regional ou mais fina (AMADOR; ALFARO, 2009). Pode-se utilizar, então, os Modelos Climáticos Regionais (MCRs) para produzir simulações climáticas de alta resolução em escalas regionais. Os MCRs representam melhor as características locais, como topografia complexa, heterogeneidade da superfície terrestre, linhas costeiras e corpos de água regionais. Além disso, podem captar melhor a variabilidade climática regional interanual. A modelagem regional integral pode proporcionar

um marco conceitual e uma ferramenta de aplicação para a integração de diferentes disciplinas científicas (KROL et al., 2006).

Atualmente, o downscaling (regionalização) dinâmico é uma das ferramentas mais utilizadas nos estudos regionais de clima atual e futuro (PBMC, 2013). Consiste na obtenção de informações climáticas regionais com base nas condições climáticas de grande escala através da utilização de MCRs (WANG et al., 2004) alimentados por condições de contorno de MCGs.

Diferentes experimentos com modelos regionais têm sido realizados para o Chile. Um estudo do ano 2006, intitulado “Variabilidade climática no Chile para o século XXI”, solicitado pelo Governo do Chile e realizado pelo Departamento de Geofísica da Universidade do Chile, analisou o clima observado durante o século XX e sua projeção para o final do século XXI (2071-2100) com o modelo regional PRECIS (do inglês *Providing Regional Climates for Impact Studies*), utilizando uma resolução de 25 km. Os cenários usados foram os SRES (do inglês *Special Report on Emissions Scenarios*) B2 e A2 utilizados no quarto relatório do IPCC e o MCG que forçou o modelo regional foi o HadCM3 (*Hadley Center Model*, versão 3). Os resultados mostraram mudanças positivas das temperaturas em todo o território, sendo maiores para o cenário A2 e maiores nos vales em comparação com a zona costeira. Em relação às precipitações, foi projetada uma diminuição na região centro-norte do país para os dois cenários (CONAMA, 2006). Em 2015, a DMC executou o modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*) para o Chile, utilizando uma resolução de 25 km e condições de contorno do modelo climático global MIROC5 (do inglês *Model for Interdisciplinary Research On Climate*) para o período 2030-2060, considerando dois cenários de emissão de gases de efeito estufa utilizados no IPCC-AR5 (RCP2,6 e RCP8,5). Os resultados para o RCP2,6 mostram um aumento da temperatura mínima de 2°C para o norte e um aumento da temperatura máxima de 1°C em todo o país. Em relação à precipitação, os resultados sob o cenário RCP2,6 mostram uma diminuição dos totais anuais na região centro-norte do país e um aumento na região sul. Os resultados da simulação para o cenário RCP8,5 mostram um aumento das temperaturas,

tanto mínimas como máximas, em todo o Chile. De forma similar à simulação sob o cenário RCP2,6, os resultados para a precipitação sob o cenário RCP8,5 indicam uma diminuição das precipitações anuais na zona central do país e um aumento na zona sul (ALCAFUZ ET AL., 2015). As mais recentes simulações foram desenvolvidas pelo Centro do Clima e a Resiliência (CR2), as quais serão usadas no presente trabalho. Foi utilizado o modelo RegCM4 com resolução espacial de 10 km para regionalizar as projeções do modelo global MPI-ESM. Os resultados mostram uma diminuição na precipitação na região semiárida para o período 2021-2050 sob os cenários RCP2.6 (~20%) e RCP8.5 (~10%). Em relação à temperatura, essas projeções indicam um aumento em todo o território e uma maior frequência de noites quentes e ondas de calor (ROJAS et al., 2018).

O estudo “Análise de vulnerabilidade do setor silvoagropecuário, recursos hídricos e edáficos do Chile frente a cenários de mudanças climáticas”, foi executado pelo Centro de Agricultura e Meio Ambiente (AGRIMED) da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade de Chile e combina os resultados da modelagem regional da CONAMA (2006), mencionado anteriormente, com o modelo SIMPROC (Simulador da Produtividade dos Cultivos). O objetivo era fornecer a informação necessária para compreender os alcances das mudanças climáticas em termos de vulnerabilidade do setor agropecuário. Os resultados mais importantes do estudo são que a diminuição da precipitação e o aumento da temperatura tem um efeito negativo nos rendimentos no centro-norte e na zona central. A agricultura de sequeiro tem o impacto dos dois fatores em conjunto. As culturas de inverno (por exemplo, cereal) parecem beneficiar-se com o aumento da temperatura, enquanto as pastagens desde a região de Coquimbo até a região de “Los Lagos”, em geral, diminuem seu potencial produtivo (SANTIBÁÑEZ et al., 2008).

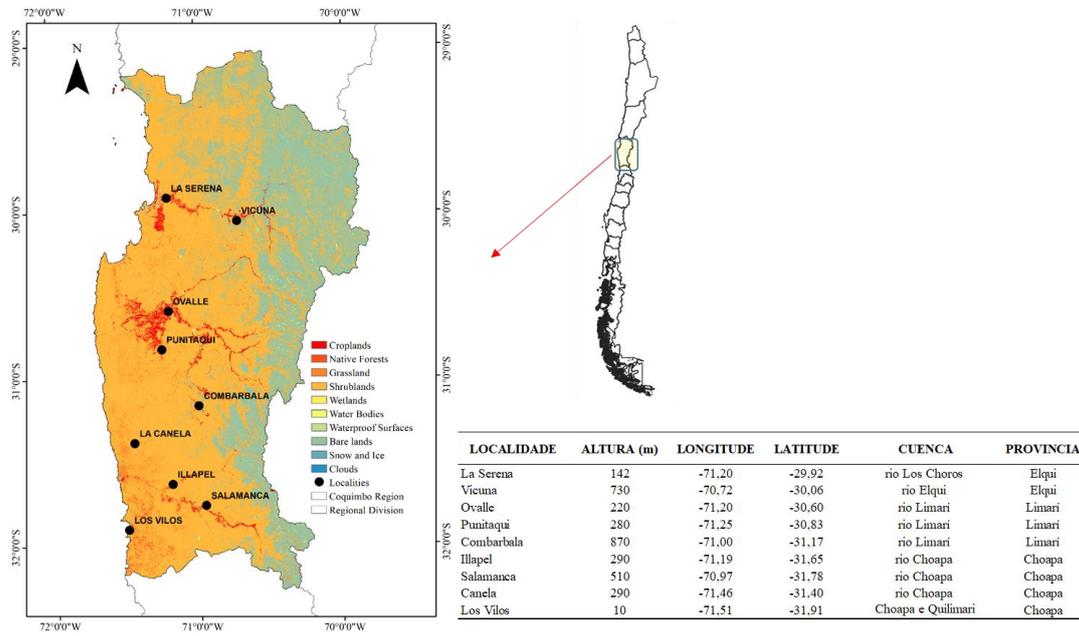
2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A região de Coquimbo está localizada entre 29° e 32° de latitude Sul e 69.5° e 71.43° de longitude Oeste conforme apresentado na Figura 2.1. Está dividida administrativamente em três províncias que correspondem aos vales de Elqui, Limari e Choapa. A precipitação anual na região de Coquimbo pode variar entre 100 e 300 mm, com um período seco com duração de 8 a 11 meses, sendo e o déficit hídrico anual entre 1000 e 1200 mm. A soma térmica anual acumulada pode variar de 1600 a 1700 graus-dia (SANTIBÁÑEZ et al., 2014). Nesta região, a pastagem se configura como a vegetação dominante, sendo o principal recurso para a alimentação dos animais. Essa vegetação costuma estar presente de março a novembro, exceto quando ocorre déficit de precipitação (MORALES, 2003). Neste estudo foram consideradas nove localidades para a análise do clima da região, representativas de setores com pastagem e com disponibilidade de dados consistentes (Figura 2.1).

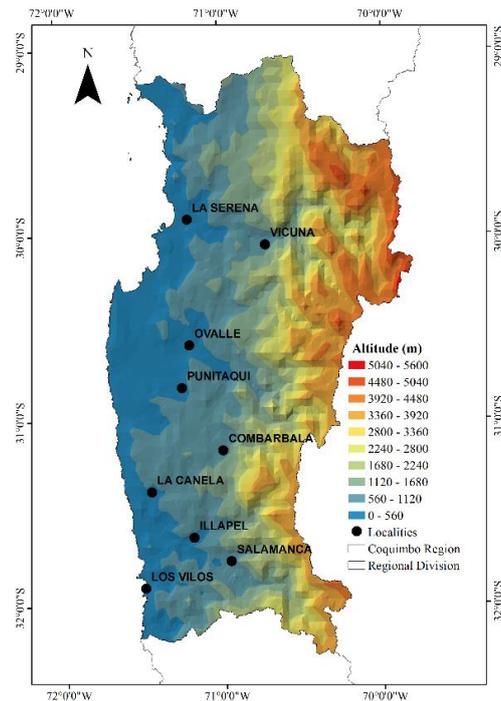
Essa região é caracterizada pela marcante influência do oceano Pacífico, o que faz com que o clima no litoral seja mais frio do que no interior. Outro fator que determina as características climáticas desta região é o relevo (altimetria; Figura 2.2), com a presença da cordilheira dos Andes que tem um importante efeito orográfico sobre a precipitação, além de influenciar as temperaturas e o vento (FALVEY; GARREAUD, 2007). Além disso, a região de Coquimbo é formada por vales transversais com extensão oeste-leste.

Figura 2.1 - Localização e cobertura do solo na região de Coquimbo, Chile (2014), e localidades selecionadas para estudo.



Fonte: Zhao et al. (2016).

Figura 2.2 - Mapa de altimetria na região de Coquimbo.



Os pontos representam a posição geográfica das localidades escolhidas para análise.

2.2. Metodologia

2.2.1. Modelo SIMPRAD (simulador da produção das pastagens)

A modelagem bioclimática tem sido utilizada como uma importante ferramenta para investigar os impactos dos fatores climáticos sobre as pastagens. O modelo SIMPRAD simula o crescimento das pastagens com base nos níveis de radiação solar, temperatura do ar e disponibilidade de água no solo, integrando-se, ao longo do tempo, os estímulos climáticos e as respostas ecofisiológicas das pastagens (SANTIBÁÑEZ, 2001, SANTIBÁÑEZ 1998, SANTIBÁÑEZ, 1986).

A pastagem emerge logo depois da primeira chuva efetiva da temporada. Uma vez que ela emerge dispõe de um índice de área foliar (IAF) mínimo com o qual pode interceptar a radiação solar. A taxa de crescimento potencial da pastagem (CRE_t) é obtida a partir da equação 2.1:

$$CRE_t = Ef * ((1 - \alpha) * PAR_0 * (1 - \exp[1 - \exp[-ke * IAF]])) \quad \text{Equação (2.1)}$$

Onde Ef é a eficiência fotossintética, PAR_0 é a radiação fotossinteticamente ativa incidente (MJ/m^2), IAF é o índice de área foliar, α é o albedo foliar e ke é o coeficiente de extinção da luz dentro da forragem. CRE_t é corrigida pelo efeito da temperatura e da água disponível no solo, para assim obter CRE_r , que é o crescimento real da pastagem (equação 2.10).

Supõe-se que a evapotranspiração da pastagem é proporcional à cobertura do solo, que depende do IAF estimado através da biomassa aérea total ($BIOM_t$) conforme a equação 2.2.

$$IAF = \beta * BIOM_t \quad \text{Equação (2.2)}$$

Onde β é um coeficiente de cada tipo de pastagem. Se $BIOM$ estiver em kg/ha , β assumirá um valor de 0,0020 a 0,0012.

A temperatura também exerce uma ação regulatória sobre o crescimento, por isso é necessário introduzir uma função de controle que leve em consideração a temperatura limiar de crescimento (T_u), a temperatura ótima (T_o) e a temperatura máxima de crescimento (T_{mx}). A representação do controle térmico (Figura 2.3) pode-se simplificar com a combinação de equações lineares (equações 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6):

Para temperaturas entre T_u e T_{oi} :

$$T_{cr} = T * (T_{oi} - T_u)^{-1} + 1 - (T_{oi} * (T_{oi} - T_u)^{-1}) \quad \text{Equação (2.3)}$$

Para temperaturas entre T_{oi} e T_{os} :

$$T_{cr} = 1 \quad \text{Equação (2.4)}$$

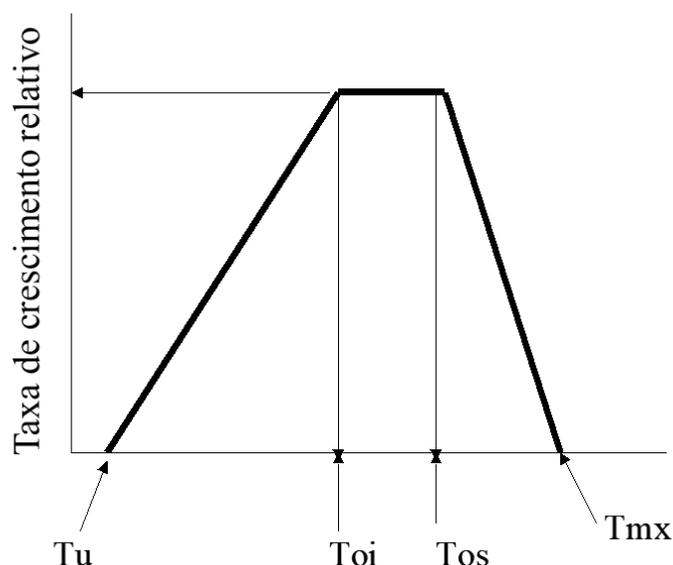
Para temperaturas entre T_{os} e T_{mx} :

$$T_{cr} = 1 + T_{os} * (T_{mx} - T_{os})^{-1} - T_{**} * (T_{mx} - T_{os})^{-1} \quad \text{Equação (2.5)}$$

Para temperaturas abaixo de T_u e acima de T_{mx} :

$$T_{cr} = 0 \quad \text{Equação (2.6)}$$

Figura 2.3 - Função da regulação térmica do crescimento.



No caso de o solo perder água abaixo da umidade crítica, esse déficit hídrico no solo reduz as taxas reais de evapotranspiração de acordo com o algoritmo do Fator de redução de umidade (**FDH**):

$$FDH = \left(\frac{HS}{HA}\right)^{K_h} \quad \text{Equação (2.7)}$$

Onde HS / HA representa a fração da umidade útil do solo a qualquer momento e K_h é um coeficiente que depende da textura do solo, da demanda atmosférica e do tipo de pastagem.

A evapotranspiração da pastagem (E_t) resulta da seguinte relação empírica:

$$ET = ETP * FDH * \left((1 - e^{(-ke*IAF)}) * K_{max} \right) + E_p \quad \text{Equação (2.8)}$$

Onde ETP é evapotranspiração em potencial e K_{max} , ET / ETP quando a pastagem cobre completamente o solo. E_p é a evaporação direta da superfície do solo (obtida na rotina de balanço hídrico).

O fator água da produção (FH) é obtido por meio de uma função de produção que considera a razão ET/ET_{max} e um fator (ky) (Doorenbos e Kassam, 1979) que considera a sensibilidade da pradaria ao déficit hídrico, ET_{max} corresponde a Et quando $FH = 1$.

$$FH = \left(\left(\frac{ET}{ET_{max}} \right) - 1 \right) * ky - 1 \quad \text{Equação (2.9)}$$

Os incrementos na biomassa da pastagem são representados pela taxa de crescimento real (CRE_r) que é obtida a partir da taxa de crescimento potencial, corrigida pelos coeficientes térmicos (CT) e hídricos (FH).

$$CRE_r = CRE_t * CT * FH \quad \text{Equação (2.10)}$$

O modelo calcula as variações da biomassa (BIOM) para cada instante de tempo (t) como um balanço de acordo com a equação 2.11:

$$BIOM_t = BIOM_{t-1} + CRE_r - SEN * BIOM_{t-1} \quad \text{Equação (2.11)}$$

Onde $BIOM$ é a biomassa (kg/ha); CRE_r é o crescimento real obtido a partir da taxa de crescimento potencial, que integra os efeitos combinados da radiação solar incidente, temperatura e balanço hídrico; SEN é a senescência natural, que pode ser induzida pela idade fisiológica das folhas ou pelos efeitos das

secas e das geadas que podem causar danos graves sobre a superfície foliar exposta. Durante períodos secos ou muito frios, a taxa de senescência é superior à da geração de biomassa, fato que desencadeia uma redução na biomassa e, conseqüentemente, na IAF e, portanto, em sua capacidade fotossintética.

O modelo possui uma sub-rotina que simula o balanço hídrico do sistema solo-planta. A evapotranspiração e o consumo de água pelas pastagens aumentam gradualmente, pois cobrem uma proporção maior do solo. Simultaneamente, a evaporação do solo diminui. O nível da água no solo é substituído pelas chuvas.

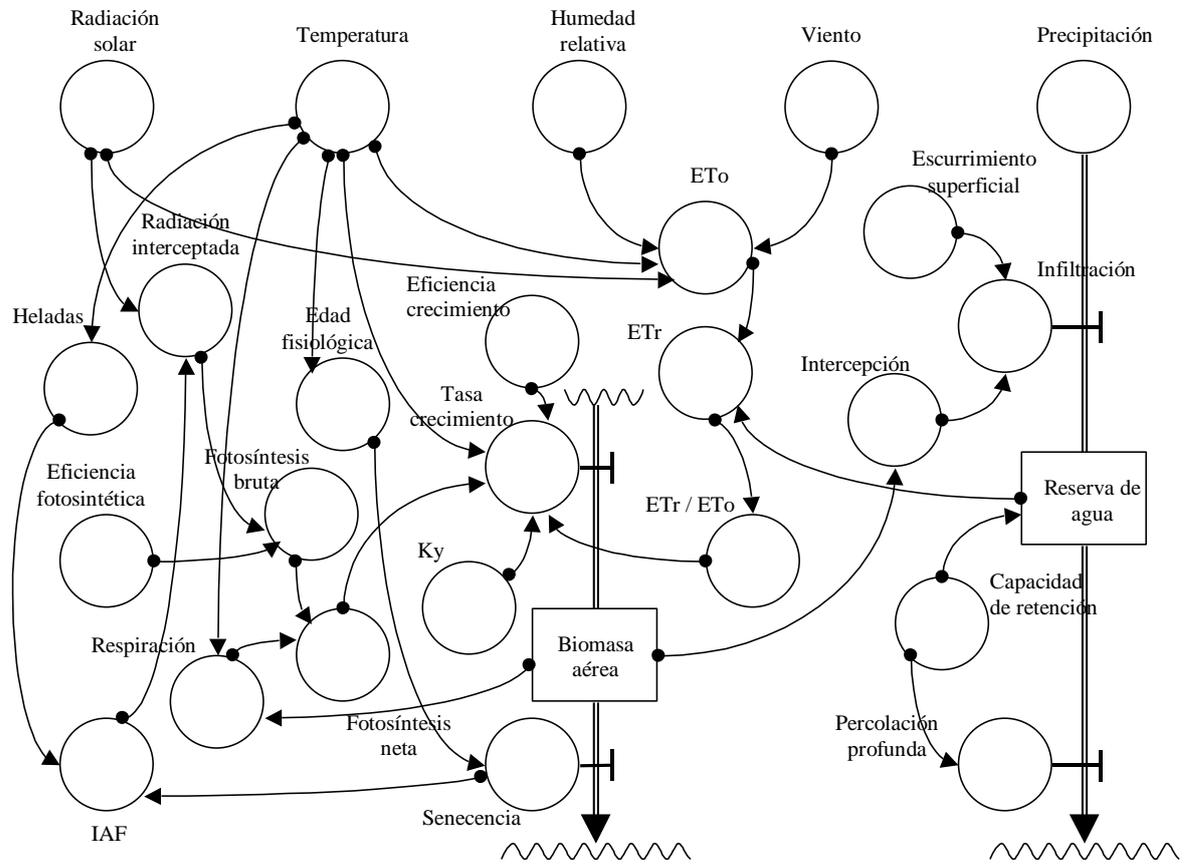
O alagamento temporário do solo causado pelas chuvas é prejudicial ao crescimento das plantas. O modelo possui um sistema que opera sempre que o solo está na capacidade de campo e ocorre precipitação (mm / dia) que excede o Et acima de um determinado limite. Assim, é simulado o efeito de excesso temporário de água, que produz depósitos que duram algum tempo no solo.

O diagrama de fluxo do modelo SIMPRAD é mostrado na Figura 2.4. O modelo está adaptado para simular a produção de biomassa com um passo de tempo semanal, o que reduz bastante o custo computacional em relação aos modelos diários. Todas as variáveis climáticas são calculadas semanalmente, a partir de um gerador climático interno ao SIMPRAD, onde as variáveis de entrada são temperaturas máximas e mínimas do ar ($^{\circ}\text{C}$), radiação solar (W/m^2), umidade relativa do ar (%), evapotranspiração potencial (mm) para os meses extremos do ano (janeiro e julho no hemisfério sul) e precipitação semanal (mm) ao longo do ano. As variáveis de entrada usadas para a simulação estão descritas na Tabela 2.1. As fontes de dados mostradas na tabela são descritas na Seção 2.3.

Os parâmetros relacionados ao solo, necessidades hídricas e características da pastagem usados nas simulações deste trabalho são obtidos da literatura, medições de campo e calibração do modelo. Para todas as localidades estudadas se considera o mesmo tipo de pastagem: mediterrâneo anual, o qual

é típico das regiões com chuvas invernais e que cresce principalmente na primavera, aproveitando a água que está no solo das chuvas do inverno e o aumento de temperaturas nessa estação. O crescimento termina no final da primavera quando o solo já não tem mais água. Neste estudo, assume-se as seguintes condições particulares: a primeira chuva efetiva é de 10 mm, o coeficiente associado à regulação do estresse hídrico na função de restrição hídrica (DOORENBOS; KASSAM, 1979) é 0.9, a regulação térmica do crescimento considera a temperatura base de crescimento de 8°C, as temperaturas ótimas inferior e superior são 19°C e 22°C, respectivamente, e a temperatura máxima de crescimento é 30°C. O solo tem profundidade de 20 cm, capacidade de água disponível no solo fixa em 20%, ponto de murcha permanente em 10%, densidade em 1.3 e umidade aproveitável em 70%. O CO₂ permanece constante para todos os anos (comunicação pessoal, SANTIBÁÑEZ, 2019).

Figura 2.4 - Diagrama de funcionamento do modelo SIMPRAD.



Fonte: Santibáñez e Santibáñez (2007).

Tabela 2.1 - Variáveis de entrada usadas nas simulações do modelo SIMPRAD no presente e no futuro.

VARIÁVEL	RESOLUÇÃO TEMPORAL	CLIMA PRESENTE	PROJEÇÃO FUTURA
		FONTE	FONTE
Precipitação	Semanal	Estações Meteorológicas	RegCM4
Temperatura máxima e mínima	Mensal - jan/jul	Estações Meteorológicas/CR2MET	RegCM4
Radiação solar	Mensal - jan/jul	CRU-JRA	RegCM4
Evapotranspiração potencial	Mensal - jan/jul	CRU-JRA	RegCM4
Umidade relativa	Mensal - jan/jul	CRU-JRA	RegCM4

jan: janeiro; jul: julho; CRU-JRA dados interpolados da *Climatic Research Unit* e dados da *Japanese Reanalysis*; CR2MET: *The Center for Climate and Resilience Research Meteorological dataset*; Regcm4: *Regional Climate Model* versão 4, com downscaling a partir do “*Max Planck Institute Earth System Model*”.

SIMPRAD-DEGRADAÇÃO

Para incluir a degradação do pastagem no modelo, foi empregada a seguinte metodologia (chamada de SIMPRAD-DEG, Figura 2.5): A biomassa máxima calculada pelo modelo foi utilizada para realizar o cálculo da capacidade de carga animal (CC) sobre a pastagem, e que se define como o número de animais que podem ser mantidos em uma unidade de superfície em forma produtiva por um determinado período pastando sem deteriorar o pastagem (HOLECHECK et al., 2011).

O modelo usa a seguinte equação para calcular CC:

$$CC = \frac{BIOM*BU}{KA*365} \quad \text{Equação (2.12)}$$

Onde BU é a fração de biomassa útil (50%), KA é o consumo animal, que equivale a 3% de seu peso vivo (100 kg unidade standardizada). Neste caso equivale a 1.5 cabra.

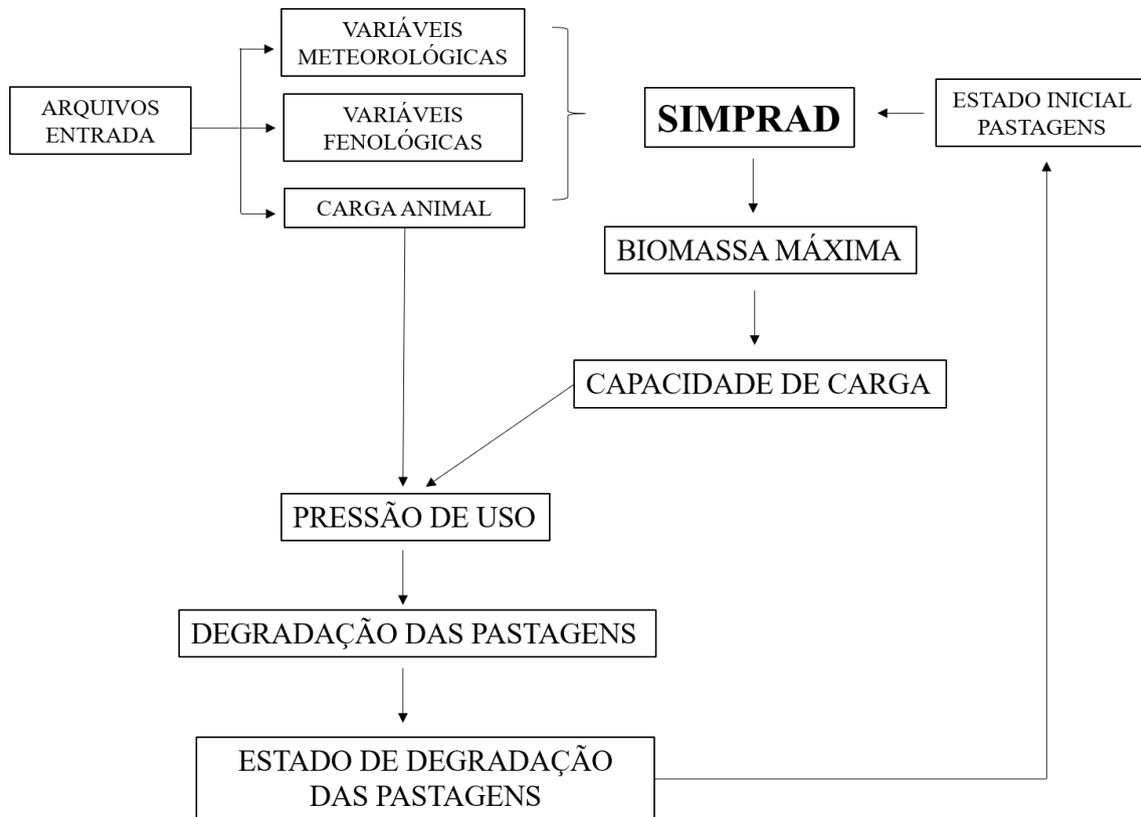
Para obter a degradação da pastagem, obtém-se primeiro a CC que a pastagem teria com base na produção de biomassa máxima considerando-se as condições climáticas para cada ano.

Calcula-se a pressão de uso (PU), equação 2.13 como a relação entre a carga animal (CA) e CC (equação 2.12); e a partir de PU calcula-se um valor que servirá de base para o cálculo da taxa de degradação. Assume-se uma taxa de degradação de 50 anos e de recuperação de 25 anos (comunicação pessoal, SANTIABANÉZ, 2018).

$$PU = \frac{CA}{CC} \quad \text{Equação (2.13)}$$

Para este estudo se utilizou uma CC para cada localidade baseada apenas nas condições climáticas (CA_{pot}). Posteriormente, calculou-se uma carga animal para um estado sustentável (C_{sus}) como 70% da CC , uma carga animal de regeneração (CA_{reg}) como 50% da CC e uma carga animal de degradação como 50% a mais que CC .

Figura 2.5 - Diagrama do funcionamento SIMPRAD-DEG.

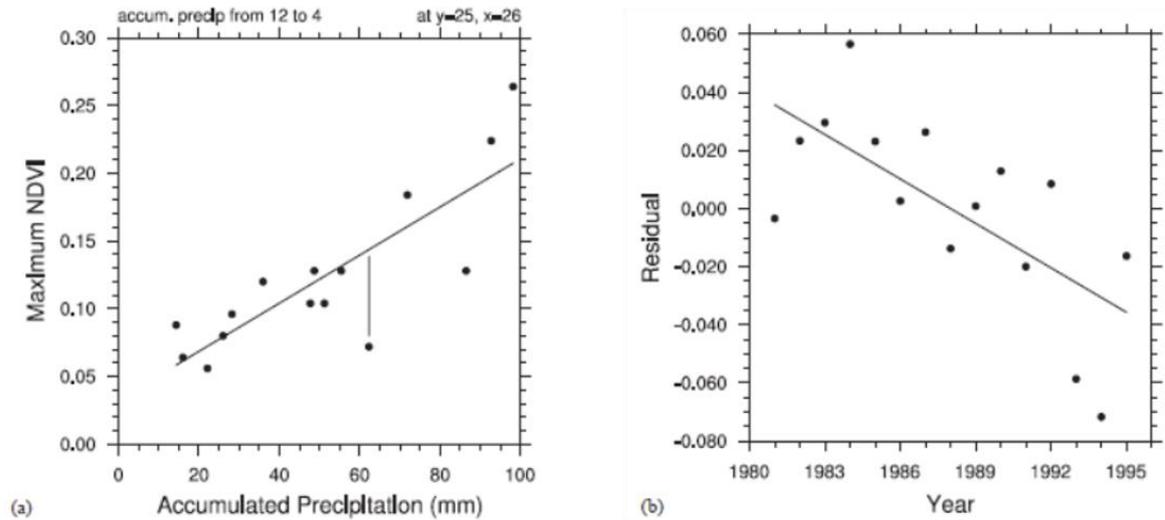


2.2.2. Método RESTREND (tendência do resíduo)

Optou-se pela utilização do método RESTREND (EVANS e GEERKEN 2004; Figura 2.6) para a análise de degradação das pastagens na região de estudo. Este método analisa a correlação entre o NDVI (do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*), como um proxy da produtividade da vegetação, e a precipitação, assumindo que a água é o fator limitante para a produtividade da vegetação na maioria das áreas secas onde existe boa correlação entre precipitação e vegetação. Para escolher o período de chuvas a considerar, são testados diferentes períodos de tempo, procurando a melhor correlação com o NDVI. Ao obter esta relação, o componente climático da série temporal do NDVI pode ser reconstruído. O resíduo, isto é, a diferença entre a série obtida

por esta relação e a série original, é atribuído a causas antropogênicas ou a outros fatores (ARNETH et al., 2019). Uma tendência positiva nos resíduos indica uma melhoria da terra, devido ao aumento do sinal de NDVI em comparação com a tendência de precipitação, enquanto que uma tendência negativa indica degradação, devido a um decaimento do NDVI por unidade de precipitação (HIGGINBOTTOM e SYMEONAKIS, 2014). Em uma aplicação do método na África do Sul, mostrou-se que o RESTRED gerava uma identificação mais precisa de terras degradadas do que ao usar o “Uso da Eficiência das Chuvas” (RUE, sigla em inglês *Rainfall Use efficiency*), e identificou uma área menor que estava em processo de desertificação devido a causas não climáticas em comparação com as tendências de NDVI (WESSELS et al, 2007). Em relação a limitações, o método não pode identificar se uma área já estava degradada no momento do início da série. Além disso, há a suposição de que o clima, principalmente as chuvas, são o principal fator de mudança da vegetação, o que pode não acontecer em regiões mais úmidas (ARNETH et al., 2019).

Figura 2.6 - Regressão linear entre precipitação e NDVI e tendência no resíduo.



(a) Regressão linear entre a precipitação acumulada e o NDVI máximo, e (b) a tendência temporal dos resíduos associados. O resíduo é obtido como a diferença entre o NDVI modelado pela regressão e o observado.

Fonte: Evans e Geerken (2004).

Neste estudo se considerou o NDVI médio e a precipitação acumulada entre os meses de maio e novembro, que foi o período com uma melhor correlação. Para a análise por pontos foram usados os dados de precipitação de estações meteorológicas (Figura 2.1) e de NDVI em pontos com cobertura tipo pastagem. Para o caso espacial, foram usadas as precipitações do CR2MET² (The Center for Climate and Resilience Research Meteorological dataset) e o NDVI, ambos com uma resolução de 1 km.

Neste estudo se considerou o NDVI médio e a precipitação acumulada entre os meses de maio e novembro, que foi o período com uma melhor correlação. Para o análise da tendência dos resíduos se consideraram os pontos com um $R^2 > 0,5$.

² <http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>

2.3. Dados

2.3.1. Presente

As chuvas diárias e temperaturas máximas e mínimas mensais do ar observadas, para o período 1980-2016 para as nove localidades (especificadas na Seção 2.1) foram obtidas de estações meteorológicas da *Dirección General de Aguas* (DGA) e da *Dirección Meteorológica de Chile* (DMC). Nos casos em que os dados de temperatura máxima e mínima não estavam disponíveis para as localidades e período de estudo, estes foram obtidos a partir do produto CR2MET. Esta base de dados contém informação de precipitação, temperatura média e temperaturas mínima e máxima do ar para o período 1979-2016 em uma grade retangular de 0.05° latitude-longitude. A precipitação contida nessa base de dados foi obtida a partir de uma regionalização estatística da reanálise ERA-Interim, considerando a topografia local e realizando uma calibração com observações locais de precipitação. Para a temperatura da base CR2MET, além das informações de topografia, observações de temperatura e da reanálise ERA-Interim, foram considerados dados de temperatura da superfície estimada a partir de imagens de satélite do sensor MODIS LST (*Moderate resolution imaging spectroradiometer - Land Surface Temperature*) (BOISIER et al., 2018).

A radiação solar mensal (RS) foi obtida do banco de dados CRU-JRA, que consiste em uma composição entre dados interpolados da *Climatic Research Unit* (HARRIS et al., 2014) e dados da *Japanese Reanalysis* (KOBAYASHI et al., 2015). O objetivo do CRU-JRA foi produzir um banco de dados com uma melhor resolução espacial e temporal que pudessem ser utilizados como forçante de modelos. Para isso, os dados de reanálise do JRA foram processados para se ajustar aos da CRU quando existiam dados das duas bases. Os dados têm uma resolução espacial de 0,5 grau de latitude e longitude e uma resolução temporal de 6 horas. Para o presente estudo, foi utilizada uma média mensal dos dados de radiação solar.

Para o cálculo da umidade relativa (UR), foram usados os dados de umidade específica (q , equação 2.14) e pressão do ar (P) do CRU-JRA para o cálculo da pressão de vapor (e , equação 2.16) e a temperatura média do ar (T) do CR2MET para o cálculo da pressão de vapor de saturação (e_s , equação 2.15).

$$q = \frac{0,622 * e}{P - 0,378 * e} \rightarrow e = \frac{q * P}{0,622} \quad \text{Equação (2.14)}$$

P foi aproximada para 1000 hPa uma vez que não havia disponibilidade desta variável). Como $P \ll 0.378$, o termo do denominador foi aproximado para P . Para o cálculo de e_s e e foram usadas as equações 2.15 e 2.16, respectivamente:

$$e_s = 611 * e^{\left(\frac{12,27}{237,3 + T}\right)} \quad \text{Equação (2.15)}$$

$$e = \frac{UR * e_s}{100} \quad \text{Equação (2.16)}$$

A ETP foi calculada com base nos dados CRU-JRA e CR2MET e através de uma simplificação da equação Penman (FRAGOSO, 2009), que estima a evaporação potencial (EP) em mm/dia, de acordo com a equação 2.17.

$$EP = \left[\left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) * E_r + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) * E_a \right] \quad \text{Equação (2.17)}$$

Onde γ é a constante psicométrica (66,8 Pa/°C), Δ (equação 2.18) é o gradiente da curva de pressão de saturação (Pa/°C), E_r (equação 2.19) é a evaporação associada ao balanço de energia (mm/dia) e E_a (equação 2.20) é a evaporação associada a processos aerodinâmicos (mm/dia). Para a obtenção de ETP a partir de EP, multiplicou-se EP por um índice da cultura $kc=0.85$ (FRAGOSO, 2009), que corresponderia ao máximo desenvolvimento da pastagem.

$$\Delta = \frac{4098 * e_s}{(237,3 + T)^2} \quad \text{Equação (2.18)}$$

$$E_r = \frac{R_L}{I_v * \rho_w} * 86,4 * 10^6 \quad \text{Equação (2.19)}$$

$$E_a = B * (e_s - e) \quad \text{Equação (2.20)}$$

$$B = \frac{0,102 * u}{\left(\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)\right)^2} \quad \text{Equação (2.21)}$$

onde T é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), R_L é a radiação solar líquida (W m^{-2}), descontando o albedo, I_v é o calor latente de vaporização, no caso da água ($I_v = 2,501 * 10^6 - 2370 * T$ (J kg^{-1})) e ρ_w é a massa específica da água ($977 \text{ kg} * \text{m}^{-3}$), e_s é a pressão de vapor de saturação (equação 2.15) e e_a é a pressão de vapor do ar (equação 2.14) e, finalmente, B (equação 2.21) é um coeficiente associado à velocidade do vento (u , dado em ms^{-1}), à altura de rugosidade da superfície em questão (z_2 , que no caso da grama este valor varia entre 0,1 e 2 cm) e altura da medida do vento (z_1 , em geral 2 m acima do solo).

Devido à insuficiência de medidas experimentais de produção de biomassa das pastagens no Chile para longos períodos de tempo, optou-se por avaliar o comportamento do modelo SIMPRAD com dados de NDVI do sensor MODIS, com uma resolução espacial de 1 km e composição de imagens a cada 16 dias para o período 2000-2016³ (DALAGNOL et al., 2019). O NDVI é um indicador confiável para estudar mudanças na vegetação e integrado é um proxy para estudar a distribuição da produtividade e a cobertura vegetal (CHANG et al., 2018). Para obter os valores de NDVI de locais com presença de pastagens, foram selecionados pontos próximos às estações meteorológicas representativas de cada localidade, com cobertura do solo de tipo pastagem e matagal na região de Coquimbo com base no mapa de cobertura do solo do Chile continental para o ano 2014 (ZHAO et al., 2016).

³ Obtidos de <https://zenodo.org/record/3159488#.Xmf6NqhKhPZ>

Para avaliar o comportamento do modelo SIMPRAD, foi feita a comparação da curva acumulada de biomassa das pastagens simulada pelo SIMPRAD com a soma de NDVI para cada uma das nove localidades consideradas neste estudo. Calculou-se a correlação de Pearson (R) e o p-valor.

Para as análises de biomassa e das variáveis climáticas foi selecionado o período de maio a novembro, que é considerado o período de crescimento da pastagem na região de Coquimbo. A análise foi feita em dois períodos: período 1980-1999 (P1) e período 2000-2016 (P2). Neste último período se inclui a grande seca acontecida na região (GARREAUD et al., 2019)

Foram obtidas as relações entre biomassa e precipitação através de correlações. A distribuição anual da precipitação média foi comparada a da produção de biomassa média para os diferentes períodos, com a finalidade de investigar a ocorrência de mudanças importantes nessas variáveis. Também, foi obtido o número de semanas com ocorrência de precipitação para cada ano.

2.3.2. Cenários climáticos futuros

Para o futuro, foram utilizados pontos representativos de 5 localidades (Illapel, Ovalle, Punitaqui, Salamanca e La Serena). As outras 4 localidades utilizadas na análise para o clima presente foram excluídas na análise do clima futuro porque apresentavam problemas nos valores de ETP.

Os dados para o clima futuro foram obtidos a partir do downscaling de projeções climáticas do modelo global MPI-ESM sob o cenário RCP8.5 (VAN VUUREN et al., 2011) utilizando o modelo RegCM4. Esse downscaling foi realizado pelo *Center for Climate and Resilience Research* (CR2) em colaboração com o Laboratório Nacional de Computação de Alto Rendimento (NLHPC) e com a gerência do Ministério de Meio Ambiente do Chile. As simulações tem uma resolução espacial de 10 km e foram realizadas para um período histórico (1979-2015) e futuro (2016-2095).

Foi realizada uma correção de BIAS dos dados das projeções climáticas futuras regionalizadas, com base na metodologia descrita por Hempel et al.

(2013). Seguindo essa metodologia, os dados obtidos pelo RegCM4 para o período histórico (1985-2005) foram comparados a dados correspondentes considerados como “reais”, obtidos de bases de dados confiáveis para as localidades consideradas. As bases de dados para comparação foram o CR2MET para as variáveis de temperatura média, máxima, mínima e precipitação; e o *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS) para as demais variáveis utilizadas. Os dados do GLDAS são produzidos através da assimilação de dados de satélite e de estações de observação por um modelo de superfície de última geração, produzindo informações sobre as condições e os fluxos de superfície (RODELL et al., 2004). A comparação entre os dados modelados e sua respectiva base de dados utilizada (CR2MET ou GLDAS) forneceu um fator de relacionamento que foi aplicado à projeção climática futura do RegCM para obter um valor corrigido. Seguindo Hempel et al. (2013), essa correção foi feita de forma aditiva no caso da temperatura do ar e multiplicativa para as demais variáveis consideradas. No caso da evapotranspiração potencial, não foi aplicada esta correção, pois esta foi calculada com dados já corrigidos.

A seguir, essa metodologia é descrita de forma mais detalhada: os dados do modelo no período histórico são comparados com dados observados de onde se obtém um fator de relação (C) entre as duas bases de dados (equações 2.22 para o caso aditivo e 2.24 para o multiplicativo). Este fator é então aplicado à projeção do modelo (de forma aditiva no caso de temperatura (equação 2.23) e multiplicativa para as outras variáveis (equação 2.25), obtendo-se um valor corrigido ($Proj_i^{mod}$)

$$C = \frac{(\sum_{i=1}^{nanos} Var_i^{obs} - \sum_{i=1}^{nanos} Var_i^{mod})}{nanos} \quad \text{Equação (2.22)}$$

$$Proj_i^{mod} = C + Proj_i^{mod} \quad \text{Equação (2.23)}$$

$$C = \frac{(\sum_{i=1}^{nanos} Var_i^{obs})}{\sum_{i=1}^{nanos} Var_i^{mod}} \quad \text{Equação (2.24)}$$

$$Porj_i^{mod} = C * Proj_i^{mod} \quad \text{Equação (2.25)}$$

onde $nanos$ é o número de anos considerados no período histórico, no caso 21 (de 1985 a 2005).

Como a correção de bias considera uma média para todo o período, este ciclo acaba se compensando, deixando os valores de média bastante razoáveis e permitindo sua utilização nesta parte do processo.

Para as análises do clima futuro foram considerados os períodos 2020-2044 (P1-proj) e 2070-2094 (P2-proj). Foram obtidas as relações entre biomassa e precipitação através de correlações. Além disso, foi obtida a tendência linear para as mesmas variáveis. A distribuição anual da precipitação média foi comparada a da produção de biomassa média para os diferentes períodos, com a finalidade de investigar a ocorrência de mudanças importantes nessas variáveis.

Para o presente e o cenário futuro foram calculadas espacialmente as tendências de precipitação, temperatura média, temperatura máxima e temperatura mínima para o presente e o cenário futuro. Além disso, foram calculados os índices climáticos de dias úmidos (precipitação diária > 1 mm) e máximo de dias secos consecutivos para os períodos completos.

3. IMPACTOS DA VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO EM PASTAGENS DA REGIÃO DE COQUIMBO NO CLIMA PRESENTE

3.1. Variabilidade climática e biomassa das pastagens na região de Coquimbo

3.1.1. Precipitação e produção de pastagens

Com o objetivo de investigar quão semelhante é a produção de biomassa simulada pelo modelo SIMPRAD aos correspondentes valores indicados por NDVI, foi feita a comparação das curvas de biomassa acumulada das pastagens com a soma de NDVI para as nove localidades consideradas neste estudo. A Tabela 3.1 mostra a correlação de Pearson e o p-valor para o período ativo do ciclo de crescimento das pastagens. A correlação é positiva, boa e significativa (p -valor $< 0,05$) em todas as localidades. A alta correlação se deve ao fato de o modelo avaliar o crescimento semanal da biomassa da pastagem e o NDVI ser uma medida indireta dessa mesma biomassa. Portanto, o modelo pode ser considerado uma boa abordagem para avaliar a quantidade de biomassa na área.

Tabela 3.1 - Relação entre a soma do NDVI e a biomassa acumulada (kg/ha) simulada pelo modelo SIMPRAD para o período 2000-2016 entre os meses de maio e novembro.

	R	p-valor
La Serena	0.53	0.029
Vicuña	0.63	0.007
Ovalle	0.53	0.028
Punitaqui	0.54	0.024
Combarbala	0.49	0.047
La Canela	0.58	0.014
Illapel	0.60	0.01
Salamanca	0.54	0.024
Los Vilos	0.69	0.002

R: Coeficiente de correlação de Pearson. *: não significativo ($p - \text{valor} > 0,05$).

Na Tabela 3.2 observa-se a relação entre a biomassa anual acumulada e a precipitação anual. Nota-se uma alta correlação entre essas duas variáveis, com exceção de Los Vilos no período P2 ($R=0,36$ e $p\text{-valor}>0,05$). Esta relação entre a precipitação e a produção de biomassa tem sido encontrada em outros locais com ecossistemas com água limitada (YANG et al., 2008). Para La Serena e Vicuña as correlações são similares nos dois períodos, com menos de 10% de diferença entre os valores para P1 e P2, já para Ovalle os resultados mostram maior correlação no período P2. Por outro lado, considerando as localidades a partir de Punitaqui em direção ao sul, as correlações são menores no segundo período. Isso poderia ser explicado por mudanças na distribuição das precipitações durante o ano, como também pela variação de outras variáveis climáticas utilizadas no cálculo de biomassa no modelo, como efeito da temperatura e da água disponível no solo.

Tabela 3.2 - Relação entre a precipitação em mm e a biomassa (kg/ha), 10 simulada pelo modelo SIMPRAD para diferentes períodos.

	1980-2016		1980-1999		2000-2016	
	R	p-valor	R	p-valor	R	p-valor
La Serena	0.74	1.9×10^{-7}	0.82	8.5×10^{-6}	0.86	1.2×10^{-5}
Vicuña	0.83	1.4×10^{-10}	0.87	8.4×10^{-7}	0.80	1.2×10^{-4}
Ovalle	0.68	3.3×10^{-6}	0.69	8.2×10^{-4}	0.82	4.9×10^{-5}
Punitaqui	0.63	2.8×10^{-5}	0.71	4.3×10^{-4}	0.62	7.3×10^{-3}
Combarbala	0.70	2.6×10^{-6}	0.77	5.9×10^{-5}	0.59	0.01
La Canela	0.76	4.6×10^{-8}	0.77	7.0×10^{-5}	0.67	3.2×10^{-3}
Illapel	0.72	4.1×10^{-7}	0.76	1.1×10^{-4}	0.62	7.6×10^{-3}
Salamanca	0.79	1.1×10^{-6}	0.78	5.6×10^{-5}	0.49	0.047
Los Vilos	0.65	2.5×10^{-5}	0.74	4.3×10^{-4}	0.36	0.15*

R: Coeficiente de correlação de Pearson. *: não significativo (p – valor > 0,05).

3.1.2. Séries temporais de precipitação anual e biomassa anual

Dada a relação entre a produção de biomassa simulada pelo modelo e a precipitação, será analisado o impacto que podem ter as mudanças na variabilidade das chuvas sobre as pastagens na região de Coquimbo.

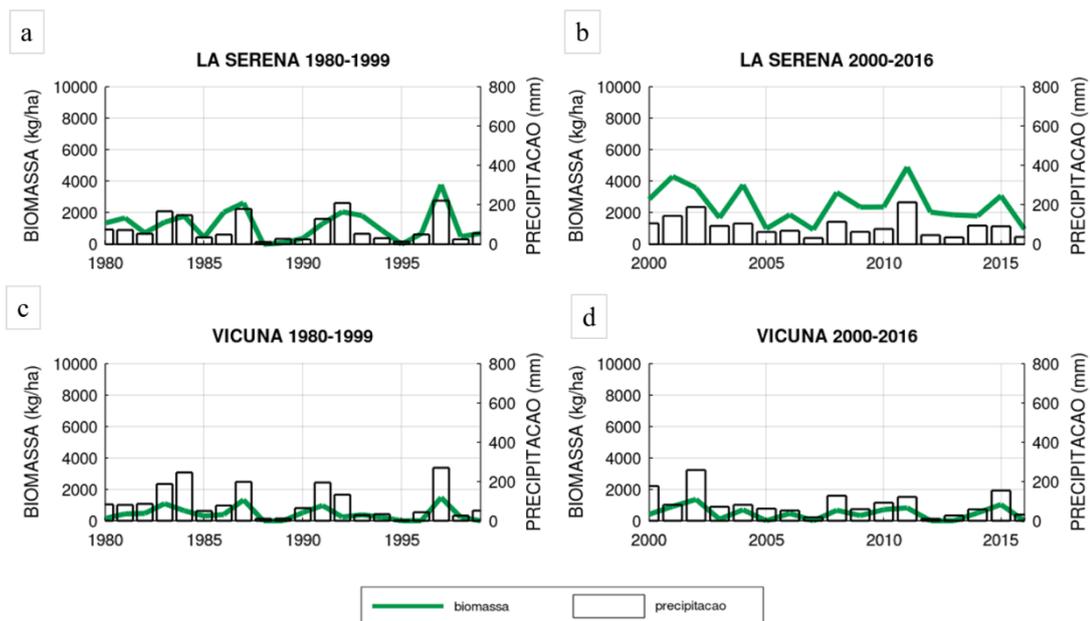
A média anual da precipitação por período para cada localidade (Tabela 3.3) mostra como a precipitação aumenta, em geral, com a latitude na região. Nota-se uma diminuição da precipitação no período P2, exceto para La Serena, em que há um aumento, e para Ovalle, que se mantém o mesmo valor. O máximo de precipitação, considerando toda a série temporal, é observado no primeiro período para todas as localidades (Tabela 3.3), associado aos anos “El Niño” 1987 e 1997.

Tabela 3.3 - Média da precipitação total anual (mm) (esquerda) e precipitação total anual máxima (mm) (direita) nos períodos 1980-2016, 1980-1999 e 2000-2016 para todas as localidades.

	MÉDIA ANUAL			MÁXIMA ANUAL		
	1980-2016	1980-1999	2000-2016	1980-2016	1980-1999	2000-2016
La Serena	86.6	81.6	92.6	221.7	221.7	213.1
Vicuña	90.6	93.7	86.9	269.5	269.5	258.2
Ovalle	103.4	103.4	103.4	299.7	299.7	200.6
Punitaqui	149.4	154.2	143.7	510.5	510.5	330.0
Combarbala	190.8	209.1	169.2	604.7	604.7	426.2
La Canela	153.5	166.9	137.7	499.9	499.9	281.3
Illapel	166.0	173.5	157.3	498.4	498.4	383.8
Salamanca	224.6	245.2	200.4	784.2	784.2	519.0
Los Vilos	228.6	256.9	198.7	714.4	714.4	599.7

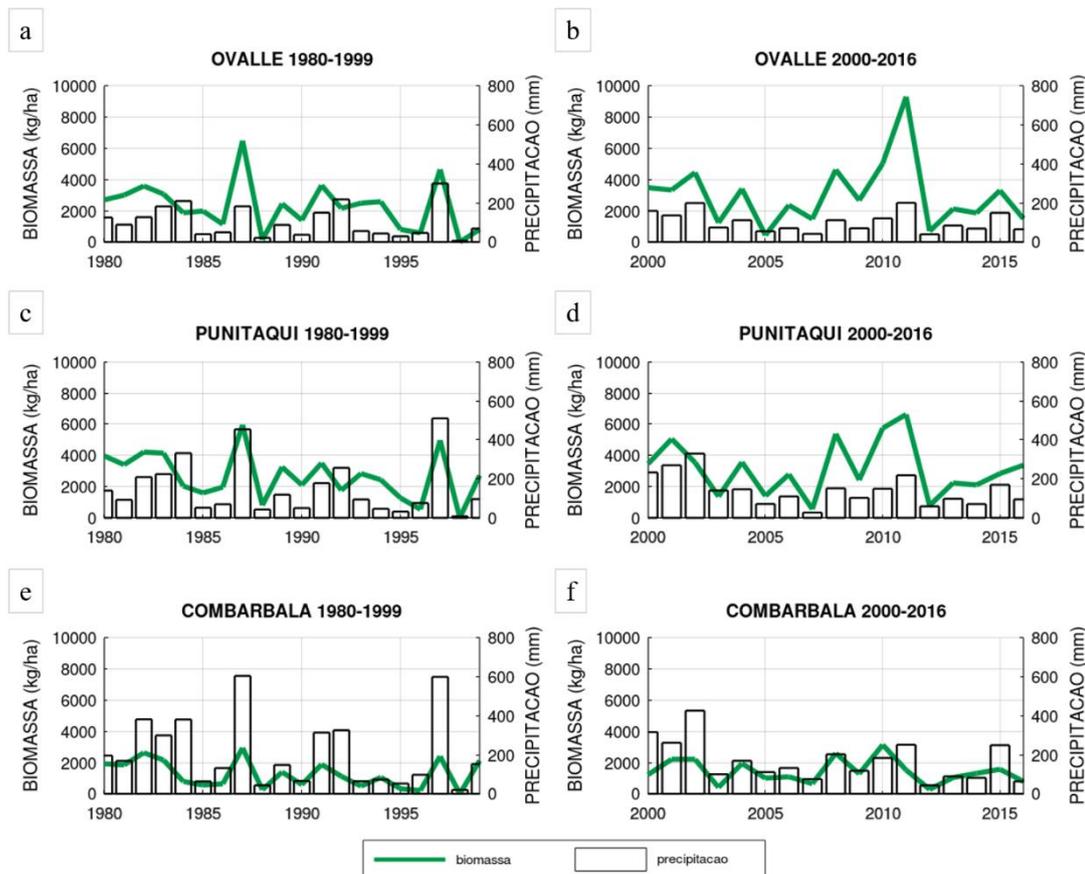
As Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 mostram que a variabilidade interanual é bem pronunciada para todas as localidades, com anos com altas e baixas quantidades de precipitação anual, em sua maioria coincidentes com anos El Niño e La Niña, respectivamente. Os anos com as mais altas quantidades de precipitação tendem a se concentrar em P1 e são muito mais evidentes nas localidades mais ao sul. A biomassa acumulada simulada, por sua vez, acompanha as quantidades anuais de precipitação na maioria dos anos em todas as localidades. Porém, como será discutido mais adiante, em alguns anos ocorre que, apesar de duas localidades apresentarem totais de precipitação anual similares, suas respectivas quantidades de biomassa acumulada no ano são marcadamente diferentes. Swemmer et al., 2007 mostraram que em regiões secas (áridas ou semiáridas) o crescimento da vegetação é associado não apenas à média de precipitação, mas também à sua distribuição, além de a outros fatores relacionados ao solo e ao tipo de vegetação.

Figura 3.1 – Biomassa de pastagens (kg/ha) e precipitação anual (mm) para La Serena e Vicuña.



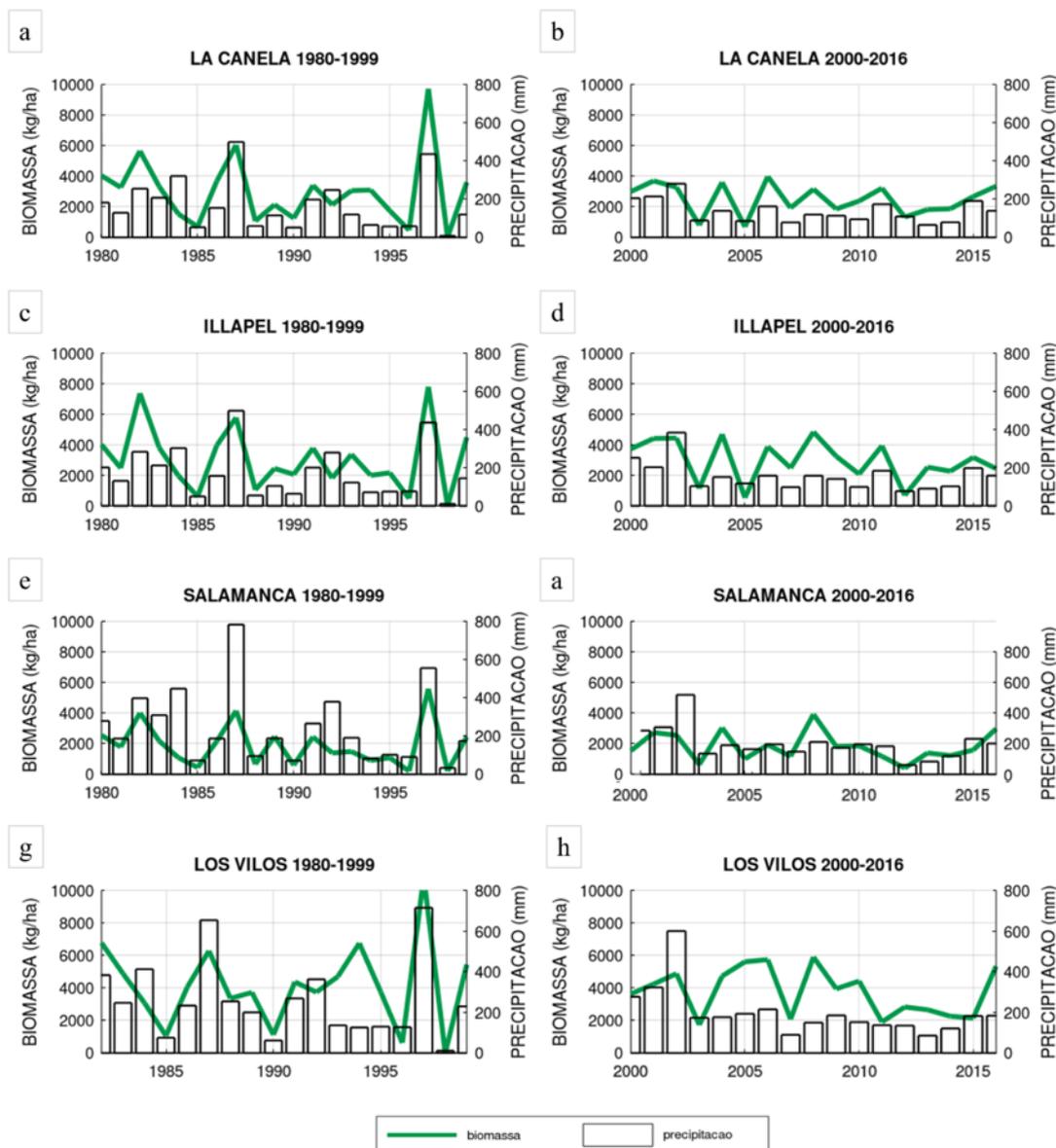
La Serena (a, b) e Vicuña (c, d) nos períodos: 1980-1999 (à esquerda) e 2000-2016 (à direita). Intervalo de maio a novembro.

Figura 3.2 – Biomassa de pastagens (kg/ha) e precipitação anual (mm) para Ovalle, Punitaqui e Combarbala.



Ovalle (a, b), Punitaqui (c, d) e Combarbala (e, f), nos períodos: 1980-1999 (à esquerda) e 2000-2016 (à direita). Intervalo de maio a novembro.

Figura 3.3 – Biomassa de pastagens (kg/ha) e precipitação anual (mm) para La Canela, Illapel, Salamanca e Los Vilos.

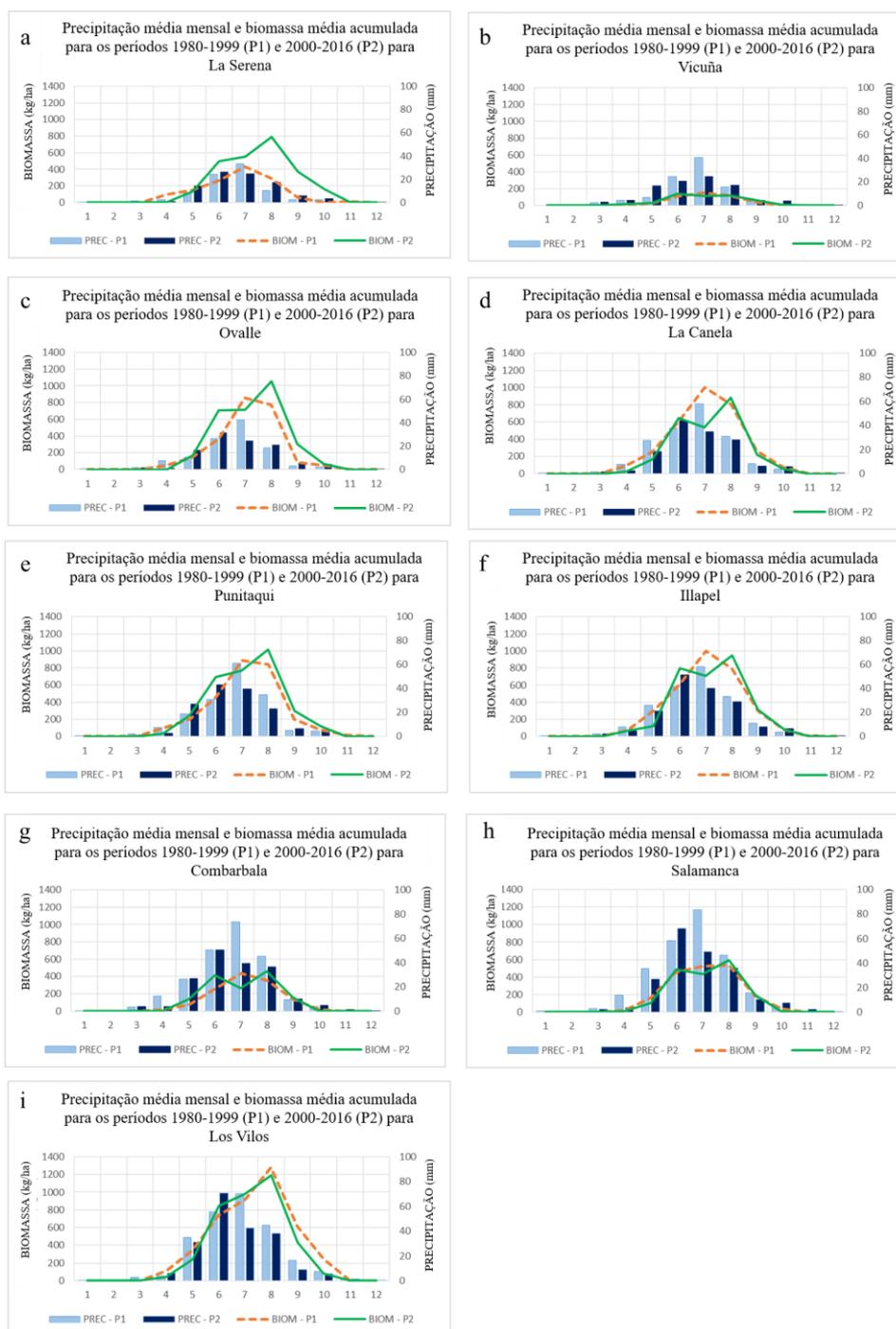


La Canela (a, b), Illapel (c, d), Salamanca (e, f) e Los Vilos (g, h), nos períodos: 1980-1999 (à esquerda) e 2000-2016 (à direita). Intervalo de maio a novembro.

Na Figura 3.4, pode-se observar que o regime de precipitação mensal durante o ano difere entre os períodos P1 e P2 em todas as localidades. Em P1, o máximo de chuvas acontece no mês de julho, enquanto que em P2 o máximo acontece no mês de junho. O máximo da biomassa acumulada para o período P1 ocorre no mês de julho, acompanhando o máximo de precipitação. Já em

P2, a biomassa acumulada tem um aumento no mês de junho, acompanhando o máximo de precipitação, para em seguida ter uma queda (ou permanecer a mesma) no mês de julho e voltar a subir no mês de agosto. Isso ocorre porque as temperaturas em julho ainda são muito baixas, o que interrompe o crescimento da pastagem. No período P1 a precipitação é menor de junho, de modo que não há produção suficiente biomassa para mostrar diminuição ou estagnação em julho. Além disso, o modelo é sensível às geadas, que podem levar a perdas de biomassa quando ocorrem. Esse comportamento não é notado em Los Vilos (Figura 3.4-i), onde, apesar de haver uma mudança no ciclo anual da precipitação com máximo em julho em P1 e em junho em P2, o ciclo da biomassa é similar para os dois períodos; o que pode estar relacionado a essa localidade não chegar a temperaturas mínimas muito baixas, já que está localizada no litoral da região, onde efeito do oceano funciona como regulador das temperaturas mínima e máxima.

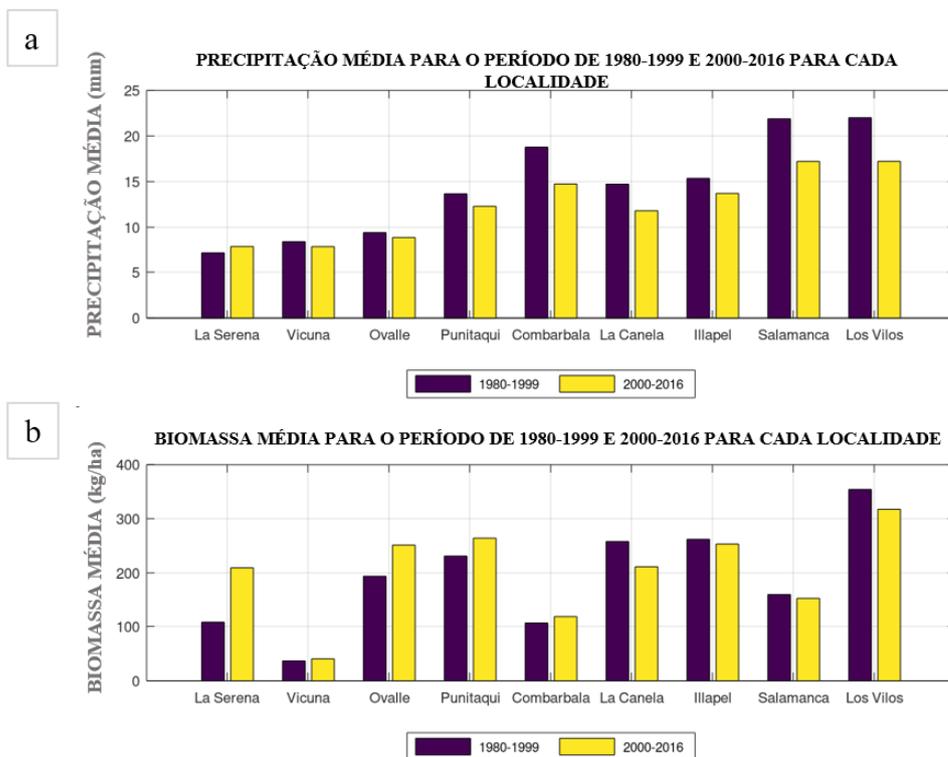
Figura 3.4 – Médias mensais da biomassa acumulada (kg/ha) e da precipitação (mm).



La Serena (a), Vicunha (b), Ovalle (c), La Canela (d), Punitaqui (e), Illapel (f), Combarbala (g), Salamanca (h) e Los Vilos (i), nos períodos: 1980-1999 (barra azul clara: precipitação e linha laranja: biomassa acumulada) e 2000-2016 (barra azul escura: precipitação e linha verde: biomassa acumulada).

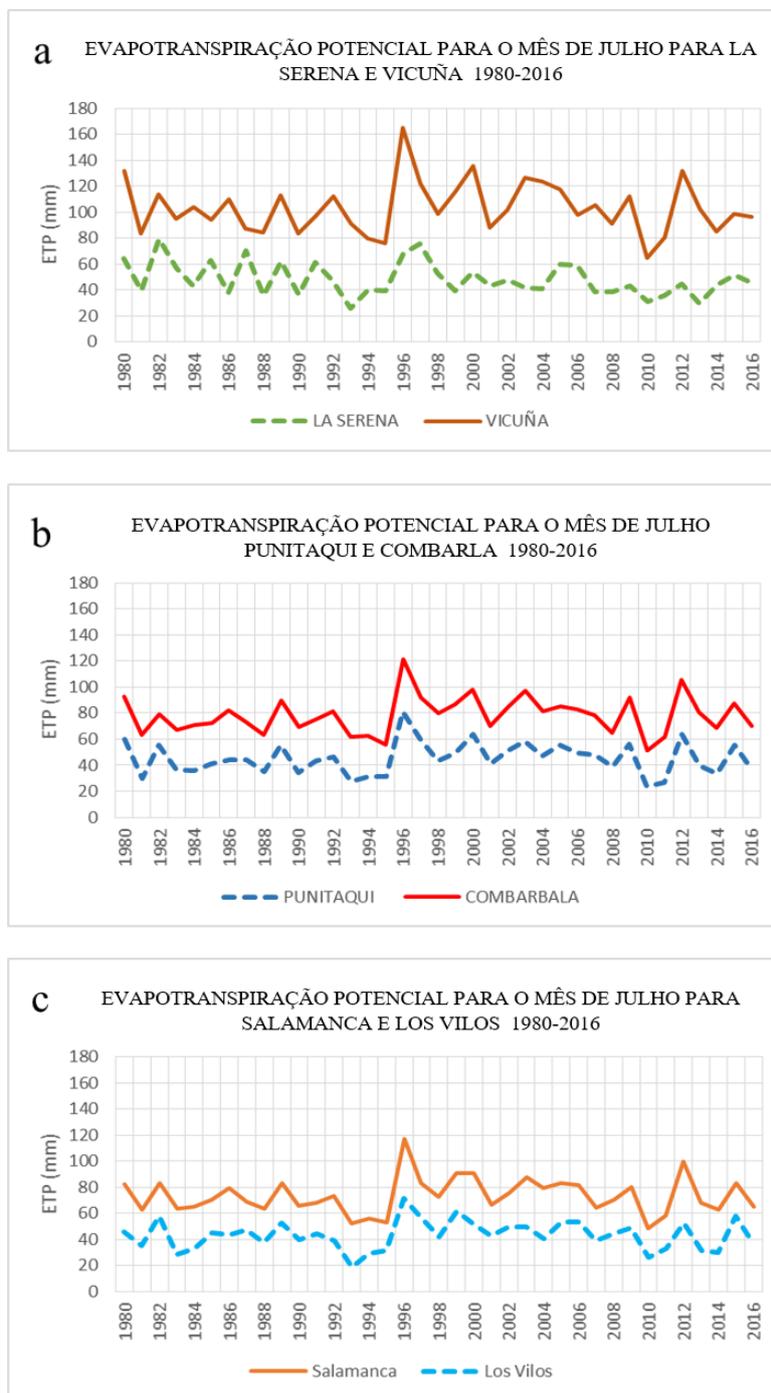
A Figura 3.5 mostra que as duas localidades mais secas no norte da região de estudo, La Serena e Vicuña, apresentam médias de precipitação similares nos períodos P1 e P2, mas as médias de biomassa acumulada são maiores em La Serena nos dois períodos, como também pode ser observado pelas séries temporais na Figura 3.1. Ambas as localidades estão localizadas na província de Elqui, no norte da região de Coquimbo, mas La Serena se localiza próximo ao litoral no nível do mar, enquanto Vicuña está situada no interior do Vale de Elqui, a uma altura de 730 m (Figura 2.1). Assim, Vicuña, mais elevada, apresenta maiores taxas de evapotranspiração (Figura 3.6-a), o que torna a precipitação menos eficiente para o crescimento da pastagem nessa localidade.

Figura 3.5 - Médias de precipitação (mm) e biomassa acumulada (kg / ha) para os períodos P1 e P2.



Períodos 1980-1999 (azul) e 2000-2016 (amarelo) para todas as localidades. (a) precipitação média anual (mm) e (b) biomassa acumulada média anual de pastagens (kg / ha).

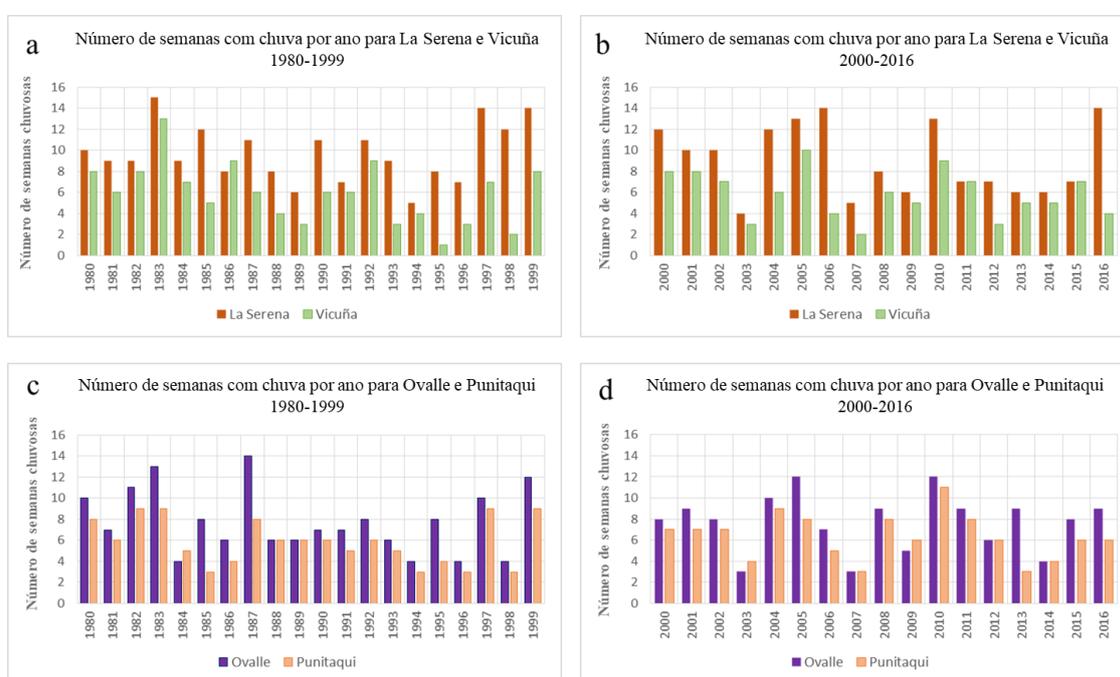
Figura 3.6 – Comparação da ETP para o mês de julho entre algumas das localidades estudadas no presente.



(a) La Serena (tracejado verde) e Vicuña (linha marrom), (b) Combarbala (linha vermelha) e Punitaqui (tracejado azul escuro) e (c) Salamanca (linha laranja) e Los Vilos (tracejado azul claro), 1980-2016.

Nas Figuras 3.7-a e 3.7-b, pode-se observar que em La Serena o número de semanas com chuvas é maior que em Vicuña, indicando uma melhor distribuição das chuvas no primeiro local para os dois períodos, o que também pode ser uma das causas na diferença nos valores de biomassa. Isso foi abordado por Swemmer et al., (2007) que, utilizando dados de experimentos, mostraram que a duração dos eventos de precipitação pode afetar a produção da vegetação, independentemente da quantidade total de chuvas.

Figura 3.7 - Número de semanas com precipitação por ano para o presente em algumas localidades.



La Serena (barra marrom) e Vicunha (barra verde), nos períodos de (a) 1980 a 1999 e (b) 2000 a 2016 e para Punitaqui (barras laranja) e Ovalle (barras roxas) nos períodos de (c) 1980-1999 e (d) 2000-2016.

Ovalle, Punitaqui e Combarbala são localizadas no interior da província do Limari, no centro da região de Coquimbo (Figura 2.1). As duas primeiras têm uma altura similar, de 220 e 280 metros, respectivamente, enquanto Combarbala está a 870 metros de altura. Nesta região a precipitação é maior que no Vale de Elqui (Tabela 3.3). Punitaqui apresenta maior precipitação

média que Ovalle em ambos os períodos (Figura 3.5-a), mas a produção da biomassa média é muito similar (Figura 3.5-b). Nas Figuras 3.7-c e 3.7-d, observa-se que o número de semanas com chuvas por ano é maior em Ovalle em ambos os períodos. Assim, como discutido previamente ao se comparar La Serena e Vicuña (Figuras 3.7-a e 3.7-b), essa melhor distribuição das chuvas em Ovalle pode justificar por que as médias de biomassa acumulada são similares nas duas localidades, mesmo com maiores médias de precipitação em Punitaqui. Conforme mostrado na Figura 3.5, Ovalle exibe médias de precipitação similares entre os períodos P1 e P2, mas a média de biomassa acumulada é maior no período P2. Observando-se o comportamento do ciclo anual das médias mensais de precipitação e de biomassa acumulada na Figura 3.4-c, pode-se observar que a chuva apresenta valores maiores nos meses de agosto e setembro no período P2 do que no período P1. Nessa época do ano, as temperaturas começam a aumentar, levando a um aumento da biomassa acumulada na estação da primavera. É importante ressaltar também que o aproveitamento da chuva é maior nos meses de primavera, quando as temperaturas são menos restritivas, gerando uma maior resposta produtiva.

Os valores de precipitação são maiores em Combarbala em relação às demais localidades da província de Limari discutidas acima, mas a produção de biomassa é menor (Figura 3.2 e Figura 3.5). A Figura 3.6-b mostra a série temporal de ETP do mês de julho para Combarbala e Punitaqui (Ovalle apresenta valores similares de ETP). Pode-se notar que a ETP é maior em Combarbala, o que indica uma menor eficiência da precipitação para o crescimento da vegetação.

La Canela, Illapel, Salamanca e Los Vilos estão localizadas na província do Choapa, na área mais ao sul da região de Coquimbo. A Figura 3.5-a indica que, comparadas com as localidades da província imediatamente ao norte (Limari), as médias de precipitação de La Canela e Illapel são similares às de Punitaqui, embora menores que as de Combarbala, que fica mais ao norte, mas a uma maior altura. Já as localidades localizadas no setor sul da província (Salamanca e Los Vilos) exibem as maiores médias de precipitação da área de

estudo (Figura 3.5-a), devido à maior frequência de sistemas frontais. O comportamento das médias de precipitação (Figura 3.5-a) em relação às médias de biomassa acumulada (Figura 3.5-b) é similar entre La Canela e Illapel para ambos períodos. O ciclo anual mostrado nas Figuras 3.4-d e 3.4-f indicam que a distribuição média mensal da precipitação também é similar. Como se mencionou anteriormente, a biomassa acumulada tem um pico em julho em P1, enquanto que em P2 a mesma decresce no mês de julho; e isso ocorre de modo bem mais pronunciado que nas outras localidades.

Em Salamanca, apesar das médias de precipitação nos períodos P1 e P2 serem similares às de Los Villos e maiores do que em La Canela e Illapel (Figura 3.5-a), a produção de biomassa média é menor do que nessas outras localidades (Figura 3.5-b). Salamanca se encontra numa região de maior altura (510 metros) em relação às outras localidades da província e tem valores mais altos de ETP (vide Figura 3.6-c para a ETP em Salamanca comparada com a de Los Villos), deixando uma menor quantidade de água disponível para o crescimento da vegetação. Observa-se, na Figura 3.4-h, uma mudança no ciclo anual da biomassa para o período P2, mas menos intenso que nas localidades anteriores. Já Los Vilos, apresenta uma maior precipitação média anual e biomassa acumulada média anual em P1 do que em P2 (Figura 3.5). Nesta localidade, como dito anteriormente, a mudança do pico de precipitação no ciclo anual em P2 parece não ter uma consequência na biomassa (Figura 3.4), como nas outras localidades, mas é importante lembrar que a correlação entre a precipitação e biomassa é baixa e não significativa (Tabela 3.4).

Considerando-se os resultados analisados nesta seção, é importante ressaltar que a produção de biomassa na região está diretamente associada à distribuição anual de chuva, assim como ao total. Isto significa que anos com menos chuva, mas com uma distribuição mais homogênea, podem estar diretamente associados a valores altos de biomassa.

Observou-se que uma mudança no ciclo anual da precipitação do período P1 para o P2 levou a uma mudança também no ciclo anual da biomassa. Com exceção da localidade litorânea Los Vilos, observou-se, no período P2, um

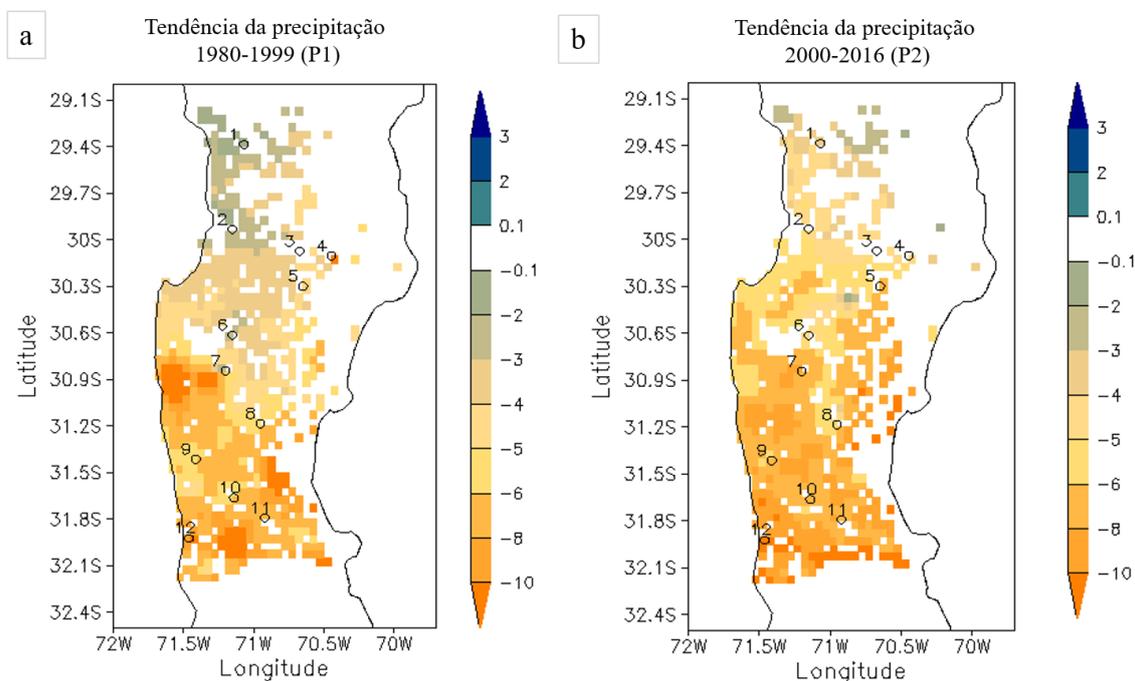
aumento da biomassa no mês de junho com uma diminuição posterior no mês de julho. Esse comportamento poderia levar a uma intensificação da exploração das pastagens pela suposição de que o aumento no mês de junho se manteria no mês seguinte, levando a um aumento do número de animais, o que deixaria a terra suscetível a uma intensificação nos processos de desertificação que já acontecem nesta região. Além disso, foi observado que com chuvas menos distribuídas a biomassa pode ser menor, de modo que se as secas continuarem sendo intensas e extensas no tempo, como a MS descrita por Garreaud et al (2019), as precipitações poderiam se concentrar em poucos eventos, aumentando a vulnerabilidade desta região à desertificação.

3.1.2. Tendências e índices climáticos

Nesta seção são apresentados diferentes índices climáticos e tendências com a finalidade de obter uma melhor compreensão sobre a relação entre as variáveis climáticas e a degradação da vegetação. A obtenção das tendências e índices climáticos para a região de Coquimbo foi realizada utilizando-se uma máscara para considerar somente as áreas onde existe vegetação natural.

As Figuras 3.8-a e 3.8-b mostram as tendências da precipitação entre os meses de maio e novembro para os dois períodos analisados, 1980-1999 (P1) e 2000-2016 (P2), respectivamente. Pode-se observar que nos dois períodos a precipitação tende a diminuir; e essa diminuição acentua-se mais, em geral, em direção ao sul da região de estudo (chegando ao máximo de 10 mm/ano), que é menos seca que a parte norte. Na maior parte da região a diminuição da precipitação é maior em P2, com exceções em alguns pontos no sul da região e próximo à costa ao redor da latitude de 30.9°S. Em todas as localidades de estudo numeradas na Figura 2.1, a tendência negativa é mais acentuada no período P2.

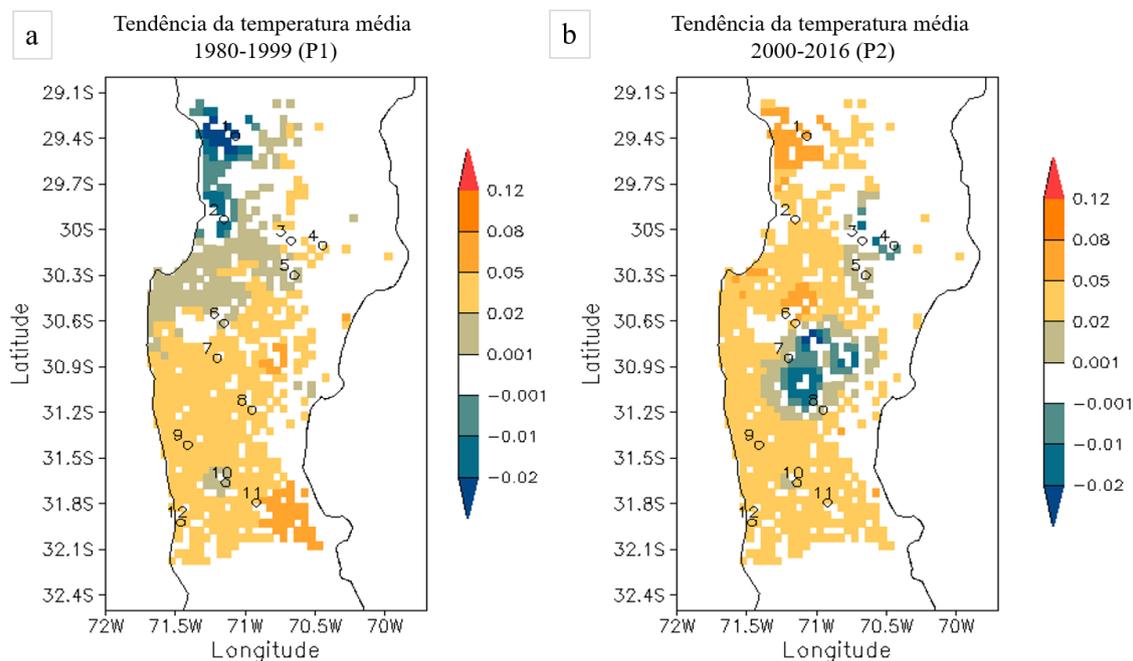
Figura 3.8 - Tendência da precipitação anual (mm/ano) de maio a novembro para a região de Coquimbo no presente.



Períodos a: 1980-1999 (P1) e b: 2000-2016 (P2), obtida a partir dos dados de precipitação do CR2MET. Os números referem-se às localidades: (1) El Trapiche, (2) La Serena, (3) Vicuña, (4) Monte Grande, (5) Hurtado, (6) Ovalle, (7) Punitaqui, (8) Combarbala, (9) La Canela, (10) Illapel, (11) Salamanca e (12) Los Vilos.

As tendências da temperatura média mostradas na Figura 3.9 indicam, em geral, um aumento da temperatura média na região em ambos períodos, com tendências positivas entre 0,02 e 0,05 °C/ano na maior parte da região, alcançando 0,08 °C/ano em algumas áreas. Nota-se exceções (tendências negativas) no período P1 próximo ao litoral na parte norte da região, onde estão situadas as localidades de El Trapiche e La Serena (números 1 e 2 na Figura 3.9-a); e no período P2 próximo às localidades Punitaqui e Combarbala (números 7 e 8 na Figura 3.9-b). Não obstante, nos pontos onde as tendências são negativas, os valores são baixos, não ultrapassando -0,02 °C/ano.

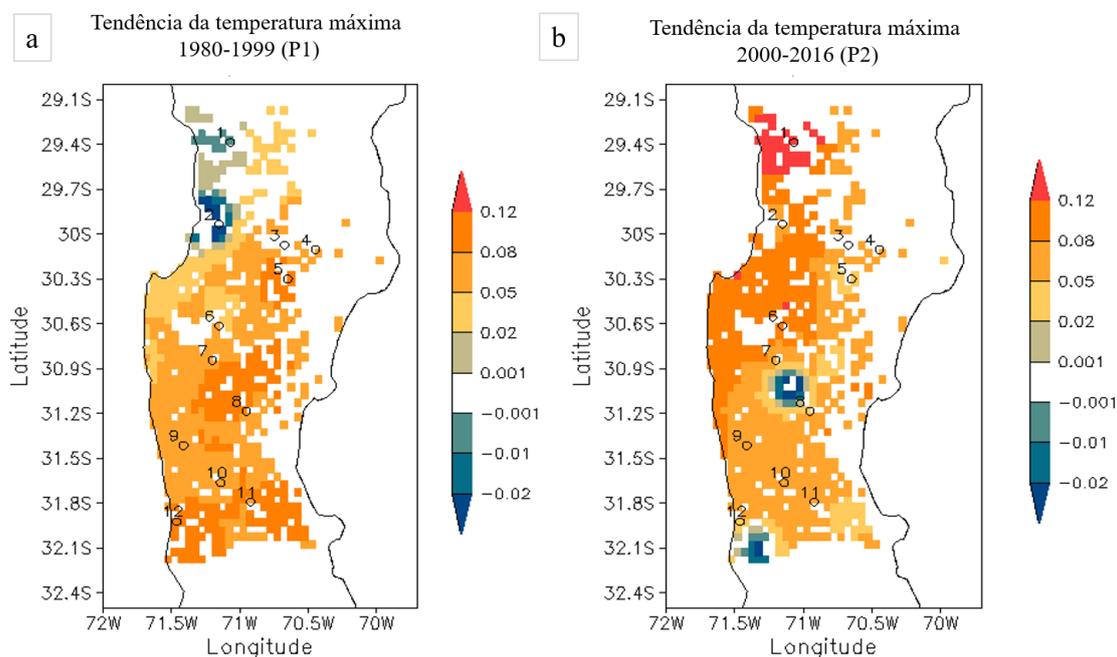
Figura 3.9 - Tendência da temperatura média (°C/ano) de maio a novembro para a região de Coquimbo no presente.



Períodos a: 1980-1999 (P1) e b: 2000-2016 (P2) obtida a partir dos dados de temperatura do CR2MET. Os números referem-se às localidades: (1) El Trapiche, (2) La Serena, (3) Vicuña, (4) Monte Grande, (5) Hurtado, (6) Ovalle, (7) Punitaqui, (8) Combarbala, (9) La Canela, (10) Illapel, (11) Salamanca e (12) Los Vilos.

As Figuras 3.10-a e 3.10-b mostram uma tendência de aumento das temperaturas máximas em praticamente toda a região de estudo para ambos os períodos P1 e P2, sendo que esse aumento é maior na metade norte da região de Coquimbo (ao norte da latitude 30.9°S) no período P2. Há exceções, isto é, tendências negativas, em áreas similares às que apresentam tendências negativas também para as temperaturas médias (c.f. Figuras 3.9 e 3.10).

Figura 3.10 - Tendência da temperatura máxima (°C/ano) de maio a novembro para a região de Coquimbo no presente.

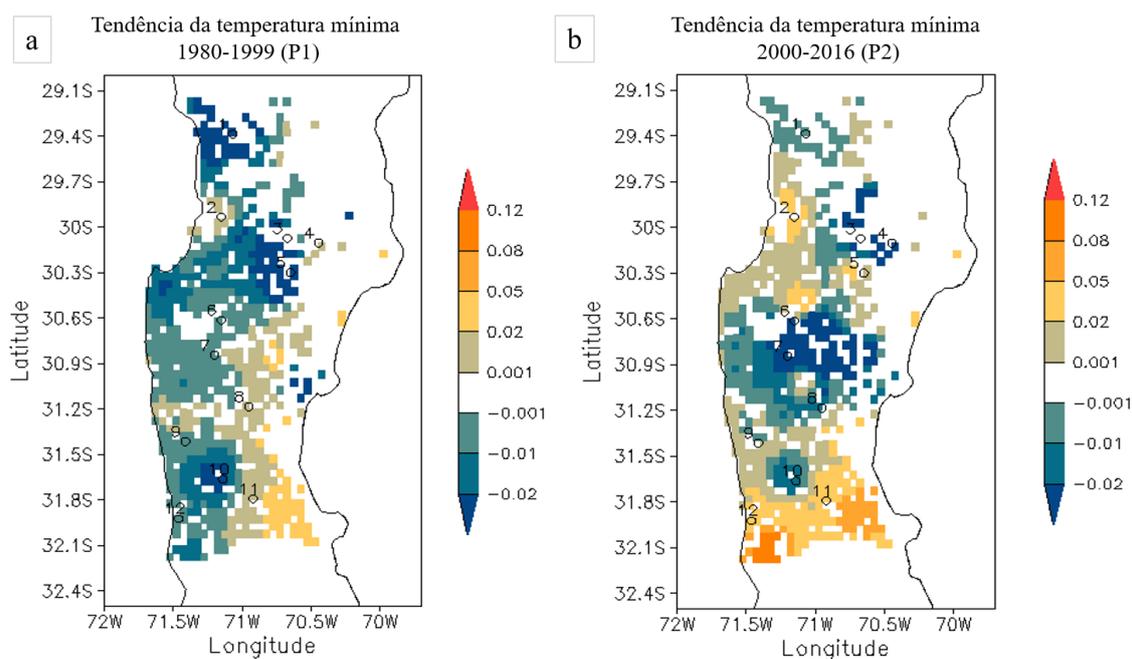


Períodos a: 1980-1999 (P1) e b: 2000-2016 (P2) obtida a partir dos dados de temperatura do CR2MET. Os números correspondem às localidades: (1) El Trapiche, (2) La Serena, (3) Vicuña, (4) Monte Grande, (5) Hurtado, (6) Ovalle, (7) Punitaqui, (8) Combarbala, (9) La Canela, (10) Illapel, (11) Salamanca e (12) Los Vilos.

Nas Figuras 3.11-a e 3.11-b, observa-se que em algumas áreas há tendência de aumento também para a temperatura mínima, com as maiores tendências na parte sul (onde estão localizadas as localidades Los Vilos e Salamanca) no período P2, alcançando até 0,12 °C/ano. Nota-se que as áreas com tendências negativas estão mais concentradas no centro da região no período P2, enquanto que no período P1 há mais áreas com tendências negativas, mas mais concentradas na faixa oeste da região. Destaca-se que as áreas para as quais foram observadas tendências negativas para a temperatura média e a temperatura máxima, isto é, as áreas próximas às localidades El Trapiche e La Serena (números 1 e 2) no período P1 e às localidades Punitaqui e Combarbala (números 7 e 8) no período P2, apresentam também indicação de

diminuição da temperatura ao longo dos respectivos períodos do ponto de vista da temperatura mínima.

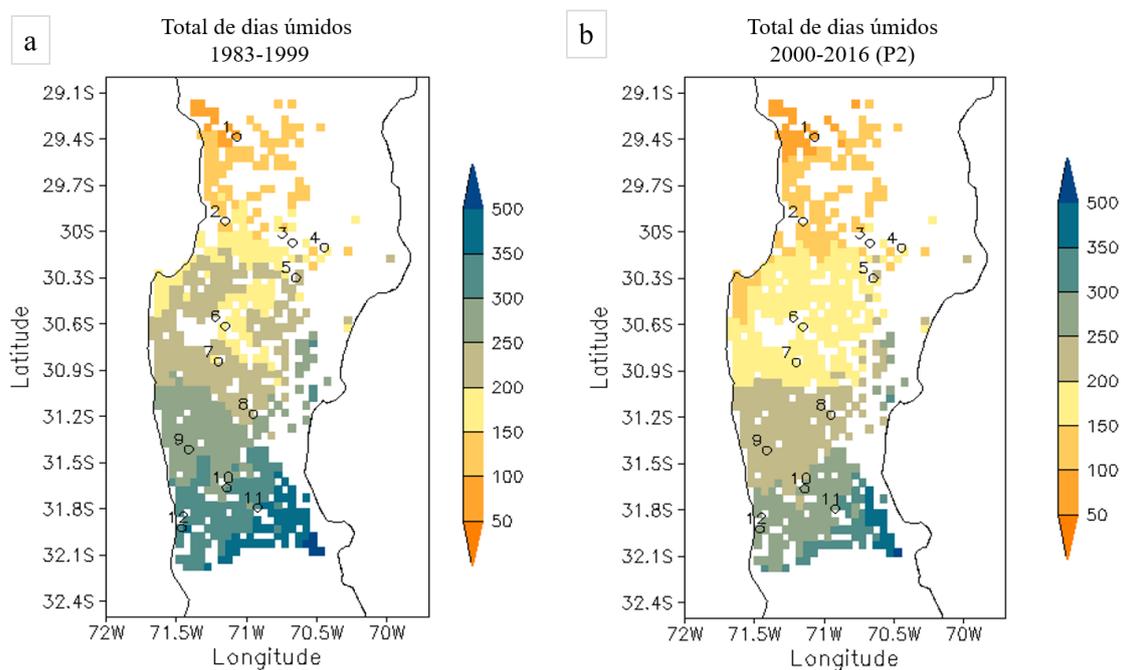
Figura 3.11 - Tendência da temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}/\text{ano}$) de maio a novembro para a região de Coquimbo no presente.



Períodos a: 1980-1999 (P1) e b: 2000-2016 (P2) obtida a partir dos dados de temperatura do CR2MET. Os números correspondem às localidades: (1) El Trapiche, (2) La Serena, (3) Vicuña, (4) Monte Grande, (5) Hurtado, (6) Ovalle, (7) Punitaqui, (8) Combarbala, (9) La Canela, (10) Illapel, (11) Salamanca e (12) Los Vilos.

Para o cálculo do total de dias úmidos e do máximo de dias secos consecutivos mostrados nas Figuras 3.12 e 3.13, respectivamente, o ano de 1983 foi considerado como o início do primeiro período, de modo a ter a mesma quantidade de anos nos dois períodos. Comparando-se as Figuras 3.12-a e 3.12-b nota-se uma diminuição do número de dias úmidos no período P2 para a maior parte da região, com uma redução da ordem de 50 dias em P2 comparado aos total de dias úmidos em P1. No entanto, em poucas áreas localizadas principalmente no norte da região (por exemplo, as localidades El Trapiche e La Serena) não há indicação de redução.

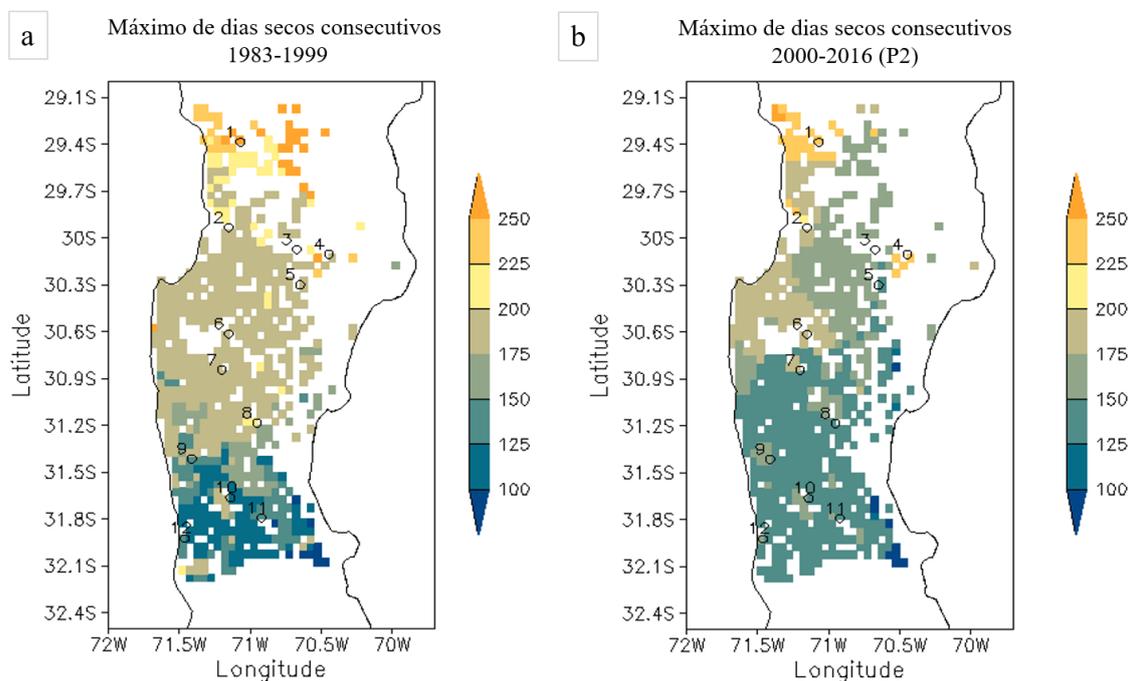
Figura 3.12 - Total de dias úmidos (de maio a novembro) para a região de Coquimbo no presente.



Períodos a: 1983-1999 e b: 2000-2016 obtido a partir dos dados de precipitação do CR2MET. Os números correspondem às localidades: (1) El Trapiche, (2) La Serena, (3) Vicuña, (4) Monte Grande, (5) Hurtado, (6) Ovalle, (7) Punitaqui, (8) Combarbala, (9) La Canela, (10) Illapel, (11) Salamanca e (12) Los Vilos.

Em relação ao máximo de dias secos consecutivos, comparando-se as Figuras 3.13-a e 3.13-b, nota-se uma diminuição no período P2 em relação a P1 na maior parte da região. No entanto, nota-se um aumento no máximo de dias secos consecutivos na parte localizada no sul da região, na província do Choapa, onde encontram-se as localidades La Canela, Illapel, Salamanca e Los Vilos (9, 10, 11 e 12, respectivamente). Em poucas áreas, como na localidade Ovalle (6) e vizinhanças, não são indicadas mudanças entre os dois períodos.

Figura 3.13 - Máximo número de dias secos consecutivos (de maio a novembro) para a região de Coquimbo no presente.



Períodos a:1983-1999 e b: 2000-2016 obtido a partir dos dados de precipitação do CR2MET. Os números correspondem às localidades: (1) El Trapiche, (2) La Serena, (3) Vicuña, (4) Monte Grande, (5) Hurtado, (6) Ovalle, (7) Punitaqui, (8) Combarbala, (9) La Canela, (10) Illapel, (11) Salamanca e (12) Los Vilos.

Os resultados desta seção de tendência de diminuição da precipitação e aumento das temperaturas na maior parte da região de Coquimbo podem estar associados a perdas na cobertura vegetal, que juntamente com os resultados encontrados na Seção 3.1.2, de mudança no ciclo anual da precipitação média, poderiam aumentar ainda mais o risco de intensificação da desertificação na região. A região mais vulnerável indicada é o sul da região, onde a aridez tem aumentado nas últimas décadas, em especial Los Vilos onde se observou uma maior diminuição da biomassa no período P2 (Seção 3.1.2).

4. PROJEÇÕES FUTURAS: VARIABILIDADE CLIMÁTICA E BIOMASSA DAS PASTAGENS NA REGIÃO DE COQUIMBO

4.1. Séries temporais de projeções futuras de precipitação anual e biomassa anual

Comparando as projeções da precipitação média para os dois períodos futuros, as localidades de Ovalle e Punitaqui apresentam uma diminuição na precipitação média no período P2-proj, enquanto La Serena e Salamanca apresentam um aumento na precipitação média no período P2-proj e Illapel mostra uma precipitação média muito similar, com menos de 1% de diferença entre os dois períodos (Tabela 4.1). O máximo de precipitação para todo o período futuro tende a ser alcançado no período P2-proj, exceto para Salamanca, onde os máximos são similares com menos de 1% de diferença entre os dois períodos (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Média da precipitação total anual (mm) (esquerda) e precipitação total anual máxima (mm) (direita), nos períodos 2020-2044 e 2070-2094 para todas as localidades.

	MÉDIA ANUAL		MÁXIMA ANUAL	
	2020-2044	2070-2094	2020-2044	2070-2094
La Serena	85.6	87.2	255.6	270.6
Ovalle	111.8	109.4	321.8	362.1
Punitaqui	151.1	139	450.7	456
Illapel	192.1	192.4	489.8	570.1
Salamanca	207.3	214.9	623.5	621.4

Na Tabela 4.2 é apresentada a relação entre a biomassa anual acumulada e a precipitação anual nos dois períodos futuros. Observa-se, da mesma maneira

que acontece no presente, uma alta correlação entre as duas variáveis para os dois períodos, significativa (p -valor $< 0,05$) em todas as localidades. Observa-se, também, que a correlação é mais alta para todas as localidades em P2-proj.

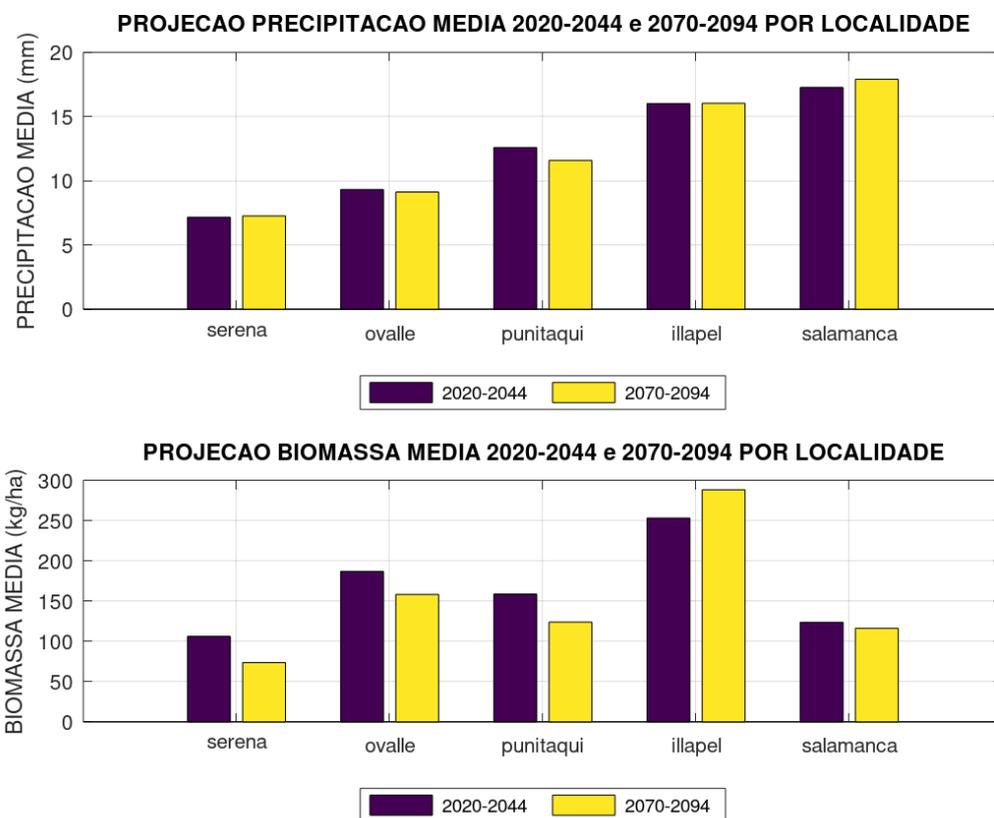
Tabela 4.2. Relação entre a precipitação e a biomassa simulada pelo modelo SIMPRAD para os períodos 2020-2044 e 2070-2094.

	La Serena	Ovalle	Punitaqui	Illapel	Salamanca
2020-2044					
R	0.6	0.68	0.72	0.52	0.48
p-valor	1.3×10^{-3}	1.9×10^{-4}	4×10^{-4}	7.9×10^{-3}	1.4×10^{-2}
2070-2094					
R	0.83	0.73	0.73	0.61	0.71
p-valor	2×10^{-7}	2×10^{-5}	3×10^{-5}	1×10^{-3}	6.8×10^{-5}

R: Coeficiente de correlação de Pearson.

Comparando-se as médias de precipitação e de biomassa acumulada para os dois períodos futuros exibidas na Figura 4.1, nota-se que a biomassa acumulada média (Figura 4.1-b) apresenta diferenças mais pronunciadas entre os dois períodos do que a precipitação média (Figura 4.1-a). Para as localidades de La Serena, Ovalle e Punitaqui, a biomassa acumulada média é maior em P1-proj, enquanto que para Illapel ela é maior em P2-proj e para Salamanca é similar entre os dois períodos. Como foi discutido nas análises sobre o presente (Seção 3.1.2), o crescimento da vegetação não responde somente ao total da precipitação, mas também à sua distribuição, que será investigada a seguir.

Figura 4.1 - Médias de precipitação (mm) e biomassa acumulada (kg / ha) para os períodos P1-proj e P2-proj.



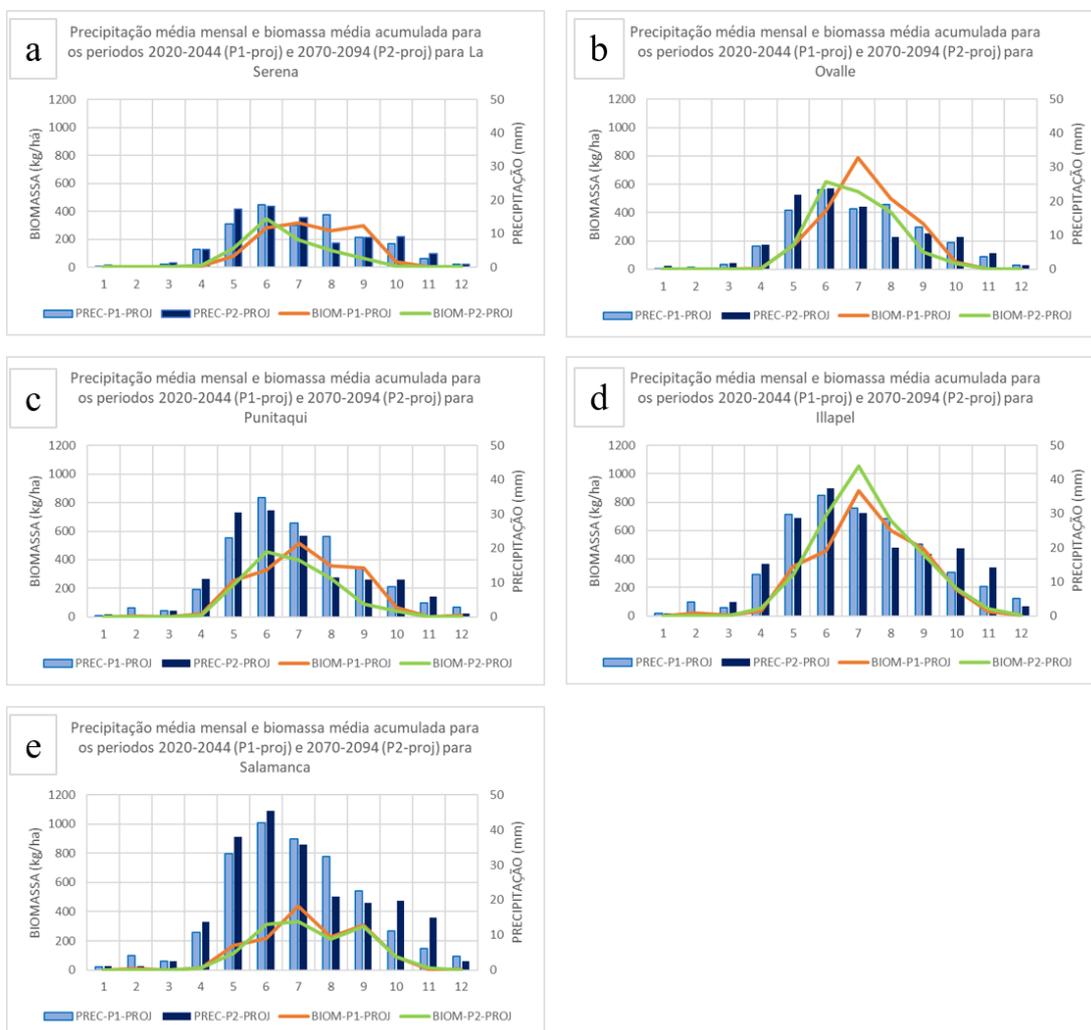
Períodos 2020-2044 (azul) e 2070-2094 (amarelo) para todas as localidades. (a) precipitação média anual (mm) e (b) biomassa acumulada média anual de pastagens (kg / ha).

No ciclo anual da biomassa e precipitação indicado na Figura 4.2, pode-se observar que para todas as localidades o máximo de precipitação ocorre no mês de junho para os dois períodos. No entanto, é importante ressaltar algumas diferenças no comportamento do ciclo anual da precipitação entre os dois períodos que levam a diferenças na produção de biomassa. Para o mês de agosto, a precipitação é maior no período P1-proj em relação a P2-proj para todas as localidades. Conforme discutido para o presente, essa precipitação é bastante efetiva devido à elevação gradual da temperatura que ocorre nessa época do ano, que leva a condições mais favoráveis para o crescimento da biomassa. Observa-se, também, que a precipitação no mês de outubro é maior

no período P2-proj em relação a P1-proj, época em que as temperaturas já mais elevadas já não favorecem o crescimento da vegetação devido ao aumento da taxa de evapotranspiração. Para as localidades de La Serena, Ovalle e Punitaqui (Figuras 4.2-a, 4.2-b e 4.2-c), pode-se notar que o ciclo de biomassa acumulada indica maiores valores no segundo semestre para P1-proj (curva laranja nas figuras) do que para P2-proj (curva verde), em que o pico de biomassa acumulada ocorre em junho. Assim, a maior biomassa acumulada no período P1-proj em comparação com P2-proj vista na Figura 4.1-b para as localidades de La Serena, Ovalle e Punitaqui está associada a esses maiores valores de biomassa acumulada no segundo semestre para P1-proj que acabam levando a um total maior de biomassa acumulada em comparação com o total para P2-proj (c.f. curva laranja e curva verde nas Figuras 4.2-a, 4.2-b e 4.2-c).

A Figura 4.1(a) indica que Punitaqui apresenta maior precipitação média que Ovalle em ambos os períodos, mas tem menor produção da biomassa média (Figura 4.1-b). Nas Figuras 4.3-a e 4.3-b, observa-se que o número de semanas com chuvas por ano é maior em Ovalle para a maioria dos anos nos dois períodos, indicando uma melhor distribuição das chuvas em Ovalle. Como visto anteriormente, essa melhor distribuição das chuvas em Ovalle favorece a produção de biomassa nessa localidade.

Figura 4.2 - Médias mensais da biomassa acumulada (kg / ha) e da precipitação (mm).

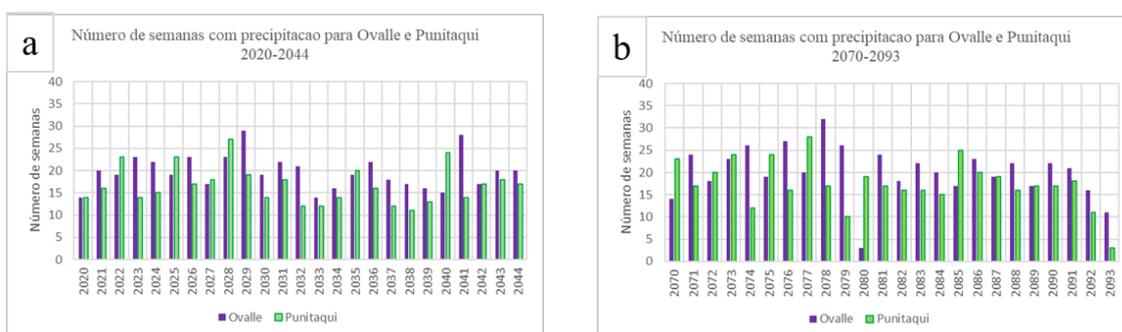


La Serena (a), Ovalle (b), Punitaqui (c), Illapel (d) e Salamanca (e), nos períodos: 2020 a 2044 (barra azul clara: precipitação e linha laranja: biomassa acumulada) e 2070 a 2094 (barra azul escura: precipitação e linha verde: biomassa acumulada).

Em Illapel (Figura 4.2-d), diferentemente do comportamento nas outras localidades, nota-se que a biomassa acumulada apresenta maior valor em P2-proj (ver também Figura 4.1-b). Além disso, enquanto que nas outras localidades discutidas os máximos de biomassa acumulada ocorrem em junho para o período P2-proj, em Illapel os máximos ocorrem em julho para ambos os períodos P1-proj e P2-proj. Observa-se na Figura 4.4-a, que a precipitação em P2-proj tem um pico na terceira semana de julho (círculo preto) em Illapel que

não acontece nas outras duas localidades. Esse pico de precipitação está associado a um grande aumento na biomassa, indicado na Figura 4.4-b, na última semana de julho (círculo preto). A maior biomassa acumulada no período P2-proj em comparação com P1-proj para Illapel está associada ao valor claramente maior para o máximo de biomassa acumulada em julho para P2-proj em comparação com o para P1-proj (c.f. curvas laranja e verde na Figura 4.2-d).

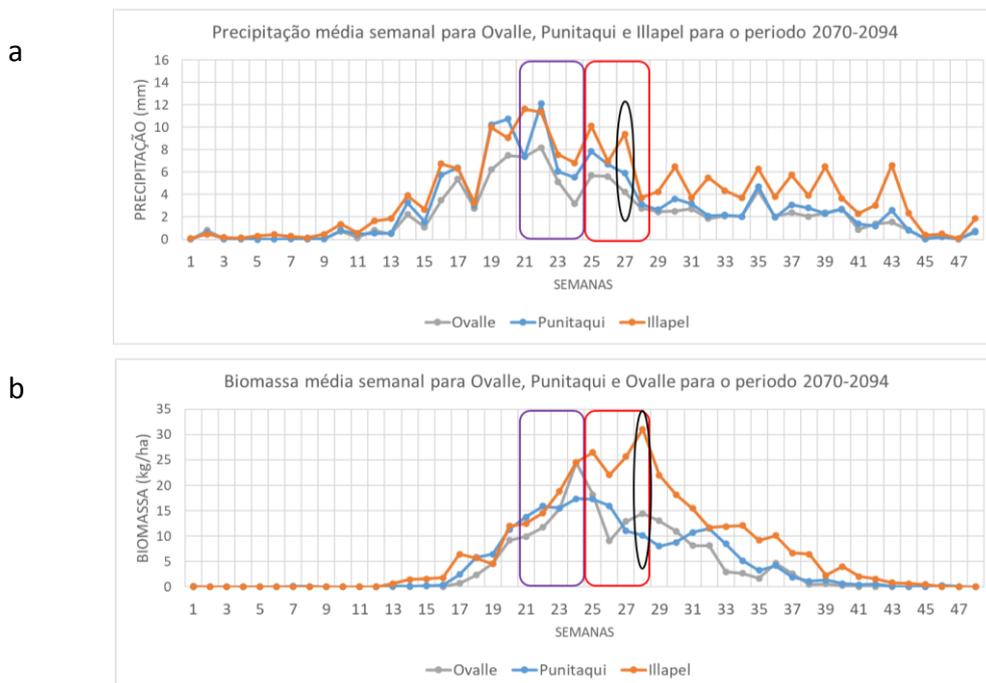
Figura 4.3 - Número de semanas com precipitação por ano para as projeções em Ovalle e Punitaqui.



Ovalle (barras roxas) e Punitaqui (barras verdes), nos períodos de (a) 2020 a 2044 e (b) 2070 a 2094.

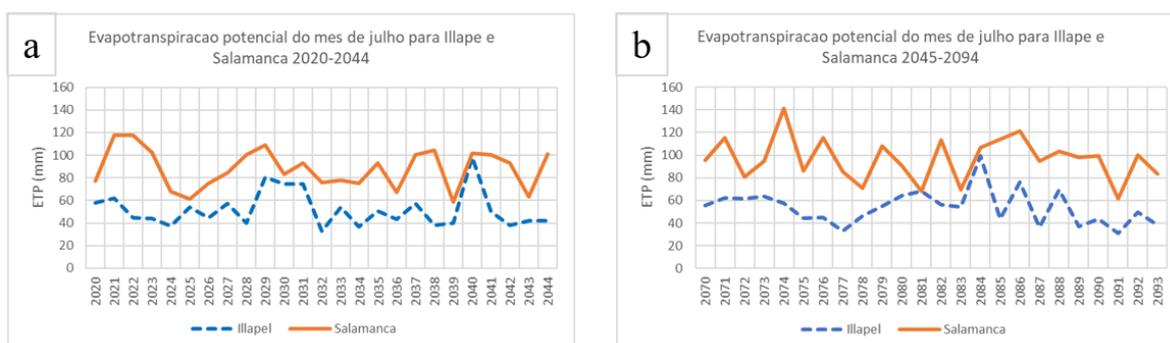
Em Salamanca (Figura 4.2-e), apesar das médias de precipitação nos dois períodos serem maiores que as das outras localidades (Figura 4.1-a), a produção de biomassa média somente é maior do que em La Serena e é menor do que nas outras localidades (Figura 4.1-b). Esse comportamento, similar ao observado para o presente, está associado aos valores mais altos de ETP nessa localidade (vide a ETP no mês de julho para Illapel e Salamanca na Figura 4.5), que constituem um fator limitante para o crescimento da biomassa, devido à diminuição da quantidade de água disponível no solo nos dois períodos.

Figura 4.4 – Médias semanais de precipitação e biomassa acumulada em Ovalle, Punitaqui e Illapel para o segundo período das projeções futuras.



Ovalle (cinza), Punitaqui (azul) e Illapel (laranja) no período 2020 a 2044 para: (a) precipitação (mm) e (b) biomassa acumulada em pastagens (kg/ha) Quadro roxo: semanas correspondentes ao mês de junho; quadro vermelho: semanas correspondentes ao mês de julho.

Figura 4.5 - Comparação da ETP em Illapel e Salamanca no mês de julho para as projeções futuras.



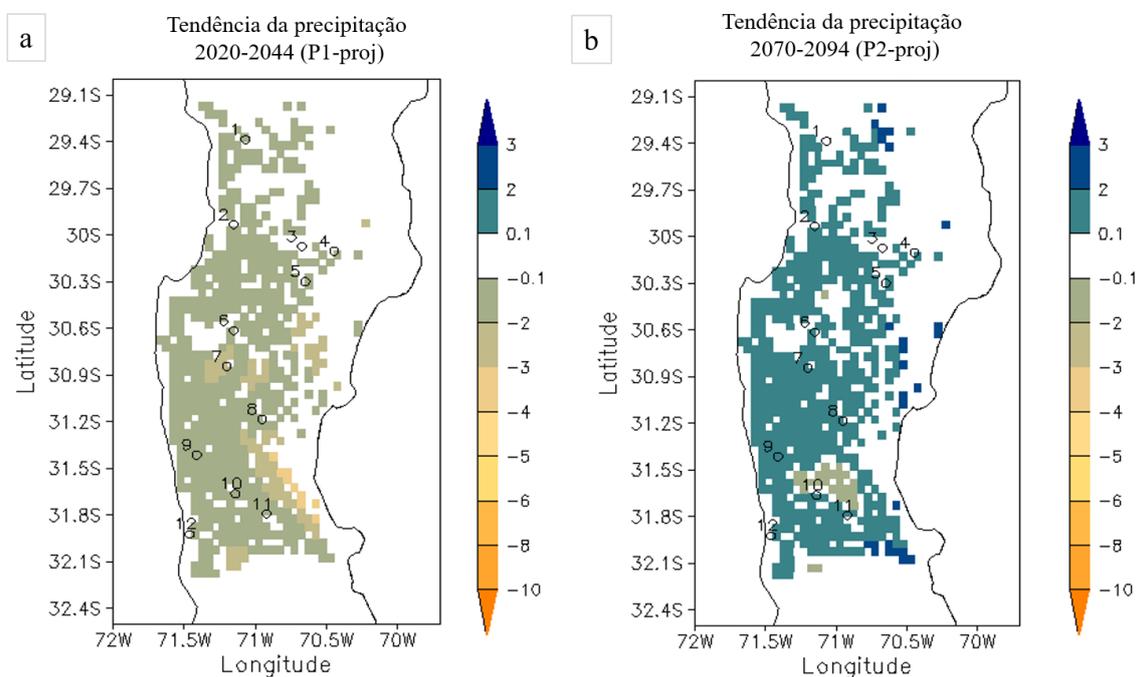
Illapel (tracejado azul) e Salamanca (linha laranja) para os períodos (a): 2020 a 2044 e (b) 2070 a 2093.

Os resultados para as projeções futuras exibidos nesta seção indicaram que, embora o ciclo anual da precipitação apresente máximo em junho para ambos os períodos futuros analisados, há um comportamento diferente entre os dois períodos quando se considera o mês de agosto individualmente, pois ocorre uma maior quantidade de chuvas em agosto no período P1-proj. Associados a essa maior quantidade de chuvas em agosto no período P1-proj, ocorrem maiores valores no ciclo de biomassa acumulada para o segundo semestre no período P1-proj para as localidades no norte da região (La Serena, Ovalle e Punitaqui). Esses maiores valores no segundo semestre em P1-proj estão associados a maiores totais de biomassa acumulada nessas localidades em P1-proj em relação a P2-proj, o que é visto também na Figura 4.1-b. Assim, essas localidades no período P2-proj poderiam apresentar uma maior degradação da terra devido à diminuição da biomassa.

4.2. Tendências e índices climáticos em projeções futuras

As projeções de precipitação mostradas na Figura 4.6 indicam uma diminuição no período P1-proj (2020-2044) em toda a região, com valores próximos a 2mm/ano. Já no período P2-proj (2070-2094), as simulações mostram um aumento da precipitação de aproximadamente 2 mm/ano em praticamente toda a região, exceto numa área no sul próximo às localidades Illapel (10) e Salamanca (11) onde é indicada uma redução na precipitação de até 2mm/ano. Nota-se, assim, que as tendências de diminuição da precipitação observadas no presente/passado recente (ver Figura 3.8), segundo as simulações numéricas irão se suavizar no futuro próximo e se inverter em direção ao final do século, com a precipitação passando a aumentar em torno de 2 mm/ano, exceto para a área próxima às localidades Illapel (10) e Salamanca (11), para onde é indicado que continuará a ocorrer uma suave diminuição.

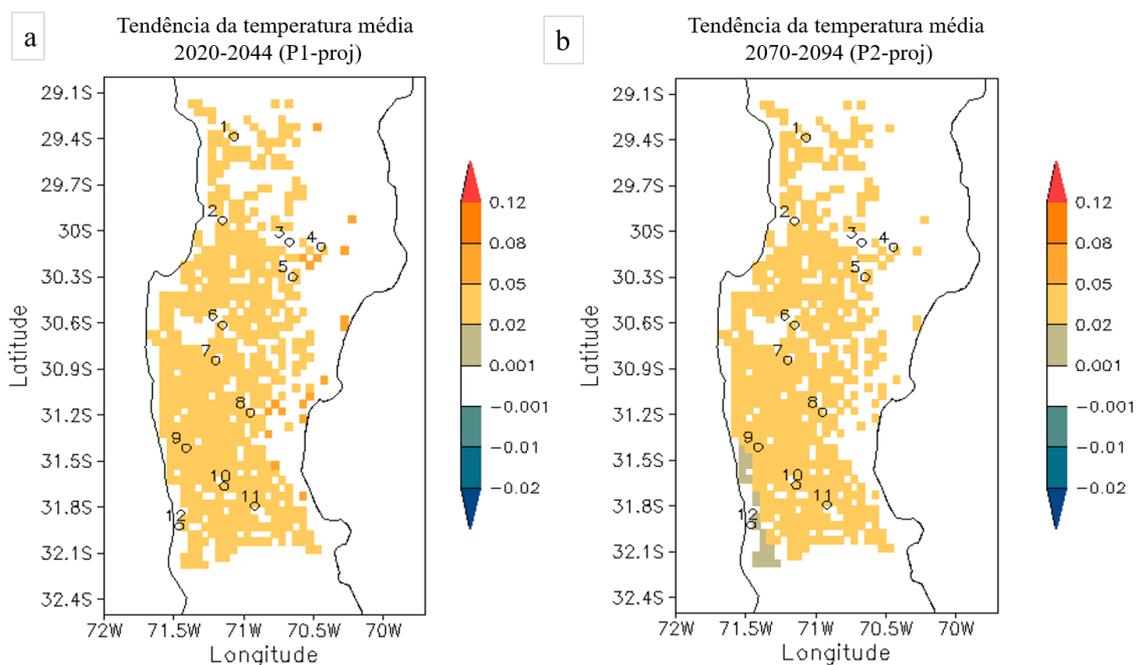
Figura 4.6 - Tendência da projeção da precipitação (mm/ano) de maio a novembro para a região de Coquimbo.



Períodos a: 2020-2044 (P1-proj) e b: 2070-2094 (P2-proj) das simulações do RegCM4. Os números correspondem às localidades: (1) El Trapiche, (2) La Serena, (3) Vicuña, (4) Monte Grande, (5) Hurtado, (6) Ovalle, (7) Punitaqui, (8) Combarbala, (9) La Canela, (10) Illapel, (11) Salamanca e (12) Los Vilos.

Na Figura 4.7, as tendências mostram um aumento da temperatura média para os dois períodos em toda a região de Coquimbo, sendo que esse aumento é maior em alguns pontos no leste da região e próximo à localidade Los Vilos (12) no período P1-proj em relação a P2-proj.

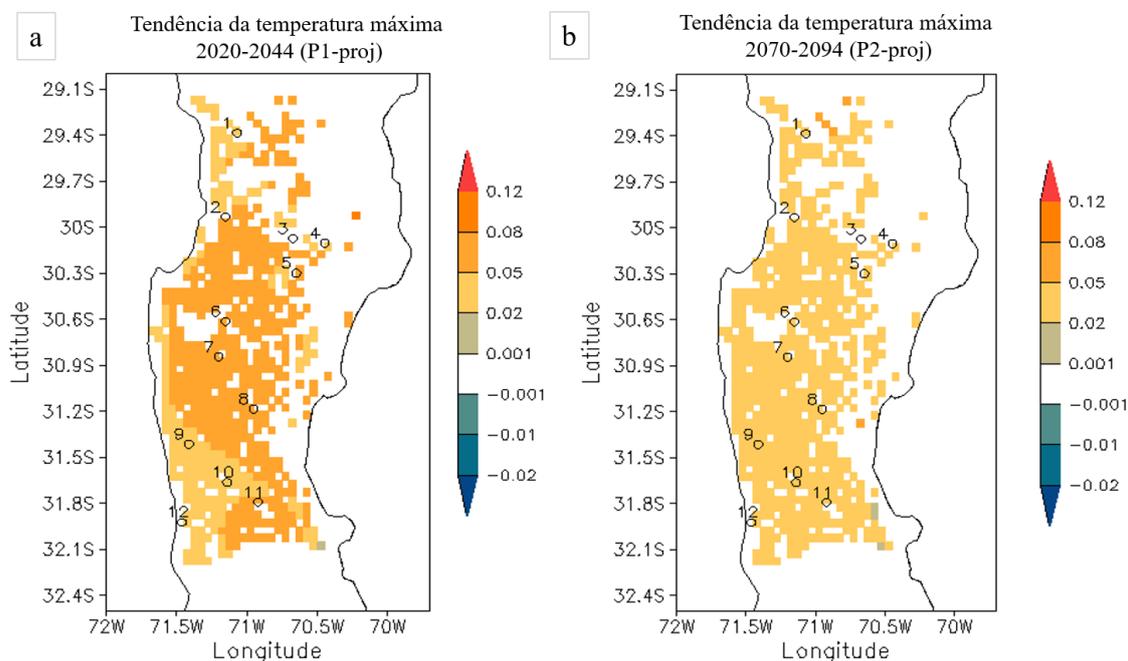
Figura 4.7 - Tendência da projeção da temperatura média (°C/ano) de maio a novembro para a região de Coquimbo.



Períodos a: 2020-2044 (P1-proj) e b: 2070-2094 (P2-proj) das simulações do RegCM4. Os números correspondem às localidades: (1) El Trapiche, (2) La Serena, (3) Vicuña, (4) Monte Grande, (5) Hurtado, (6) Ovalle, (7) Punitaqui, (8) Combarbala, (9) La Canela, (10) Illapel, (11) Salamanca e (12) Los Vilos.

Em relação às projeções de temperatura máxima, a Figura 4.8 também indica tendência de aumento em toda a região em ambos os períodos, com um maior aumento sendo indicado para o período P1-proj em relação ao período P2-proj na maior parte da região.

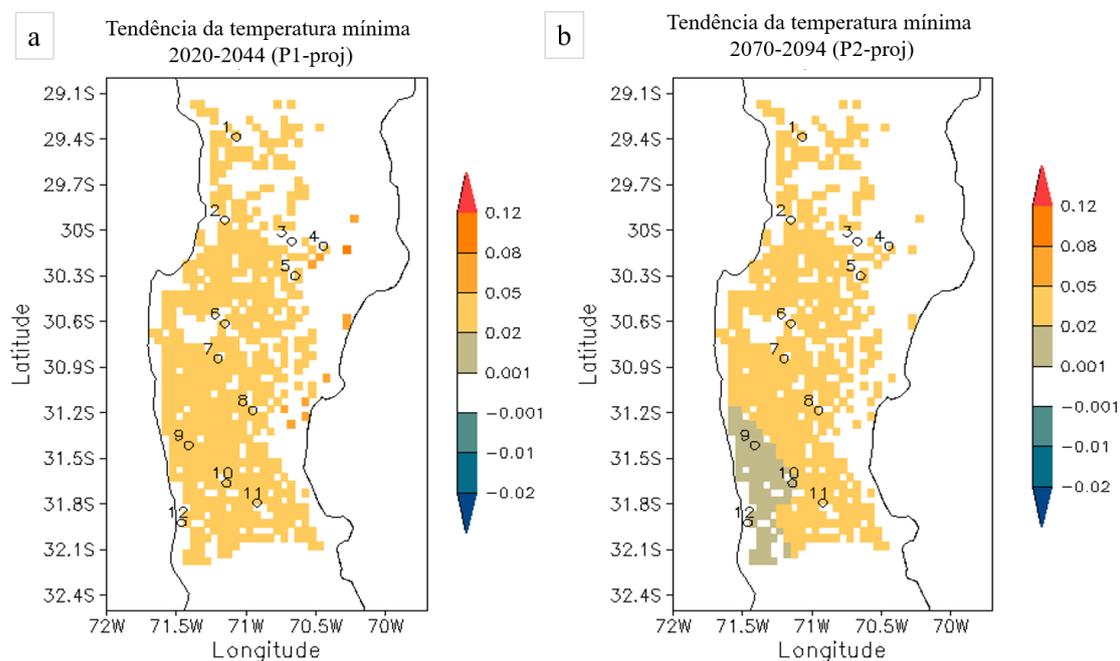
Figura 4.8 - Tendência da projeção da temperatura máxima (°C/ano) de maio a novembro para a região de Coquimbo.



Períodos a: 2020-2044 (P1-proj) e b: 2070-2094 (P2-proj) das simulações do RegCM4. Os números correspondem às localidades: (1) El Trapiche, (2) La Serena, (3) Vicuña, (4) Monte Grande, (5) Hurtado, (6) Ovalle, (7) Punitaqui, (8) Combarbala, (9) La Canela, (10) Illapel, (11) Salamanca e (12) Los Vilos.

A tendência da temperatura mínima exibida na Figura 4.9 também indica aumento nos dois períodos em toda a região e, de modo semelhante ao visto na Figura 4.7 para a tendência da temperatura média, os valores das tendências são similares nos dois períodos exceto em alguns pontos no leste da região e próximo à localidade Los Vilos (12), onde a tendência de aumento é maior no período P1-proj. Assim, levando-se em consideração a tendência de um maior aumento da temperatura máxima em P1-proj em relação a P2-proj e as tendências de aumento similares para a temperatura mínima na maior parte da região, pode-se concluir que há a indicação de uma maior amplitude térmica na maior parte da região no período do futuro próximo (P1-proj) do que no período P2-proj.

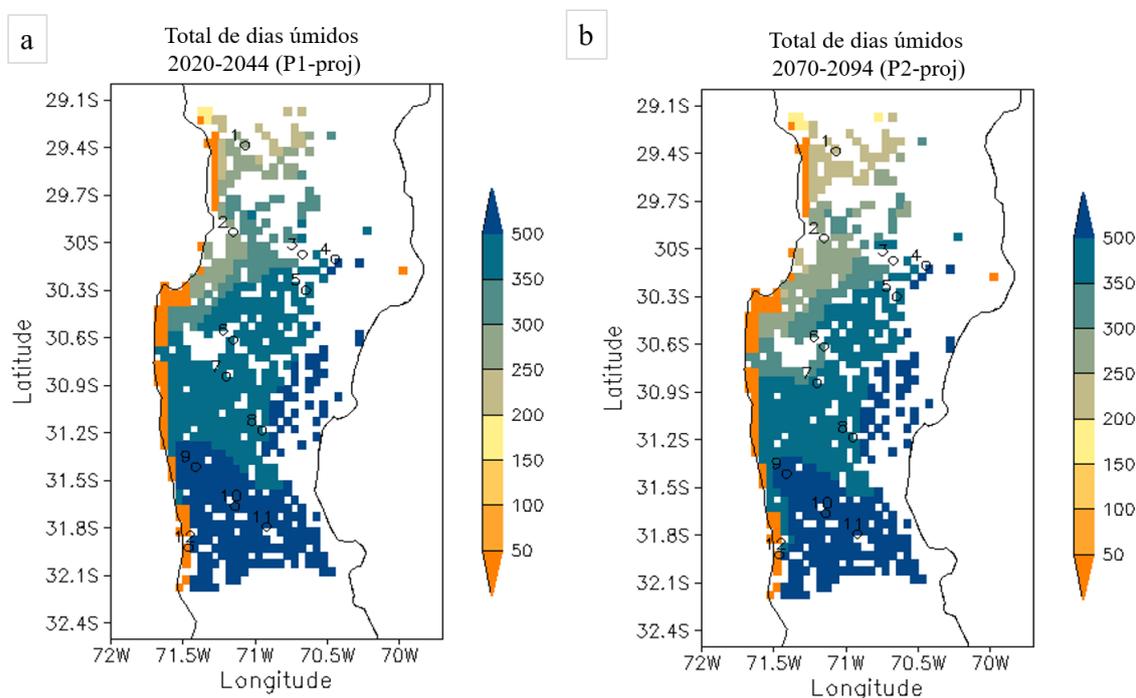
Figura 4.9 - Tendência da projeção da temperatura mínima (°C/ano) de maio a novembro para a região de Coquimbo.



Períodos a: 2020-2044 (P1-proj) e b: 2070-2094 (P2-proj) das simulações do RegCM4. Os números correspondem com as seguintes localidades: (1) El Trapiche, (2) La Serena, (3) Vicuña, (4) Monte Grande, (5) Hurtado, (6) Ovalle, (7) Punitaqui, (8) Combarbala, (9) La Canela, (10) Illapel, (11) Salamanca e (12) Los Vilos.

Considerando-se o total de dias úmidos (Figura 4.10), os valores são similares nos dois períodos para toda a região. Já o máximo de dias secos consecutivos (Figura 4.11) apresenta uma diminuição do número de dias em P2-proj comparado com P1-proj na maior parte da região, com exceção da faixa litorânea, onde os valores são similares.

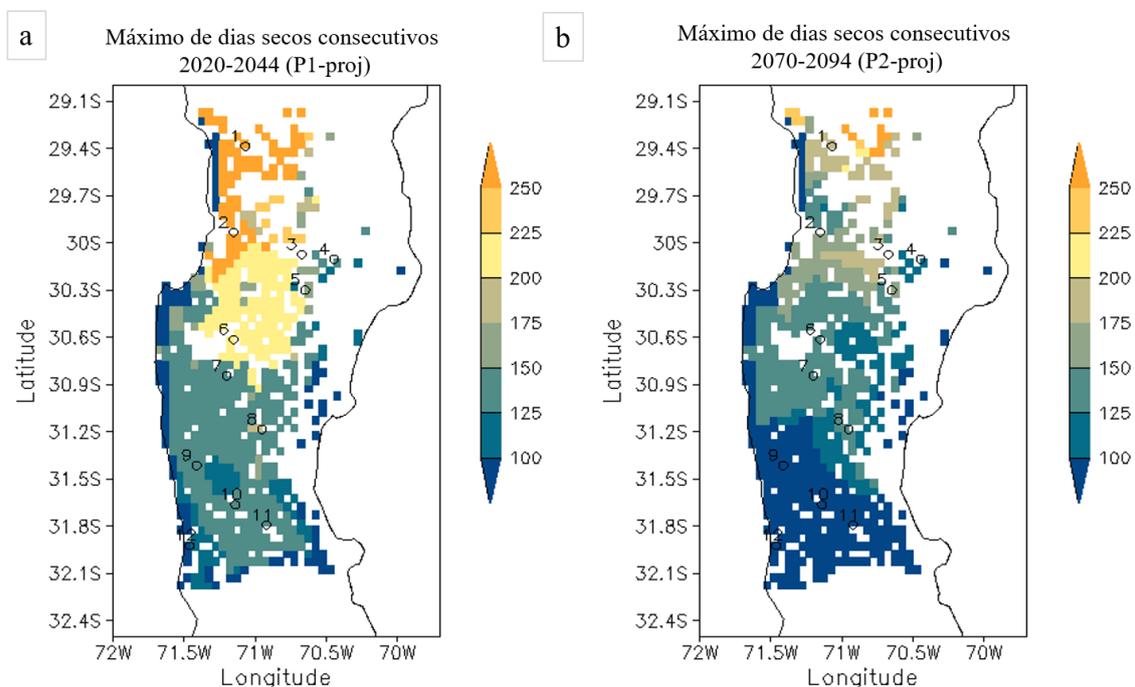
Figura 4.10 - Total de dias úmidos projetados (de maio a novembro) para a região de Coquimbo.



Períodos a: 2020-2044 (P1-proj) e b: 2070-2094 (P2-proj) das simulações do RegCM4. Os números correspondem às localidades: (1) El Trapiche, (2) La Serena, (3) Vicuña, (4) Monte Grande, (5) Hurtado, (6) Ovalle, (7) Punitaqui, (8) Combarbala, (9) La Canela, (10) Illapel, (11) Salamanca e (12) Los Vilos.

Em relação às projeções futuras utilizadas neste estudo, ressalta-se que Rojas et al (2018) avaliaram simulações para o período 1980-2016, obtidas através da mesma ferramenta computacional utilizada neste estudo, e mostraram que essa ferramenta fornece uma representação correta para as climatologias e os ciclos anuais de temperatura e precipitação na região do Chile chamada Chico Norte, que inclui a região de estudo deste trabalho. Esses resultados obtidos por Rojas et al (2018) são importantes para este estudo considerando-se a representação do clima presente/passado recente como uma indicação de confiabilidade para simulações futuras.

Figura 4.11 – Total de dias secos consecutivos projetados (de maio a novembro) para a região de Coquimbo.



Períodos a: 2020-2044 (P1-proj) e b: 2070-2094 (P2-proj) das simulações do RegCM4. Os números correspondem às localidades: (1) El Trapiche, (2) La Serena, (3) Vicuña, (4) Monte Grande, (5) Hurtado, (6) Ovalle, (7) Punitaqui, (8) Combarbala, (9) La Canela, (10) Illapel, (11) Salamanca e (12) Los Vilos.

Os resultados desta seção, de tendência de aumento das temperaturas e diminuição da precipitação para o período P1-proj, poderiam indicar uma perda ainda maior de cobertura vegetal. Ainda que as projeções de precipitação para o final do século (P2-proj) apresentem, finalmente, uma tendência de aumento, os danos associados à baixa precipitação indicados para os períodos anteriores poderiam levar a região de Coquimbo a um estado de desertificação difícil de reverter, de modo que é importante que políticas para a recuperação e conservação da terra na região sejam consideradas.

5. DEGRADAÇÃO DAS PASTAGENS NA REGIÃO DE COQUIMBO

5.1. Degradação das pastagens através do método RESTREND

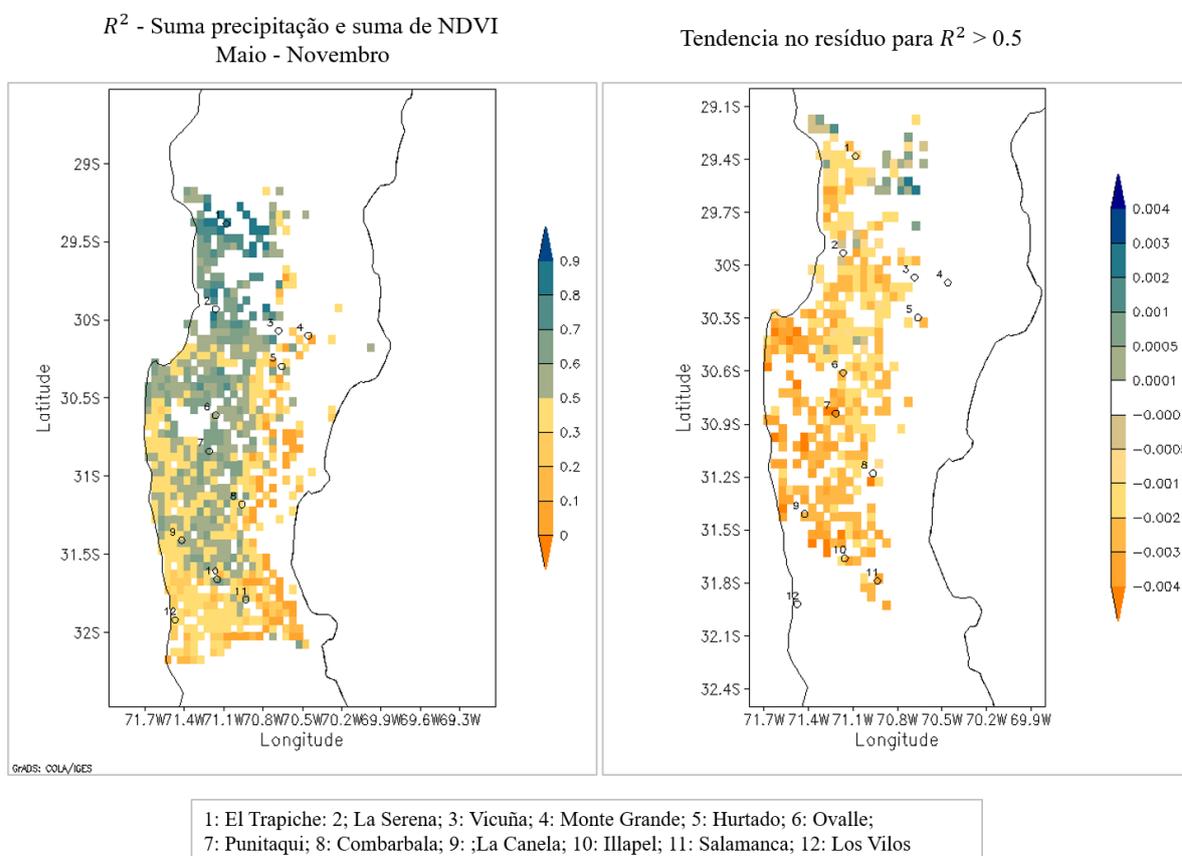
Em regiões áridas, o índice de vegetação NDVI tende a estar fortemente correlacionado com a produção da vegetação (HUANG; XU, 2016; LI et al., 2012; WESSELS et al., 2007, EVANS; GEERKRN, 2004). Neste estudo o método RESTREND (EVANS; GEERKEN, 2004) é utilizado para avaliar degradação das pastagens na região de Coquimbo, considerando-se a relação entre a vegetação e a precipitação. De forma geral, esse método baseia-se nas suposições de que, em regiões áridas, a vegetação e a precipitação têm uma relação linear e o NDVI é um bom indicador da condição da vegetação. Assim, as tendências negativas no resíduo entre o NDVI observado e estimado, quando existe um coeficiente de determinação (R^2) alto entre a vegetação e a precipitação, podem ser interpretadas como degradação (mais detalhes na Seção 1.2 e Seção 2.2.2). A seguir são apresentados os resultados do uso do método RESTREND para a região de estudo.

A distribuição espacial da relação entre a soma da precipitação e o NDVI médio entre maio e novembro no período 2001 a 2016, representada pelo coeficiente de determinação (R^2), em áreas com cobertura de vegetação natural, é mostrada na Figura 5.1-a. Na província do Elqui (norte da região), observa-se uma melhor relação entre a vegetação e a precipitação, com os valores mais elevados de R^2 da região, que estão entre 0.7 e 0.8 e são encontrados, por exemplo, na localidade de El Trapiche (indicada pelo número 1). As tendências da precipitação nesse período (P2), mostradas na Figura 3.8, indicam reduções menores da quantidade de chuva para essa área (não ultrapassando 5 mm/ano de tendência de redução da precipitação) em relação a outros locais da região. Um comportamento diferente é observado na zona central da região (Vale do Limarí), na qual há valores altos e baixos de R^2 . Na região central dessa província (longitudinalmente), onde encontram-se as localidades de Ovalle (número 6) e Punitaqui (número 7), observa-se uma boa relação entre a produtividade das pastagens e as chuvas ($R^2 > 0.5$). As tendências de

precipitação durante esse período nesta área mostram uma diminuição entre 5 e 6 mm/ano (Figura 3.8). Na província do Choapa, os pontos localizados no limite norte da região (direção noroeste – sudeste) apresentam maior R^2 que na parte sul, onde encontram-se as localidades de La Canela (número 9), Illapel (número 10) e Salamanca (número 11). Já no litoral, onde localiza-se Los Vilos (número 12), e na zona sul da região, a relação linear entre a vegetação e as chuvas é baixa com $R^2 < 0.3$. Como indicado na Figura 4.1, esta área apresenta as maiores tendências de redução de chuvas da região no período 2000-2016, chegando a reduções de mais de 10 mm/ano. Em geral, em toda a região, os pontos que estão a uma maior altura, têm valores baixos de R^2 .

A Figura 5.1-b mostra as tendências dos resíduos do NDVI observado e do NDVI previsto pela regressão linear em função da precipitação quando o R^2 é maior que 0.5. Em geral, a maioria dos pontos mostra uma tendência negativa, com exceção de um setor na zona norte (pontos azuis na figura). De acordo com o método utilizado neste trabalho (EVANS; GEERKEN, 2004), tendências negativas indicam degradação da vegetação devido a fatores distintos das chuvas, que em geral associam-se a intervenções humanas, como mudança no uso do solo ou atividades associadas à agricultura ou ao sobrepastoreio. No entanto, causas associadas a mudanças em outras variáveis que não sejam a precipitação também podem ser consideradas (outras climáticas, da vegetação ou do solo).

Figura 5.1 - Relação espacial entre o NDVI médio e a soma da precipitação e tendência dos resíduos do NDVI observado e o previsto.

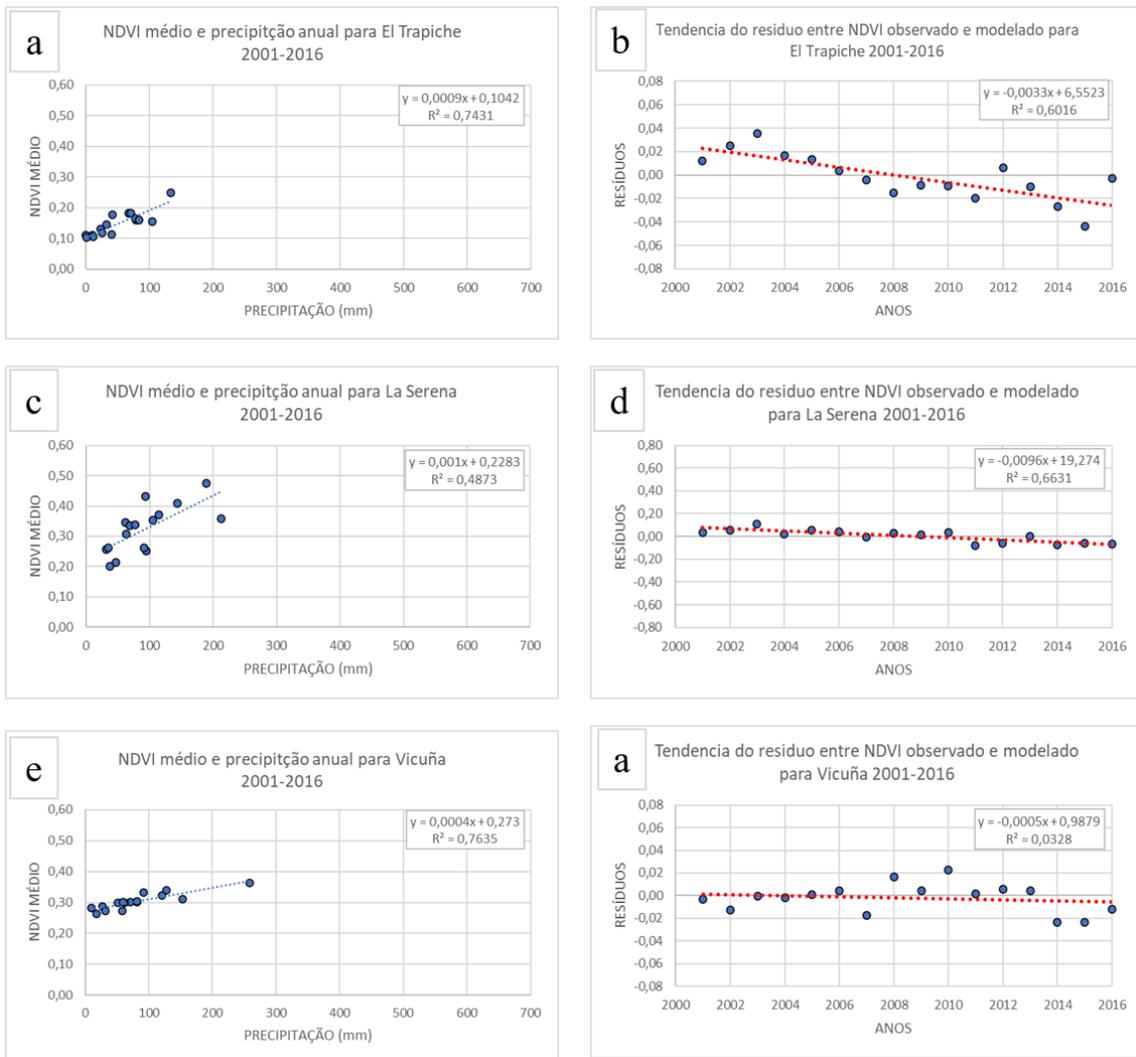


NDVI médio e soma da precipitação (esquerda); e tendência dos resíduos do NDVI para pontos com $R^2 > 0.5$ (direita), no período entre maio e novembro de 2001 a 2016.

As Figuras 5.2, 5.3, 5.4, e 5.5, mostram a análise feita separadamente para cada uma das localidades numeradas na Figura 5.1. A diferença da metodologia utilizada nesta análise em relação ao caso espacial já mostrado é que esta análise por localidade é realizada com dados de precipitação de estações meteorológicas e com a identificação de pontos próximos de NDVI em áreas de vegetação natural. As localidades que apresentam um bom coeficiente de determinação são El Trapiche ($R^2=0.74$) e Vicuña ($R^2=0,76$) (Figura 5.2-a 5.2-e, respectivamente), Monte Grande ($R^2=0.7$), Hurtado ($R^2=0.75$) e Ovalle ($R^2=0.63$) (Figura 5.3-a, 5.3-c e 5.3-e, respectivamente), Punitaqui ($R^2=0.57$), Combarbala ($R^2=0.52$), La Canela ($R^2=0.5$) (Figuras 5.4-a,

5.4-c e 5.4-d, respectivamente). As demais localidades apresentam $R^2 < 0.5$, portanto, as tendências dos resíduos mostradas não necessariamente indicam algum tipo de degradação.

Figura 5.2. Relação espacial entre o NDVI médio e a soma da precipitação e tendência dos resíduos do NDVI pra El Trapiche, La Serena e Vicuña.



NDVI médio e soma da precipitação (esquerda), e tendência dos resíduos do NDVI observado e o previsto (direita), no período entre maio e novembro de 2001 a 2016, para as localidades: El Trapiche (a, b), La Serena (c, d) e Vicuña (e,f).

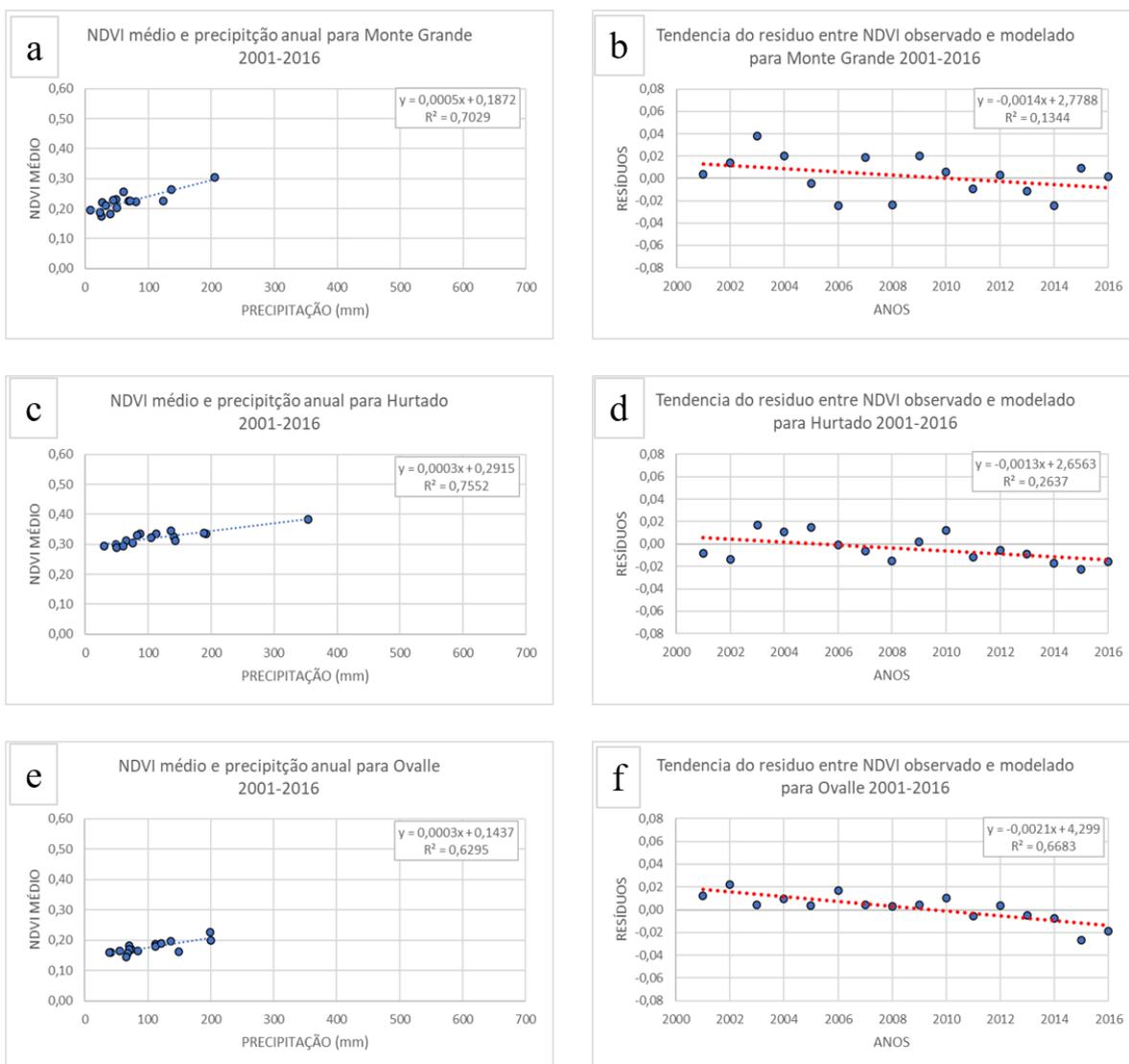
As tendências dos resíduos nas localidades que apresentam $R^2 > 0.5$ mostram que El Trapiche apresenta uma tendência negativa e significativa (p-valor = 0.0013); e que em Vicuña a tendência é levemente negativa e não significativa (p-valor = 0,5) (Figura 5.2-b e 5.2-b, respectivamente). Já Monte Grande apresenta uma tendência negativa, mas que não é significativa (p-valor = 0,17); em Hurtado a tendência é negativa e significativa (p-valor = 0,02); e em Ovalle a tendência é negativa e significativa (P-valor = 0,0007) (Figuras 5.3-b, 5.3-d e 5.3-e, respectivamente). Em Punitaqui observa-se uma tendência levemente negativa e não significativa (p-valor = 0,55); e em Combarbala a tendência é negativa e significativa (p-valor = 0,015).

Estas tendências negativas podem ser interpretadas como degradação, visto que mudanças na vegetação já não conseguiriam ser explicadas em grande parte pela precipitação.

As diferenças em alguns resultados para algumas localidades, apresentados nas Figuras 5.2 a 5.5, em relação ao já mostrado para pontos correspondentes na análise espacial (Figura 5.1), podem estar associadas às diferentes metodologias aplicadas e/ou às bases de dados utilizadas.

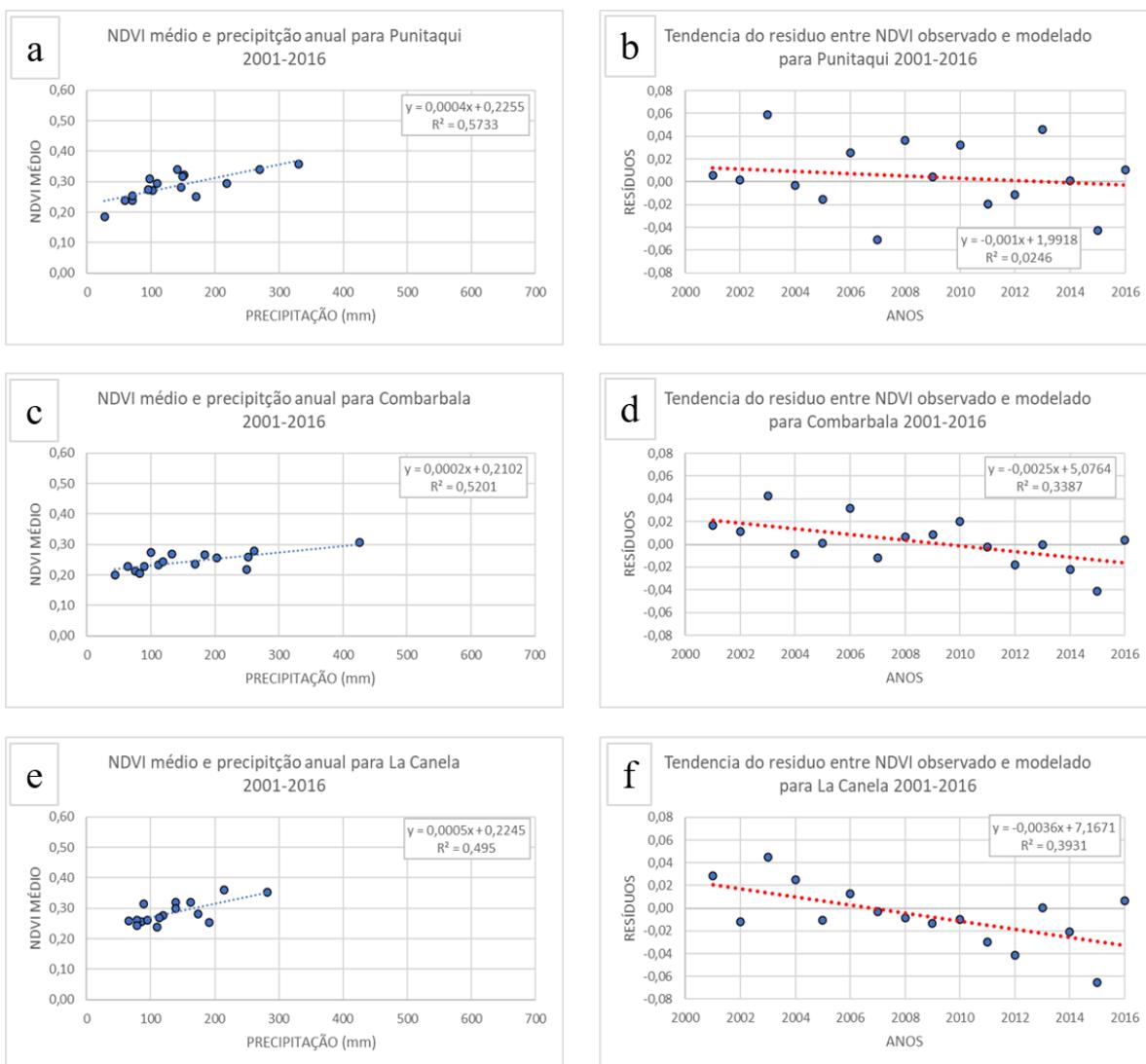
É importante ressaltar que a análise poderia ser complementada ou melhorada considerando variáveis que tenham direta relação com o crescimento da vegetação, como poderia ser o caso da umidade do solo. Além disso, ao usar dados de NDVI está se considerando mudanças na biomassa verde, de modo que o método não irá conseguir detectar a degradação associada, por exemplo, a perda de biodiversidade ou mudanças de espécies (EVANS; GEERKEN, 2004). Nota-se, também, que as tendências podem estar associadas a processos naturais. Assim, o método auxilia a identificar áreas problemáticas em uma escala regional, mas as causas das tendências negativas têm que ser determinadas através de pesquisas locais (WESSELS et al., 2007).

Figura 5.3 - Relação espacial entre o NDVI médio e a soma da precipitação e tendência dos resíduos do NDVI pra Monte Grande, Hurtado e Ovalle.



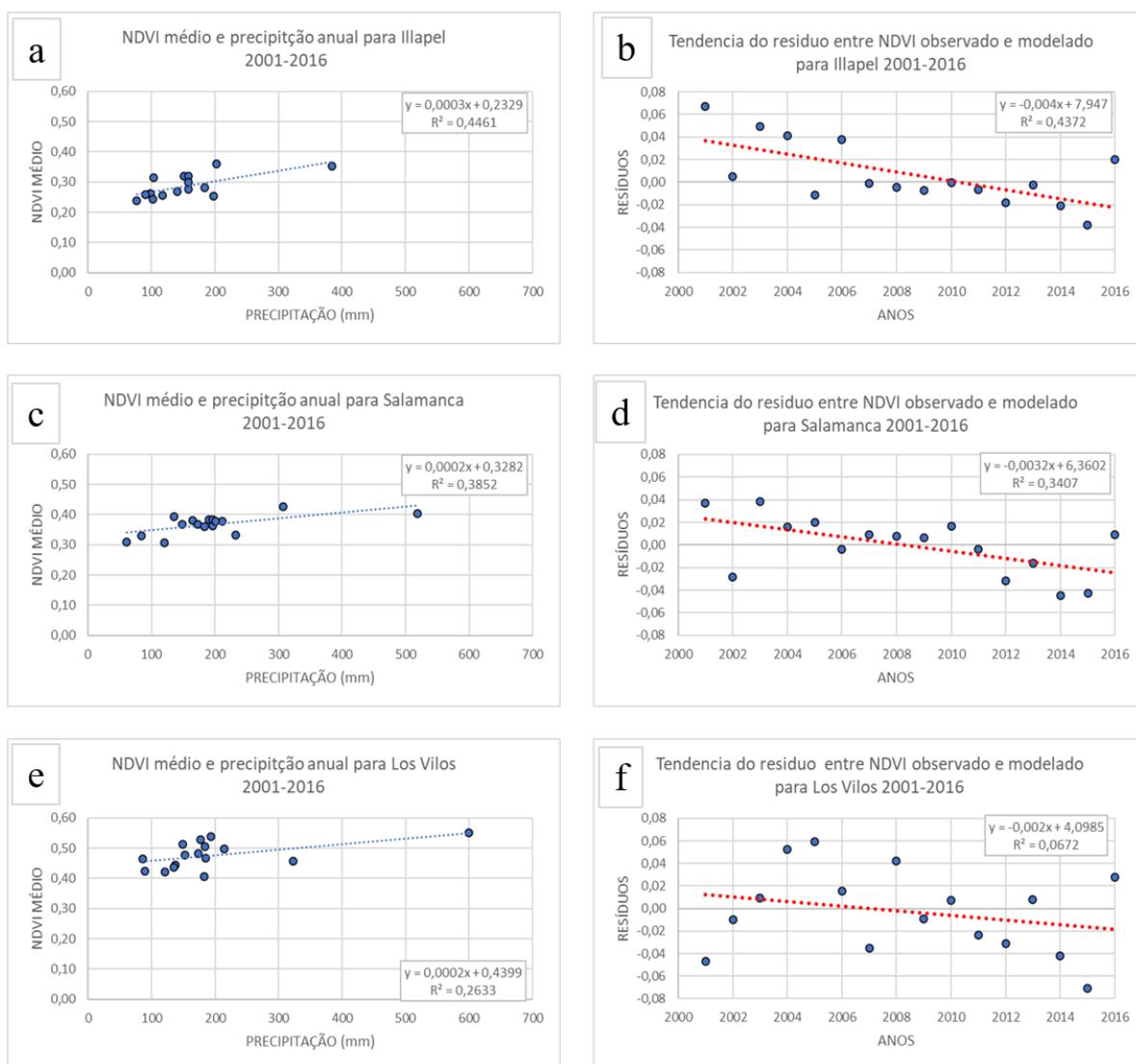
NDVI médio e soma da precipitação (esquerda) e tendência dos resíduos do NDVI observado e o previsto (direita) para o período entre maio e novembro. Monte Grande (a, b), Hurtado (c, d) e Ovalle (e, f).

Figura 5.4 - Relação espacial entre o NDVI médio e a soma da precipitação e tendência dos resíduos do NDVI pra Punitaqui, Combarbala e La Canela.



NDVI médio e soma da precipitação (esquerda) e tendência dos resíduos do NDVI observado e o previsto (direita) para o período entre maio e novembro. Punitaqui (a, b), Combarbala (c, d) e La Canela (e, f).

Figura 5.5 - Relação espacial entre o NDVI médio e a soma da precipitação e tendência dos resíduos do NDVI pra Illapel, Salamanca e Los Vilos.



NDVI médio e soma da precipitação (esquerda), e tendência dos resíduos do NDVI observado e o previsto (direita), para o período entre maio e novembro de 2001 a 2016, para as localidades: Illapel (a, b), Salamanca (c, d) e Los Vilos (e, f).

Nas seções anteriores, foram mostrados e discutidos resultados associados à resposta das pastagens a fatores climáticos. Esses resultados indicaram que esses fatores, mesmo quando considerados de forma isolada, podem levar a uma perda de vegetação, aumentando o risco de desertificação. Considerando, agora, os resultados obtidos nesta seção utilizando-se a metodologia

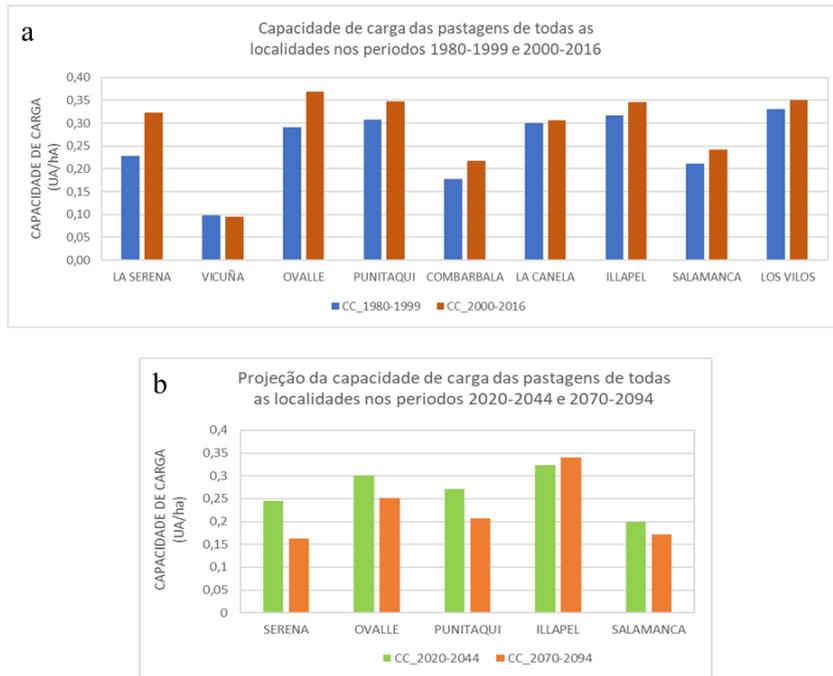
RESTREND, tem-se a indicação de que, no “clima presente”, o problema da degradação da terra pode ser ainda mais grave, de modo a intensificar os processos de desertificação, podendo ter consequências muito graves no futuro na região de Coquimbo.

5.2. Capacidade de carga e carga animal

A capacidade de carga (CC) pode afetar as características de produtividade das pastagens, assim, é importante ter ferramentas que ajudem na sua estimativa, o que pode ajudar a criar melhores planos de manejo. É importante considerar diferentes fatores que podem mudar essa capacidade, como os associados a condições climáticas.

Na Figura 5.6, observa-se a CC obtida através do modelo SIMPRAD para os períodos 1980-1999 e 2000-2016 e utilizando as projeções para os períodos 2020-2044 e 2070-2094, para as localidades usadas neste trabalho. Na Figura 5.6-a, nota-se que no período 2000-2016 a CC é maior do que em 1980-1999 para quase todas as localidades, exceto em Vicuña e Canela. As maiores diferenças entre os dois períodos acontecem nas localidades das províncias de Elqui e de Illapel (no norte e centro da região). Nas projeções futuras (Figura 5.6-b), pode-se observar que no período 2020-2044 a CC é maior do que em 2070-2094 para todas as localidades, exceto em Illapel, onde se observa uma pequena diferença entre ambos os períodos.

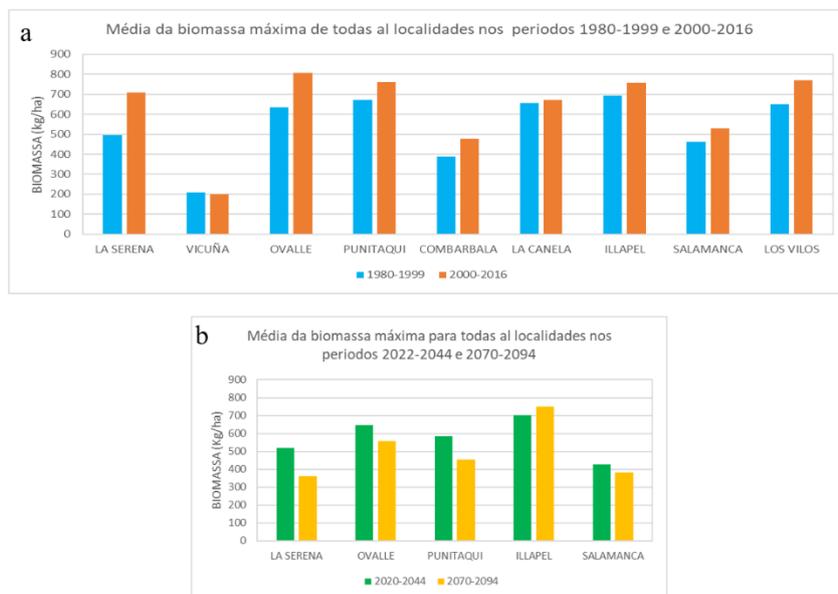
Figura 5.6 - Capacidade de carga das pastagens para todas as localidades.



(a) presente; (b) projeções. Períodos a: 1980-1999 (azul) e 2000-2016 (vermelho); b: 2020-2044 (verde) e 2070-2094 (laranja).

A CC é calculada a partir da média da biomassa máxima (Seção 2.2.1), assim, como era de se esperar, o comportamento das médias da CC acompanha o das médias da biomassa máxima mostradas na Figura 5.7.

Figura 5.7. Média da biomassa máxima (kg/ha) para todas as localidades.



(a) presente; (b) projeções. Períodos a: 1980-1999 (azul) e 2000-2016 (laranja); b: 2020-2044 (verde) e 2070-2094 (amarelo).

A partir da CC obtida pelo modelo SIMPRAD calcula, e considerando a degradação da pastagem devido à carga animal (CA, Seção 2.2.1), realizou-se um teste com diferentes cenários relacionados a pressão de uso. O propósito desse experimento foi investigar a resposta da pastagem a decisões de manejo e uso. Selecionou-se a localidade de Ovalle para o período do presente completo (1980-2016) devido à presença de dois anos com marcadas diferenças na série de precipitação para esta localidade, o ano 1997 (ocorrência de “El Niño”) e o ano seguinte 1998 (ocorrência de “La Niña”). Foram gerados três cenários de CA representados na Figura 5.8-a, todos considerando que a pastagem está em uma condição de 100% no início, em 1980. Esses três cenários estão descritos a seguir.

- 1) CA_POT – PRES: Considera CA=CC durante toda a série, isto é, a carga animal é igual à capacidade de carga da pastagem. Este cenário é considerado como um cenário potencial das condições climáticas da localidade, sem considerar a degradação animal.

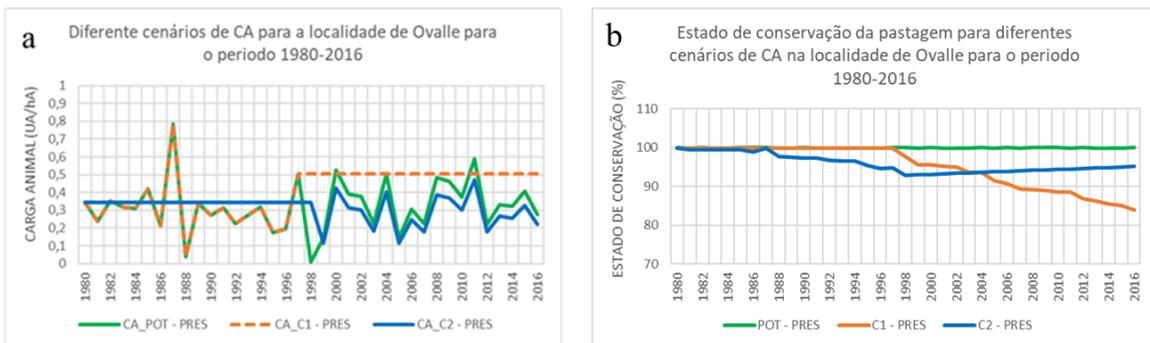
- 2) CA_C1 – PRES: Considera CA=CC até o ano 1997 e, nos anos seguintes, utiliza a mesma CA que a CC de 1997 (CC para uma precipitação anual de 299,7 mm). Este cenário considera que, devido às altas quantidades de chuva do ano 1997, o número de animais foi aumentado considerando a capacidade de carga de 1997.
- 3) CA_C2 – PRES: Mantém a CA constante e igual à CC do ano 1980 até o ano 1998 e, para o restante da série, considera uma CA de 80% da CC para cada ano. Neste cenário, depois do ano 1998 (precipitação anual de 8,6 mm) “decide-se” usar uma CA “sustentável”.

Na Figura 5.8-b), observa-se o estado de degradação da pastagem de acordo com os diferentes cenários. No cenário CA_POT – PRES, a pastagem se mantém no mesmo estado durante toda a série, exceto para os anos 1988 e 1998, nos quais ocorre cerca de 2% de degradação devido ao grande déficit de precipitação observados nesses anos. Para o cenário CA_C1 – PRES, a degradação vai aumentando até que a pastagem chega a cerca de 85% da sua condição inicial no final do período. Se este modo de uso continuasse a ser mantido além de 2016, a pastagem poderia alcançar uma perda total. Para o terceiro cenário CA_C2 – PRES, a pastagem se degrada até o ano 1998 chegando a aproximadamente 92% de sua condição inicial. Em seguida, com a decisão de usar somente 80% da disponibilidade da pastagem para uso animal, a pastagem começa a se recuperar alcançando, em 2016, 95% de sua condição inicial em 2016. Se o mesmo modo de uso fosse mantido além do ano 2016, a pastagem poderia se recuperar até voltar a 100%.

Nestes cenários não estão considerando outros fatores, de modo que os resultados podem não refletir a realidade, mas exploram o modo como as pastagens, além de serem dependentes das condições climáticas, são condicionadas também pelas decisões quanto ao seu uso. Como foi dito anteriormente neste trabalho, a região de Coquimbo, como tende a ser característico das regiões de regiões áridas, apresenta uma alta variabilidade sazonal e interanual. Considerar como mudam estas

características climáticas pode auxiliar a ter um melhor manejo das terras, já que diferentes cargas em diferentes estações do ano ou em condições climáticas extremas, como secas, ou ainda sob mudanças climáticas, podem afetar em diferentes graus as pastagens.

Figura 5.8. Carga animal (UA/ha) e Estado de conservação da pastagem (%) para Ovalle.



(a) Carga animal (UA/ha) e (b) Estado de conservação da pastagem (%), para Ovalle no período 1980-2016 sob os cenários (vide descrição no texto): CA_POT – PRES (linha verde), CA_C1 – PRES (linha laranja) e CA_C2 – PRES (linha azul).

Ressalta-se que conhecimentos sobre mudanças na variabilidade climática, principalmente das chuvas, pode apoiar a tomada de decisões sobre o manejo animal na região de Coquimbo, usando o modelo SIMPRAD que se mostrou ser uma boa ferramenta. Mas é claro que também é muito importante considerar os fatores sociais, políticos e econômicos, de modo a permitir o estabelecimento de um sistema de produção mais sustentável em regiões áridas, favorecendo a prevenção da desertificação.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa foi contribuir com o entendimento de alguns mecanismos climáticos que influenciam os processos de desertificação nas pastagens de regiões áridas do Chile, especificamente na região de Coquimbo, e pesquisar possíveis mudanças nesses mecanismos a partir de projeções climáticas futuras.

A região de estudo apresenta sérios problemas associados a processos de desertificação. Como é característico das regiões áridas, a precipitação se concentra em poucos meses do ano, com longos períodos secos e uma alta variabilidade da precipitação interanual. Os resultados obtidos pelas análises de como a variabilidade das precipitações afeta a produção de biomassa e de como mudanças nestas variações podem também alterar a vegetação da região mostraram que a produção de biomassa está diretamente relacionada com a distribuição anual das chuvas, assim como ao total de precipitação. Isto significa que anos com quantidades de chuvas similares podem apresentar diferenças na produção de biomassa devido à distribuição das chuvas. Foram identificadas mudanças na distribuição das chuvas no período 2000-2016 com respeito ao período 1980-1999, que estão associadas a mudanças na quantidade e distribuição de biomassa. Assim, a falta de conhecimento sobre mudanças na distribuição das chuvas pode levar a uma sobre-exploração dos recursos naturais.

As tendências das precipitações anuais nos dois períodos citados acima mostram uma tendência negativa na região, que é mais acentuada no período 2000-2016. Os dias úmidos diminuem nesse mesmo período, exceto em algumas áreas localizadas no norte da região. A zona no sul da região, mais chuvosa, apresenta uma maior diminuição da precipitação em relação à parte norte que é mais seca, o que poderia levar a uma extensão da aridez para o sul da região.

As tendências das temperaturas médias na região, em geral, exibem um

aumento nos dois períodos. Observa-se o mesmo comportamento nas temperaturas máximas, com um aumento maior no período 2000-2016 nas localidades localizadas ao norte dos 30.9°S. A temperatura mínima apresenta áreas com aumentos e reduções na região. A partir destes resultados, pode-se interpretar que o aumento das temperaturas máximas poderia aumentar a ETP levando a uma diminuição da vegetação, devido a uma menor quantidade de água disponível no solo. Para as áreas com redução na temperatura mínima, haveria uma maior probabilidade de episódios de geadas que também poderiam afetar a produção de biomassa. O máximo de dias secos é maior no primeiro período, o que está provavelmente associado ao fato do ano 1998 ter sido um ano muito seco, com um total anual de chuvas de apenas 21,3 mm.

Os resultados obtidos utilizando o método RESTREND indicaram áreas possivelmente degradadas, com grande parte da região apresentando problemas associados à degradação de acordo com os resultados. Esta degradação seria causada por variáveis diferentes da precipitação, que poderiam ser associadas a fatores naturais e a fatores humanos. De forma idealizada, a exploração da capacidade de carga para a localidade de Ovalle mostrou a importância das decisões do manejo das pastagens. Além disso, esta localidade é apontada como uma das áreas potencialmente degradadas pela análise realizada com o RESTREND. Nesse contexto, considerar como mudam as características climáticas pode auxiliar a realizar um melhor manejo das terras, já que diferentes cargas em diferentes estações do ano ou em condições climáticas extremas, como secas, ou ainda sob mudanças climáticas, podem afetar as pastagens em diferentes graus.

As projeções de biomassa, a partir das projeções climáticas futuras, mostram, de modo similar ao do presente, mudanças no ciclo anual da biomassa, causadas por alterações na variabilidade do ciclo anual e nos totais da precipitação. Ressalta-se que as temperaturas ao longo do ano também são um fator importante a ser considerado, como também já discutido previamente para o presente.

As tendências da precipitação para as projeções futuras, indicam uma maior diminuição da precipitação para o período 2020-2044 do que para o período 2070-2094. No final de século as tendências da precipitação poderiam se inverter, tornando-se positivas, mas em relação à desertificação, esse aumento na precipitação poderia ser muito tarde para a recuperação das áreas afetadas. As tendências também indicam que temperaturas médias, máximas e mínimas aumentariam nos dois períodos e, como mencionado anteriormente, esse aumento juntamente com uma diminuição da precipitação, poderia levar a um aumento da aridez na região, principalmente na parte sul.

O modelo SIMPRAD mostrou-se uma ferramenta muito importante para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade da biomassa na região suscetível considerada. Além disso, as simulações do SIMPRAD podem ser utilizadas para suprir a falta de dados de biomassa observados nessa região.

O estudo dos fatores envolvidos nos processos de desertificação e as suas possíveis mudanças, sejam por mudanças climáticas ou por mudanças em fatores políticos, sociais e econômicos, pode permitir o estabelecimento de um sistema de produção mais sustentável em regiões áridas, favorecendo a prevenção da desertificação.

Finalmente, ressalta-se que a variabilidade do clima e as mudanças climáticas podem afetar profundamente o estado de conservação das pastagens, tornando-se um importante fator de desertificação nas regiões áridas do Chile.

6.1. Trabalhos futuros

Considerando-se o que foi realizado neste trabalho, propõe-se como trabalhos futuros os itens a seguir.

- Fazer as análises com séries temporais mais longas de precipitação, de modo a investigar se houve mudanças na variabilidade antes do ano 1980.
- Estender a análise a outras variáveis, como a umidade do solo, tanto para o estudo utilizando as séries temporais, quanto para o emprego da metodologia RESTREND.
- Estender a análise da capacidade de carga para outros cenários, tanto para condições do presente quanto para o futuro.
- Avaliar a representação gerada por outros modelos climáticos globais para o clima presente/passado recente da região de estudo, especialmente para as novas rodadas e cenários que serão utilizados no próximo relatório do IPCC (AR6), de modo a identificar os modelos com melhor desempenho. Obter, então, o downscaling das projeções climáticas futuras fornecidas por esses modelos para realizar novas análises comparativas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCAFUZ, R. et al. **Análisis y publicación de los resultados convenio alta dirección pública meteorológica de Chile**: modelación climática. Santiago: Dirección Meteorológica de Chile, 31 p.
- ALDUNCE, P.; GONZÁLEZ M. **Desastres asociados al clima en la agricultura y medio rural en Chile**. Santiago: Universidad de Chile, 2009. 119 p.
- AMADOR, J.; ALFARO, E. Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático, **Revista Iberoamericana de Economía Ecológica**, v. 11, p. 39–52, 2009.
- BEZERRA F. G. **Contribucao de fatores socioeconomicos, biofisicos e da agropecuaria e degradacao da cobertura vegetal como "proxy" da desertificacao no semiarido do nordeste do Brasil**. 2016. 207p. Tese (Doutorado em Ciencia do Sistema Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.
- BOISIER, J. P. et al. Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. **Elementa Science of the Anthropocene**, v.6, n.1, p. 1-20, 2018.
- BOISIER, J. P. et al. Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. **Geophysical Research Letters**, v.43, n. 1, p. 413–421, 2016.
- BOT, A.; BENITES, J. **The importance of soil organic matter**: key to drought-resistant soil and sustained food production. [S.I.]: Food & Agriculture Organization, 2005. 80 p.
- CASANOVA, M. et al. **The soils of Chile**. [S.I.]: Springer, 2013. 185 p.

CHANG, J. et al. Changes of grassland rain use efficiency and NDVI in Northwestern China from 1982 to 2013 and its response to climate change. **Water**, v. 10, n. 11, p. 1- 20, 2018.

CHEN, B. et al. Changes in vegetation photosynthetic activity trends across the Asia–Pacific region over the last three decades. **Remote Sensing of Environment**, v. 144, p. 28-41, 2014.

CLARKE, M. L.; RENDELL, H. M. Atlantic storminess and historical sand drift in Western Europe: implications for future management of coastal dunes. **Journal of Coastal Conservation** v. 15, n. 1, p. 227 - 236, 2011.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI**. Santiago: Universidad de Chile, 2006. 71 p.

CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL - CONAF. **Mapa preliminar de la desertificación en Chile**. Santiago: Ministerio de Agricultura, 1999. 88 p.

DE NYS, E.; ENGLE, N. L.; MAGALHÃES, A. R. **Secas no Brasil: política e gestão proativas**. Brasília, DF: CGEE, 2016. 292 p.

DALAGNOL, R. et al. **The MANVI product: MODIS (MAIAC) nadir-solar adjusted vegetation indices (EVI and NDVI) for South America**. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3159488>.

D'ODORICO, P. et al. Global desertification: drivers and feedbacks. **Advances in Water Resources**, v. 51, p. 326–344, 2013.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p.

EMANUELLI, P. et al. **Diagnostico de la desertificación en Chile y sus efectos sobre el desarrollo sustentable**. Santiago: CONAF, 2016. 33 p.

EVANS, J.; GEERKEN, R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation, **Journal of Arid Environments**, v. 57, p. 535–554, 2004.

FALVEY, M. GARREAUD, R. Regional cooling in a warming world: recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). **Journal of Geophysical Research**, v. 114, n. D4, p. 1 - 16, 2009.

FRAGOSO JUNIOR, R. F.; FERREIRA, T. F.; MARQUES, D. M. **Modelagem ecológica em ecossistemas aquáticos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 304 p.

GARREAUD, R.; ACEITUNO, P. Atmospheric circulation over South America: mean features and variability. In: VEBLEN, T.; ORME, A.; YOUNG, K. (Ed.). **The physical geography of South America**. Oxford: Oxford University Press, 2002. 33 p.

GARREAUD, R. et al. Present-day South American climate. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 281, n. 3/4, p. 180-195, 2009.

GARREAUD, R. D. et al. The 2010-2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 12, p. 6307–6327. 2017.

GARREAUD, R. D. et al. The central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 1, p. 421–439, 2019.

GLADE, F. E. et al. Productivity and phenological responses of natural vegetation to present and future inter-annual climate variability across semi-arid river basins in Chile. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 188, n. 12, p. 1 - 14, 2016.

GRANADOS-SÁNCHEZ, D. et al. Sistemas de alimentación para las cabras y evaluación cualitativa de los piensos a los que se tienen acceso durante la temporada de seca: dos estudios de caso del altiplano mexicano. **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente**, v. 17, p. 247–258, 2011.

HARRIS, I. et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations: the CRU TS3.10 dataset. **International Journal of Climatology**, v. 34, p. 623–642, 2014.

HEMPEL S. et al. Trend-preserving bias correction - the ISI-MIP approach. **Earth System Dynamics**, v. 4, n. 2, p. 219–36, 2013.

HIGGINBOTTOM, T. P.; SYMEONAKIS, E. Assessing land degradation and desertification using vegetation index data: current frameworks and future directions. **Remote Sensing**, v. 6, n. 10, p. 9552–9575, 2014.

HOLECHEK, J. L. The future of range livestock production, energy, and grazing management. In: INTERNATIONAL RANGELANDS CONGRESS, 9., 2011, Rosario, Argentina. **Proceedings...** 2011. p. 189-195.

HSU, J. S.; POWELL, J. ADLER, P. B. Sensitivity of mean annual primary production to precipitation. **Global Change Biology**, v. 18, n. 7, p. 2246–2255, 2012.

HUANG, F.; XU, S. Spatio-temporal variations of rain-use efficiency in the west of Songliao plain, China. **Sustainability** (Switzerland), v. 8, n. 4, p. 1-19, 2016.

HURTT, G. C. et al. Harmonization of land-use scenarios for the period 1500–2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. **Climatic Change**, v. 109, n.1/2, p. 117 - 161, 2011.

HUXMAN, T. E. et al. Convergence across biomes to common rain use efficiency. **Nature**, v. 429, n. 6992, p. 651–654, 2004.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change and land**. [S.I.]: IPCC, 2019.

KOBAYASHI, S. et al. The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 93, p. 5–48, 2015.

KROL, M. et al. Integrated modelling of climate, water, soil, agricultural and socio-economic processes: a general introduction of the methodology and some exemplary results from the semi-arid north-east of Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 328, n. 3/4, p. 417- 431, 2006.

LAL, R. Soil degradation by erosion. **Land Degradation and Development**, v. 12, n. 6, p. 519–539, 2001.

LE HOUEROU, H. N.; BINGHAM, R. L.; SKERBEKI, W. Relationship between the variability of primary production and the variability of annual precipitation in world arid lands, **Journal of Arid Environments**, v. 15, n. 1, p. 1–18, 1988.

LI, A.; WU, J.; HUANG, J. Distinguishing between human-induced and climate-driven vegetation changes: a critical application of RESTREND in inner Mongolia. **Landscape Ecology**, v. 27, n. 7, p. 969-982, 2012.

MALIVA, R. G.; MISSIMER, T. M. Managed aquifer recharge. **Arid Lands Water Evaluation and Management**, p. 559–630, 2012.

REID, W. V. et al. **Ecosystems and human well-being-synthesis**: a report of the millennium ecosystem assessment. [S.l.]: Island Press, 2005. 156 p.

MEZA, F. Recent trends and ENSO influence on droughts in Northern Chile: an application of the standardized precipitation evapotranspiration index. **Weather Clim. Extremes**, v. 1, p. 51–58, 2013.

MONTECINOS, A.; ACEITUNO, P. Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. **Journal of Climate**, v. 16, n. 2, p. 281–296, 2003.

MORALES, C. et al. Measuring the economic value of land degradation / desertification considering the effects of climate change: a study for Latin America and the Caribbean La valeur économique de la dégradation des terres / désertification considérant les effets du change. **Science et Changements Planétaires / Sécheresse**, v. 23, n. 3, 2012.

MORALES, C; PARADA, S. **Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales**. Santiago: United Nations Publications, 2005. 267 p.

MORALES, E. **Changing ownership and management of state forest plantations**: Chile. Cape Town: International Institute for Environment and Development, 2003.

NUÑEZ, J.; VERBIST, K. **Atlas de sequías de América Latina y el Caribe**. [S.I.]: UNESCO, 2018. 179 p.

PACHAURI, R, K. et al. **Climate change 2014: synthesis report**. [S.I.]: IPCC, 2014. 151 p.

PACHECO, A. P.; FREIRA, N. C. F.; BORGES, U. N. A transdisciplinaridade da desertificação. **Geografia**, v. 15, n. 1, p. 5 – 34. 2006.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS - PBMC. **Executive summary**: impacts, vulnerabilities and adaptation to climate change. Rio de Janeiro: UFRJ, 2013. 24 p.

PROGRAMA DE ACCIÓN NACIONAL DE LUCHA CONTRA LA DESERTIFICACIÓN - PANCD. **La degradación de las tierras y la sequía, Chile 2016-2030**. [S.I.]: Corporación Forestal Nacional (CORFO), 2016. 236 p.

QUINTANA, J. The drought in Chile and la Niña. **Drought Network News**, v. 12, n. 2, p. 3-6, 2000.

REYNOLDS, J. F. et al. Ecology: global desertification: building a science for dryland development. **Science**, v. 316, n. 5826, p. 847 – 851. 2007.

RIAHI, K.; GRÜBLER, A.; NAKICENOVIC, N. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 74, n. 7, p. 887 - 935, 2007.

RICHARDSON, F. D.; HAHN, B. D. A short-term mechanistic model of forage and livestock in the semi-arid Succulent Karoo: 1. description of the model and sensitivity analyses. **Agricultural Systems**, v. 95, n. 1/3, p. 49 - 61, 2007.

RODELL, M. et al. The global land data assimilation system. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 85, n.3, p. 381 - 394, 2004.

ROJAS, M.; GALLARDO, L.; BOZKURT, D. **Simulaciones climáticas regionales**. [S.l.]: CR2 Publication, 2018. 27 p.

SALCEDO, S; GUZMÁN, L. **Agricultura familiar en América latina y el Caribe: recomendaciones de política**. Santiago: FAO, 2014. 497 p.

SALINAS. C. **Evaluación de la normativa de fomento silvoagropecuario para la lucha contra la desertificación y sequía en Chile**. Tesis (PhD) - Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea, 2011.

SANTIBÁÑEZ, F. **Parámetros empíricos usados pelo modelo SIMPRAD** [comunicação pessoal]. Mensagem recebida por Rosa Zamora Aguirre em 15 julho 2019.

SANTIBÁÑEZ, F. **Características para o cálculo da capacidade de carga do modelo SIMPRAD** [comunicação pessoal]. Mensagem recebida por Rosa Zamora Aguirre em 16 agosto 2018.

SANTIBÁÑEZ, F. et al. **Atlas del cambio climatico de la regions aridas y semiaridas de Chile**. Santiago: Universidad de Chile, 2014. 136 p.

SANTIBÁÑEZ, F. et al. **Vulnerability analysis of forestry and agricultural sector, water and soil of Chile against climate change scenarios**. Santiago: University of Chile, 2008.

SANTIBÁÑEZ, F.; SANTIBÁÑEZ, P. Trends in land degradation in Latin America and the Caribbean, the role of climate change. In: SIVAKUMAR, M. V. K.; NDIANG'UI, N. (Ed.). **Climate and land degradation**. Berlin: Springer, 2007. p. 65-81.

SANTIBÁÑEZ, F. El modelado del crecimiento, desarrollo y producción del maíz sobre bases ecofisiológicas mediante el modelo simproc. **Revista Argentina de Agrometeorología**, v. 1, n. 1, p. 7 - 16. 2001.

SANTIBÁÑEZ, F. Climatic variations and productivity modelling in Arid Regions: grasslands and annual crops. In: SANTIBÁÑEZ, F.; MARIN, V. (Ed.). **An environmental information and modelling system for sustainable development**. Santiago: Universidad de Chile, 1998, p. 41 - 51.

SANTIBÁÑEZ, F. Possible impact on agriculture due to climatic change and variability in South America. In: YOSHINO, M. et al (Ed.). **Climates and societies: a climatological perspective**. Berlin: Springer, 1997. p. 255 - 277.

SANTIBÁÑEZ, F. **Modelisation agroecologique appliquée à l'analyse et la zonification de la productivité des cultures**. Thèse (Docteur) - Université de Paris, Paris, 1986.

SARRICOLEA, P. et al. Trends of daily precipitation concentration in Central-Southern Chile. **Atmospheric Research**, v. 215, p. 85 - 98, 2019.

SIVAKUMAR, M. Interactions between climate and desertification. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, n. 2/4, p. 143 – 155, 2007.

SWEMMER, A. M.; KNAPP, A. K.; SNYMAN, H. A. Intra-seasonal precipitation patterns and above-ground productivity in three perennial grasslands. **Journal of Ecology**, v. 95, n. 4, p. 780 – 788, 2007.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 4, p. 485 – 498, 2012.

TURNER, N. C. Sustainable production of crops and pastures under drought in a Mediterranean environment. **Annals of Applied Biology**, v. 144, n. 2, p. 139 – 147, 2004.

UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION - UNCCD. Elaboration of an international convention to combat desertification in countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa. **Global Environmental Law Annual**, v.3, n. 189, p. 1–58, 1994.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP. **World atlas of desertification**. Oxford: Oxford University Press, 1992. 69 p.

VAN DER ESCH, S. et al. **Exploring future changes in land use and land condition and the impacts on food, water, climate change and biodiversity**: scenarios for the Global Land Outlook. The Hague: Netherlands Environmental Assessment Agency, 2017. 116 p.

VAN VUUREN, D. P. et al. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 5 – 31, 2011.

VARGAS, G.; ORTLIEB, L.; RUTLLANT, J. Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. **Revista Geológica de Chile**, v. 27, n. 2, p. 157 - 176. 2000,

VASQUEZ-MENDEZ, R. et al. Soil erosion processes in semiarid areas: the importance of native vegetation. **Soil Erosion Studies**, v. 1, p. 25 - 41, 2011.

WANG, Y. et al. Regional climate modeling: progress, challenges, and prospects. **Journal of the Meteorological**, v. 82, n. 6, p. 1 – 30, 2004.

WESSELS, K. J. et al. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? a case study in South Africa. **Journal of Arid Environments**, v. 68, p. 271 – 297, 2007.

YANG, Y. et al. Relationship between variability in aboveground net primary production and precipitation in global grasslands. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 23, p. 2 – 5, 2008.

ZHAO, Y. et al. Detailed dynamic land cover mapping of Chile: accuracy improvement by integrating multi-temporal data. **Remote Sensing of Environment**, v. 183, p. 170 – 185, 2016.