



**Tesis para optar al Título de
Magíster en Ciencias Ambientales**

**“Impactos de los déficit hídricos en la cadena
trófica de ecozonas de ganadería extensiva del
Uruguay”**

Autor: Walter Oyhantçabal

Tutores: José Paruelo y Marcos Texeira

Tribunal: Prof. Daniel Panario

Dr. Gervasio Piñeiro

Dra. Claudia Rodríguez

Solís, Maldonado, Uruguay

11 de Octubre de 2014

Director: Dr. José M. Paruelo (Sección Ecología Terrestre, Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay; Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección, LART-IFEVA, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires/CONYCET)

Co-director: Dr. Marcos Texeira (Departamento de Métodos Cuantitativos y Sistemas de Información, LART-IFEVA, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires/CONYCET)

Dedicada:

A mis padres y mis hijos

Agradecimientos:

A mis tutores, los Drs. José Paruelo y Marcos Texeira

A la UDELAR y a la MACA

A OPYPA-MGAP

"No creas que alcanzarás la verdad obteniendo más conocimientos. Los conocimientos engendran la duda y la duda te hace tener hambre de más conocimientos" LAO TSE

"El conocimiento es la explicación más plausible que podemos dar a la realidad". Daniel Cassany

Contenido

1	RESUMEN	7
2	INTRODUCCION.....	9
2.1	Relaciones entre precipitación, contenido hídrico del suelo, producción primaria neta aérea y producción secundaria.....	9
2.2	La ganadería, el clima y sus cambios en Uruguay	11
2.3	Justificación del estudio	14
3	OBJETIVOS, JUSTIFICACIÓN Y PREGUNTAS A CONTESTAR.....	17
3.1	Objetivo general	17
3.2	Objetivos específicos	17
3.3	Preguntas a contestar.....	17
4	MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
4.1	Datos	19
4.2	Análisis	23
5	RESULTADOS.....	31
5.1	Series de precipitación	31
5.2	Análisis del déficit hídrico edáfico.....	40
5.2.1	Análisis de eventos típicos y eventos extremos.....	40
5.2.2	Evolución del DH estacional.....	45
5.2.3	Análisis de correlación entre precipitación y déficit hídrico	46
5.2.4	Análisis de autocorrelación del DH edáfico con retardos	49
5.2.5	Tendencias en la mediana y los eventos extremos de máxima	51
5.2.6	Análisis de similitud del DH entre ecoregiones.....	55
5.3	Análisis del indicador ETR/ETP	56
5.3.1	Frecuencia de meses con $ETR/ETP \leq 0,5$ según región y estación del año	56
5.3.2	Extensión geográfica de las rachas.....	59
5.3.3	Mes de inicio de las rachas.....	61
5.3.4	Duración de las rachas.....	62
5.3.5	Intensidad de las rachas	63
5.3.6	Recurrencia de las rachas	64
5.4	Análisis de la productividad primaria neta aérea	65
5.4.1	Eventos típicos y eventos extremos de fPAR.....	65
5.4.2	Variación mensual de fPAR	66
5.4.3	fPAR en el período de mayor crecimiento de las pasturas.....	67

5.4.4	Correlación entre DH y fPAR	70
5.4.5	Tendencias en la mediana y los eventos extremos de mínima	71
5.5	Análisis de las existencias ganaderas.....	76
5.5.1	Eventos típicos y dispersión	76
5.5.2	Evolución temporal en las dos regiones.....	77
5.5.3	Relaciones entre carga animal y DH	78
5.6	Relaciones entre variabilidad de la precipitación, déficit hídrico edáfico, PPNA y existencias	79
6	Discusión general	84
6.1	Tendencias en las precipitaciones	84
6.2	Tendencias en el déficit de hídrico edáfico	85
6.3	Caracterización de rachas de bajo nivel de ETR/ETP	87
6.4	Tendencias en la fPAR.....	88
6.5	Efectos inerciales y retardados en las relaciones entre DH y carga animal	89
6.6	Relaciones entre la lluvia, DH, fPAR y Carga animal	89
6.7	Conclusiones e implicancias para el diseño de políticas públicas	90
7	Bibliografía	91

Lista de acrónimos y siglas

ACP	Análisis de componentes principales
CONEAT	Comisión Nacional de Estudios Agroeconómicos de la Tierra
CV	Coefficiente de variación
DH	Déficit hídrico edáfico
DICOSE	Dirección de Contralor de Semovientes del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP)
DIEA	Dirección de Estadísticas Agropecuarias del MGAP
ETP	Evapotranspiración potencial
ETR	Evapotranspiración real
EUR	Eficiencia de uso de la radiación
fPAR	Fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida
FUCREA	Federación Uruguaya de Grupos CREA
GRAS	Grupo Agroclima y Sistemas de Información de INIA
INIA	Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria
INUMET	Instituto Uruguayo de Meteorología
IPA	Instituto Plan Agropecuario
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
IVN	Índice de Vegetación Normalizado
MACA	Maestría en Ciencias Ambientales
MGAP	Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca
OPYPA	Oficina de Programación y Política Agropecuaria
P	Precipitación
PAR	Radiación fotosintéticamente activa
PMP	Punto de Marchitez Permanente
PPNA	Productividad Primaria Neta Aérea
SP	Sección Policial
SUL	Secretariado Uruguayo de la Lana
UDELAR	Universidad de la República

1 RESUMEN

El objetivo general de esta tesis fue estudiar las relaciones entre variabilidad interanual de la lluvia y el déficit hídrico edáfico y sus impactos sobre la variabilidad de la productividad primaria neta aérea -PPNA- de los recursos forrajeros del campo natural y la producción secundaria ganadera. La relación entre los aspectos descritos se estudió en dos unidades de paisaje: la Cuesta Basáltica y las Sierras del Este. La resolución del análisis correspondió al de secciones policiales.

Específicamente se buscó responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué tendencias han seguido las precipitaciones y los períodos de déficit de hídrico edáfico a escala estacional en Uruguay en el pasado reciente?

Las precipitaciones acumuladas de primavera no muestran tendencia estadísticamente significativa en los 63 años analizados en la mayoría de las estaciones meteorológicas. Sólo se encontró tendencia estadísticamente significativa en una minoría de estaciones meteorológicas del Norte del país. No se encontraron señales claras de cambios consistentes en la variabilidad de la precipitación al analizar la variabilidad por décadas a paso mensual y anual usando el coeficiente de variación. En los últimos 30 años del período la mediana de la lluvia resultó mayor y la variabilidad menor que en los 30 años previos.

¿Han aumentado la severidad, la extensión y la frecuencia de eventos extremos de déficit hídrico edáfico (DH)?

Utilizando regresión por cuantiles se encontró una tendencia de largo plazo a la disminución del DH del período noviembre-marzo, tanto en términos de la mediana como de eventos extremos (percentil 90). Estas tendencias no resultaron estadísticamente significativas en Basalto Superficial y resultaron marginalmente significativas en Sierras del Este. Los períodos de 3 o más meses de $ETR/ETP \leq 0,5$ tienen tendencia decreciente no significativa en Basalto Superficial y tendencia decreciente significativa en Sierras del Este.

- ¿Qué relaciones espaciales se establecen entre los fenómenos de DH extremo en los territorios bajo estudio?

La correlación del número de períodos de 3 o más meses consecutivos (“rachas”) de $ETR/ETP \leq 0,5$ entre Basalto Superficial y Sierras del Este es positiva (0,563) y es estadísticamente significativa (al 0,01). Sin embargo, Basalto Superficial resultó una ecoregión de DH más severo que Sierras del Este.

La cantidad de secciones policiales afectadas en un mismo año por rachas de 3 o más meses con $ETP/ETR \leq 0,5$ muestra tendencias negativas en ambas ecoregiones. El período de

recurrencia medio de estas rachas ha aumentado en ambas ecoregiones y especialmente en Sierras del Este (en otras palabras, está bajando la frecuencia de este tipo de fenómenos).

- ¿Qué tendencias ha seguido la productividad primaria neta aérea del pastizal (medida por la fPAR) en las ecoregiones seleccionadas en el pasado reciente (1980-2010) ¿Han aumentado la severidad, la extensión y la frecuencia de eventos extremos de mínima?

En la PPNA (fPAR) de Basalto Superficial se verificó una tendencia decreciente y estadísticamente significativa en la mediana en todas las secciones policiales; mientras que para el percentil 10 la tendencia también resultó decreciente en todas las secciones policiales, aunque estadísticamente significativa en 10 de las 17 secciones. En Sierras del Este la tendencia de la mediana y el percentil 10 resultó creciente y significativa en la mayoría de las SP, eventualmente por efectos no directamente atribuibles al pastizal, sino al aumento de la superficie forestal.

- ¿Qué relaciones se establecen entre la lluvia, los déficit hídricos (DH), la fPAR del pastizal y la carga animal? ¿La variabilidad es amplificada o amortiguada a nivel de la productividad de la ganadería de carne vacuna uruguaya?

La correlación entre DH y fPAR del período noviembre-marzo es negativa y estadísticamente muy significativa ($p < 0,01$) en Basalto Superficial. En Sierras del Este no se encontró correlación significativa entre DH y fPAR. Se verificó, para ambas ecoregiones que la variabilidad del DH resulta amortiguada en algunas SP y amplificada en otras. Por su parte, la variabilidad de la fPAR se amortigua en forma notoria en relación a la variabilidad del DH en todas las SP de las dos ecoregiones. Esta respuesta de amortiguamiento de la variabilidad es aún más fuerte al pasar del nivel trófico primario al secundario (fPAR - Carga).

- ¿Existen efectos inerciales y retardados en las relaciones entre las variables en los agro-ecosistemas?

No se encontraron efectos retardados estadísticamente significativos en las relaciones entre DH y Carga animal, para períodos de uno, dos y tres años.

Palabras clave: variabilidad y cambio climático, déficit hídrico edáfico, productividad primaria neta aérea, pastizales, producción secundaria.

2 INTRODUCCION

2.1 Relaciones entre precipitación, contenido hídrico del suelo, producción primaria neta aérea y producción secundaria.

Los pastizales pampeanos proveen una serie de servicios ecosistémicos de fundamental importancia como producción de alimentos y fibras, regulación climática, almacenamiento de agua, retención de suelos, control de la erosión, recursos genéticos, provisión de hábitats y ciclado de nutrientes (Costanza *et al.* 1997 y 2013). Estos servicios se derivan en última instancia de flujos de energía y materia en los ecosistemas que se apoyan en el uso que los organismos autótrofos hacen de la radiación solar fotosintéticamente activa para transformar y almacenar energía. Esta energía fijada y almacenada en forma de biomasa es la producción primaria neta (PPN), y constituye, en términos ecológicos, el primer nivel trófico. Los herbívoros y detritívoros conforman el segundo nivel trófico, mientras que los carnívoros conforman un tercero. La ganadería sobre pastizales en Uruguay es, dicho en clave ecológica, un proceso antrópico por el cual se aprovecha la PPNA para obtener producción secundaria (criar herbívoros vacunos, ovinos y equinos) para uso humano. Por lo tanto la PPN del pastizal es la base del sistema productivo ganadero y tiene un impacto directo sobre la producción ganadera en pastizales, siendo controlada por factores ambientales como precipitación, temperatura, radiación, características de los suelos y estructura de la vegetación dominante. El estudio de los factores que determinan la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) del pastizal, como la disponibilidad de agua edáfica, es de enorme relevancia para la producción ganadera del Uruguay, cuya base alimenticia es, como se ha dicho, el ecosistema de pastizal natural. La relación entre la precipitación y la PPNA de pastizales naturales ha sido ampliamente estudiada a lo largo de gradientes de disponibilidad de agua (Sala *et al.* 1988, Paruelo *et al.* 1999, Gao *et al.* 2010, Ma *et al.* 2010). Aún para una porción relativamente reducida de ese gradiente, como la que se presenta en Uruguay, la relación sigue siendo positiva y significativa (Paruelo *et al.* 2010). Esta relación no sólo depende de la cantidad total de precipitaciones sino que es influida por la distribución de la lluvia dentro del año además de por los totales anuales (Swemmer *et al.* 2007).

La PPNA es una variable que integra muchos aspectos del funcionamiento de los ecosistemas (McNaughton 1989), incluido la energía disponible para los niveles tróficos superiores. En la producción ganadera la PPNA determina la disponibilidad de forraje y la proporción consumida por vacunos y ovinos. Hay una relación positiva entre la PPNA y el índice de cosecha de forraje (Oesterheld *et al.* 1992; Golluscio *et al.* 1998). Por su parte, la variabilidad espacial y temporal de la PPNA es un factor clave en el control del ingreso y la acumulación de carbono a los ecosistemas (Piñeiro *et al.* 2006a). Por ello, entender esta variabilidad y su respuesta a los factores biofísicos es clave para el manejo sostenible de los sistemas pastoriles sobre pastizales (Guido *et al.*, 2014).

Usando datos de sensores remotos, se ha estudiado cómo difiere la PPNA del pastizal en la región Centro-Norte del Uruguay probando la utilidad de índices espectrales provistos por sensores remotos como herramienta para caracterizar la variabilidad temporal y espacial del pastizal y para aportar información aplicable al manejo del pastoreo (datos estacionales de crecimiento para la determinación de la capacidad de carga) y la conservación de la biodiversidad (Baeza et al. 2010). Recientemente Guido *et al.* (2014) mostraron que la PPNA en Uruguay varía espacialmente entre unidades geomorfológicas, y que aumenta de norte y medio oeste a este y sureste. Los pastizales de la Cuesta Basáltica resultaron los menos productivos ($399 \text{ g MS m}^{-2} \text{ año}^{-1}$), mientras que los de Sierras del Este y Colinas y Lomas del Este exhibieron la mayor PPNA (463 y $465 \text{ MS m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, respectivamente). Los autores atribuyen estas diferencias a la profundidad del suelo que se asocia a la variación asociada en la disponibilidad de agua. Asimismo, estos autores analizaron la variabilidad estacional en la PPNA y hallaron que el pico de productividad se encontró en primavera para todas las unidades geomorfológicas. Estudiando un período de 10 años (2000-2010) los resultados que encontraron sugieren que los impulsores de la PPNA operan de manera diferente en el espacio, y que por lo tanto, entender la variabilidad espacial y temporal de la PPNA de los pastizales es un prerrequisito para el manejo sostenible de los pastizales. Sin embargo, es necesario mejorar las estimaciones de la variabilidad espacial y temporal de la eficiencia de uso de la radiación (Paruelo *et al.*, 2010).

En pastizales sub-húmedos, la capacidad de almacenaje de agua en el perfil del suelo ha sido identificada como un determinante mayor de la PPNA (Sala et al. 1988). A su vez la PPNA es el principal determinante de la carga animal (Oesterheld et al., 1998). De esta manera, se establecen relaciones entre niveles tróficos. Conocer la variación de la PPNA en el espacio y en el tiempo y sus controles es un desafío importante en los sistemas ganaderos (Irisarri, 2008; Oesterheld *et al.* 2011)). Por su parte, desde una perspectiva agronómica, el grado de ajuste entre la producción de forraje y la carga animal influye sobre la condición corporal de los animales y sobre su performance reproductiva. En campos sobrepastoreados y que se manejan con baja altura del forraje la producción secundaria disminuye (Nabinger, 2009). Varios de los descriptores del nivel trófico de los herbívoros, incluyendo biomasa animal, consumo y productividad están significativamente correlacionados con la PPNA en un amplio rango de ecosistemas terrestres (Osterheld *et. al.* 1992).

Baeza et al. (2011a) describieron la variabilidad natural de los pastizales naturales de cuatro regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas, dos de las cuales (Cuesta Basáltica y Sierras del Este) están comprendidas en este estudio. La investigación concluyó como uno de sus resultados relevantes, que las cuatro unidades muestran una asociación entre las comunidades vegetales y el agua potencialmente disponible en los suelos, y que al interior de estas regiones hay diferentes comunidades caracterizadas por distinta composición florística. Las unidades más xerofíticas y/o con menor cobertura del

suelo resultaron aquellas con predominio de suelos superficiales y limitada capacidad de almacenar agua en el perfil. Según Baeza et. al, (2011b), suelos de la Cuesta Basáltica, predominan pastos C4, de ciclo estivo-otoñal, en lugar de pastos C3, de ciclo primavero-estival. La coexistencia de pastos C3 y C4 explica, para estos autores, la bimodalidad de las curvas anuales de PPNA típicas del Basalto así como una mayor PPNA y la unimodalidad en Sierras del Este evidenciando un componente C3 importante y/o restricciones hídricas estivales. Asimismo, encuentran valores de PPNA mayores en Sierras del Este que en la Cuesta Basáltica. La dominancia de especies xerofíticas se podría considerar clave en la explicación de la resiliencia que tienen los tapices de estas regiones de suelos superficiales luego del impacto de eventos de déficit hídrico prolongado.

Existen estudios que demuestran como la disponibilidad de forraje y el clima controlan la performance reproductiva de los rumiantes en pastoreo. En un trabajo para la Patagonia, Texeira *et al.* (2009) concluyen que la tasa de marcación en ovinos está fuertemente asociada a la disponibilidad de forraje regulando la performance reproductiva de los ovinos en esta región. Estos resultados refuerzan la idea de la importancia de los elementos de base (“bottom-up”), como la asignación de forraje (o su inverso, la presión de pastoreo, Allen 2011) a nivel predial.

Dado que la PPNA controla la carga animal por unidad de área y período de tiempo y que la PPNA varía en el tiempo y en el espacio, la capacidad de carga también es variable en ambas dimensiones. En última instancia, los determinantes de la PPNA (entre ellos agua edáfica y precipitación) también son determinantes de la capacidad de carga. Por su parte, malas decisiones en relación a la gestión de los servicios ecosistémicos pueden conducir a trayectorias no sostenibles (Chapin, 2009).

Para la Pampa deprimida de Argentina, Irisarri *et al* (2013) encontraron que cuando las precipitaciones fueron 25% menos que el promedio, la PPNA disminuyó 23%, y que cuando fueron 50% mayores que el promedio la PPNA aumentó solo 19%. Con datos de PPNA las capacidades de carga fueron estimadas para cada unidad funcional considerando años contrastantes de precipitación, variando entre 0,62 y 1,2 UG por ha. Como se desprende, situaciones de sobrecarga en años de baja precipitación conducirán a bajas asignaciones de forraje y a bajas ganancias de peso y reducción de la performance reproductiva (Carvalho et al. 2007).

2.2 La ganadería, el clima y sus cambios en Uruguay

El cambio climático es una realidad que se manifiesta de distinta manera a nivel global, regional y local (IPCC 2007a). Las evidencias científicas indican que este fenómeno, sumado a la variabilidad natural, está teniendo cada vez más incidencia sobre los procesos ecológicos y las actividades humanas, como consecuencia del aumento en las temperaturas medias y de la modificación de los regímenes de lluvias (IPCC 2007a). Los ecosistemas y las actividades

agropecuarias se verán especialmente afectadas por el cambio climático, por ser muy dependientes del clima (Medvigy 2005, Baethgen 2009).

La variabilidad es la heterogeneidad de una variable a través del tiempo, del espacio o de los miembros de una población (IPCC, 2013). La variabilidad es una propiedad inherente al sistema o a la naturaleza, y no al analista. Según el glosario del Cuarto Reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007a), la variabilidad climática refiere a las variaciones en la media y otros estadísticos (como el desvío estándar, los extremos, etc.) del clima en todas las escalas temporales y espaciales más allá de eventos meteorológicos individuales. Esta variabilidad puede ser consecuencia de procesos naturales internos del sistema climático o de variaciones en las variables de forzado (naturales o antrópicas).

El IPCC (2007b) define “sequía” como aquel fenómeno asociado a precipitaciones significativamente por debajo de los registros normales, y que causa desbalances hidrológicos serios que a menudo afectan adversamente los sistemas de producción y los recursos terrestres. Siguiendo las definiciones del IPCC (Glosario del Informe del 2007), “un evento extremo meteorológico es aquel que puede considerarse “raro” dentro de su distribución estadística de referencia en un lugar determinado (i.e. su probabilidad de ocurrencia es baja). Las definiciones de “raro” pueden variar, pero un evento meteorológico extremo puede considerarse como tal, cuando se encuentra por encima o por debajo del percentil 90 o 10 respectivamente. Las características de este tipo de eventos pueden variar de un lugar a otro. Eventos meteorológicos extremos típicos incluyen las sequías y las inundaciones. Sequía es un término relativo, por lo tanto cualquier discusión en términos de precipitación debe referir a la actividad relacionada con la precipitación que está siendo discutida. Por ejemplo, la escasez de precipitación durante la estación de crecimiento de las pasturas influye en la productividad y en las funciones del ecosistema en general (debido a falta de humedad en el suelo también llamada sequía agronómica), y durante las fases de escurrimiento y percolación afecta principalmente el suministro de agua (sequía hidrológica). Los cambios en la humedad del suelo y en el agua subterránea también afectan la evapotranspiración real además de la reducción de la precipitación.

Por su parte, un evento climático severo en el sector agropecuario puede considerarse como aquel que:

- Produce daños severos.
- Es meteorológicamente raro.
- Es un evento meteorológico extremo individual o es un conjunto de eventos meteorológicos (evento climático).

En otras palabras, un evento extremo se puede definir por su magnitud (intensidad, extensión, duración), por su rareza y/o por sus impactos.

Los impactos pueden ser “instantáneos” (ocurrir en el año del evento) o diferidos, dependiendo de la duración de los ciclos productivos y del nivel trófico en el cual los estamos

evaluando (el forraje o el ganado). En este punto es importante tener en cuenta la inercia –o autocorrelación temporal- de los sistemas ecológicos y los efectos retardados (Paruelo y Lauenroth 1998; Wiegand *et al* 2004). Un evento extremo de déficit hídrico edáfico puede demorar en manifestarse en la cadena trófica, y generar efectos retardados en el tiempo una vez superada la situación de déficit hídrico. En el caso de la ganadería de carne, cuyos ciclos productivos duran años, una sequía que afecte negativamente los indicadores reproductivos se expresaría naturalmente en la tasa de extracción de animales maduros para faena 2 a 4 años después. En esta tesis se evaluó en qué medida los cambios ambientales en valores medios y variabilidad pueden ser amplificados o amortiguados por los ecosistemas y/o los agro-ecosistemas.

Una de los principales amenazas del cambio climático es el aumento de la variabilidad de las precipitaciones, y de la frecuencia de eventos extremos, entre otros, los déficits o excesos hídricos (IPCC 2007b, Allan y Soden 2008). Sin embargo en Uruguay está poco estudiado si ha ocurrido hasta el presente un aumento de la frecuencia y/o la intensidad de eventos extremos de precipitación o falta de precipitación. El principal antecedente (MGAP-FAO, 2013) no encontró evidencias de aumento de los eventos de déficit de precipitación acumulada en primavera-verano-otoño, para una serie larga de años en cinco localidades del país. La mayor parte de la variabilidad de los datos no resultó explicada por la “variabilidad de largo plazo” (varianza explicada por la variable proyectada sobre el calentamiento medio del globo), sino por la variabilidad interanual. El estudio muestra también una tendencia al aumento de la demanda atmosférica en el norte y este y una disminución en el sur y oeste, llegando ambas a ser estadísticamente significativas en algunos de los casos.

Otros estudios anteriores para caracterizar la tendencia histórica y la variabilidad de la precipitación en Uruguay arrojan resultados semejantes (Caffera 2006, Caffera *et al.* 2007, Rusticucci *et al.* 2010). Se ha demostrado que los cambios registrados en la disponibilidad hídrica y en la variabilidad de la precipitación se vinculan con cambios observados con la circulación atmosférica (Caffera *et al.* 2007), ya que los anticiclones semipermanentes que rodean al Cono Sur, determinan en gran medida el régimen de precipitación sobre la parte austral de la Cuenca del Plata (Caffera 2006). Otros antecedentes (Minetti *et al.* 1987, Caffera *et al.* 2005) documentan la paulatina migración hacia el Sur de esos anticiclones.

Se ha demostrado también la distribución espacial de regímenes canónicos de evapotranspiración potencial y precipitación en Uruguay, junto con una caracterización de la variabilidad espacio-temporal de ésta (Caffera 2006) y el cambio en frecuencia de deficiencias hídricas potenciales, lo que resultó desde 1982 y hasta 2000, en una disminución en la asiduidad de ocurrencia de meses deficitarios durante la primavera y el otoño, en regiones específicas del territorio. Tomando el coeficiente de variación, diversos estudios sugieren aumentos en la variabilidad relativa de la lluvia mensual en los últimos 80 años (AIACC 2006, Caffera 2007 y Caffera y Oyhantçabal 2009).

Haylock *et al.* (2006), encontraron cambios a condiciones más húmedas y tendencias a menos días consecutivos secos en Uruguay. En el noroeste del país habría una tendencia negativa en número de días consecutivos húmedos, pero al sudeste se observa lo opuesto. También se reporta una leve tendencia a que aumenten los eventos de precipitación más intensa y a menos días con extremos de precipitación en el sudoeste de Uruguay. Por su parte Alexander *et al.* (2006) reportó cambios de aumento en la tendencia de precipitaciones fuertes tomadas de a 5 días en otoño (Marzo, Abril y Mayo).

El fenómeno EL NIÑO-OSCILACION SUR (ENOS) es el ejemplo más notable de inducción de variabilidad climática de un año para otro en el mundo (IPCC 2007a). La influencia del fenómeno ENOS ha sido ampliamente reconocida en la literatura (IPCC 2007a). El Sudeste de Sudamérica es una región que tiene una importante teleconexión con el fenómeno ENOS, la que ha sido extensamente documentada (Barros *et al.* 2006, Vera 2006). En contraste con lo que sucede en el nordeste brasileño, las precipitaciones en el sur de Brasil, Paraguay, Uruguay y noreste de Argentina tienden a ser anormalmente abundantes durante la fase de calentamiento en la superficie del Océano Pacífico (“Fase Niño”). También existe evidencia que los períodos de enfriamiento (“Fase Niña”) en la superficie del Océano Pacífico producen condiciones anormalmente secas sobre varias regiones de nuestro país (MGAP-FAO 2013). La señal es especialmente fuerte en el Noroeste, y particularmente a partir de octubre y hacia los meses en que simultáneamente se incrementa la demanda atmosférica. Asimismo, la señal del ENOS es muy débil o no significativa en el sureste del país (Rafael Terra 2013, *com. pers.*) En ese sentido, en esta tesis se incluyó un territorio donde la señal del ENOS es fuerte (Basalto) y otro donde la señal es débil o no se detecta (la parte sur de las Sierras del Este).

2.3 Justificación del estudio

Este estudio se justifica en la importancia de comprender mejor el comportamiento de la variabilidad temporal y espacial del déficit hídrico y sus impactos sobre la productividad de los ecosistemas de pastizal, base de sustento de la ganadería uruguaya. Los controles climáticos sobre la PPNA son un asunto de relevancia central para la sociedad, principalmente porque se relacionan con la medida en que la PPNA de los ecosistemas manejados puede proveer los alimentos y fibras que demanda el desarrollo del país y la creciente población mundial.

En general, los ecosistemas de pastizal exhiben una menor PPNA comparado con otros ecosistemas como los bosques tropicales y las sabanas (Geider *et al.*, 2001). Los ecosistemas de pastizal muestran además una importante variabilidad interanual y estacional en su PPN (Zheng *et al.*, 2003), y son considerados muy sensibles a la variabilidad en la precipitación como fuente de recarga del agua almacenada en el suelo (Sala *et al.*, 1988; Lauenroth & Sala, 1992; Knapp y Smith, 2001; Jobaggy *et al.*, 2002). Por lo tanto, la mejora de la comprensión

de las relaciones entre niveles que se estudian en esta tesis se espera que contribuya al mejor diseño de políticas de adaptación a la variabilidad y el cambio climático en la ganadería uruguaya, con énfasis en la comprensión de la significación de los déficits hídricos edáficos.

La ganadería ha sido históricamente la actividad productiva dominante en la economía uruguaya. Esta afirmación está respaldada por diferentes estudios e investigaciones de diversos campos del conocimiento así como por la propia historia económica del país (Sala de Turón *et al*, 1967; Moraes, 2008). Desde el punto de vista de la producción primaria, la actividad ganadera (considerando como tal a la ganadería de carne, de leche y la ovina) se constituye en el principal ingreso para el 65 % de las explotaciones agropecuarias del país y ocupa el 76 % de la superficie explotada. Si se observa solo la ganadería vacuna de carne, ésta es el principal ingreso del 49% de las explotaciones y ocupa más del 65% de la superficie explotada. (Censo General Agropecuario 2011. DIEA-MGAP).

Por su parte casi el 75 % de las explotaciones de ganadería extensiva (vacunos de carne y ovinos) tienen menos de 500 hectáreas de superficie, por lo que la importancia de la actividad ganadera no solo es económica sino también social (Censo General Agropecuario 2011. DIEA-MGAP).

En Uruguay la cría vacuna basa su producción y competitividad en la utilización del campo natural (Soca *et al.*, 2007) y existen evidencias del impacto de la variabilidad climática y los eventos extremos en la ganadería uruguaya (Giménez *et al* 2008; Giménez *et al* 2009, SNRCC 2009; Duran 2010). Estos se expresan en particular en la disponibilidad de forraje, en la capacidad de carga animal, y en la performance productiva y reproductiva de los rodeos. Desde el punto de vista socio-económico, esto tiene múltiples consecuencias sobre la sustentabilidad de las explotaciones y en particular de las más pequeñas.

El evento climático que incide más intensamente en la ganadería es el déficit hídrico edáfico (lo que comúnmente se llama "sequía"). En la última década las sequías de 2005/2006, 2008/2009 y 2010/2011 provocaron impactos negativos muy relevantes tanto a nivel predial, como sectorial y de la economía en su conjunto. Por ejemplo, la tasa de preñez a nivel nacional fue impactada muy negativamente, la tasa de mortalidad se elevó sustancialmente y se perdieron praderas plurianuales y cultivos forrajeros anuales. Ello tiene consecuencias a nivel de toda la cadena cárnica, que fueron estimadas por Paolino *et al.* (2010,) en el entorno de 342 millones de dólares en forma directa y 1026 millones de dólares en forma indirecta, totalizando 1.368 millones de dólares.

Un estudio realizado por el Centro Interdisciplinario de Variabilidad y Cambio Climático (CIRCVC-UDELAR) para el MGAP muestra que los eventos de estrés hídrico pueden afectar la

producción de materia seca de las pasturas en porcentajes muy significativos (hasta 39% para el Basalto en 2008/09: MGAP-FAO 2013).

Por su parte, a nivel predial, una parte significativa de los ganaderos maneja cargas animales elevadas en comparación con la oferta del campo natural y asume riesgos climáticos significativos. En el pasado, mantener cargas altas era menos riesgoso desde el punto de vista de las sequías, dado que eran posibles estrategias de manejo del riesgo como la contratación de pastoreo en campos ajenos. Hoy la ganadería ha retrocedido territorialmente ante el avance de la agricultura extensiva y la forestación y enfrenta precios de la tierra y de la renta de la tierra que no hacen factible esas opciones. Por lo tanto, conocer mejor la interdependencia entre precipitación, DH, PPNA y producción secundaria que se analizarán en esta tesis se espera que ayude a sustentar mejores decisiones de manejo y gestión del riesgo climático. La vulnerabilidad climática es en realidad una función de múltiples factores, que se pueden resumir en tres: (1) exposición climática, (2) sensibilidad del sistema, y (3) capacidad adaptativa (IPCC, 2007b). Los eventos de estrés hídrico para la vegetación representan una intersección de estas tres dimensiones, en el sentido de que su aparición depende de las variables climáticas (lluvia, ETP), pero también de factores de sensibilidad como la capacidad de almacenaje de agua del suelo y el tipo de vegetación, y de la capacidad adaptativa del sistema reflejada, por ejemplo, en el uso de buenas prácticas de manejo del pastoreo o en el uso de especies más tolerantes al DH.

La variabilidad del déficit de agua en los suelos no ha sido estudiada en Uruguay, y se conoce poco la relación entre esta variabilidad y lo que ocurre a nivel ecosistémico en los sistemas productivos, tanto en el nivel de productores primarios (por ejemplo la PPNA de los pastizales naturales) como en el de consumidores primarios (índices de productividad secundaria de rodeos y majadas). Finalmente, otra razón para seleccionar el territorio bajo estudio en esta tesis fue que ha sido seleccionado por el MGAP para implementar un proyecto de adaptación a la variabilidad y el cambio climático, apoyado con recursos financieros del Fondo de Adaptación de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Los conocimientos que se generen en esta tesis pueden aplicarse en el contexto de este proyecto.

3 OBJETIVOS, JUSTIFICACIÓN Y PREGUNTAS A CONTESTAR

3.1 Objetivo general

El objetivo general de esta tesis fue estudiar las relaciones entre variabilidad interanual de la lluvia y el déficit hídrico edáfico y sus impactos sobre la productividad primaria neta aérea - PPNA- de los recursos forrajeros del campo natural y la producción secundaria ganadera.

La relación entre los niveles descritos se estudió en dos unidades de paisaje que están incluidas en dos ecozonas de Uruguay cuyo uso es mayoritariamente ganadero: la Cuesta Basáltica y las Sierras del Este (Panario 1988, Brazeiro et. al 2011). Estas unidades de paisaje comprenden un conjunto de secciones policiales que fueron seleccionadas por el referido estudio de CIEDUR, como las de mayor sensibilidad al déficit de precipitación al interior de dichas ecozonas.

3.2 Objetivos específicos

- a) Describir las series de tiempo de déficits hídricos edáficos (DH) para el período 1949 a 2010, en términos de tendencias, identificación de extremos y patrones de autocorrelación, incluyendo un análisis de correlación espacial de la precipitación.
- b) Describir las series de tiempo de la producción primaria neta aérea (estimada por la fPAR) para el período 1980 a 2010, en términos de tendencias y extremos.
- c) Analizar la correspondencia entre la dinámica del DH y la PPNA para el período 1980 a 2010
- d) Analizar la correspondencia del DH, la PPNA y la producción ganadera (carga animal) a escala interanual.
- e) Estudiar la correspondencia de los patrones de autocorrelación espacial del DH, la PPNA y la carga animal.

3.3 Preguntas a contestar

Esta tesis se propuso responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué tendencias han seguido las precipitaciones y los períodos de déficit de hídrico edáfico a escala estacional en Uruguay en el pasado reciente (62 años de datos registrales) ¿Han aumentado la severidad, la extensión y la frecuencia de eventos extremos?

- ¿Qué tendencias ha seguido la PPNA del pastizal (estimada por la fPAR) en la ecoregiones seleccionadas en el pasado reciente (1980-2010) ¿Ha aumentado la severidad y la frecuencia de eventos extremos de mínima?

- ¿Qué relaciones espaciales se establecen entre los fenómenos de déficit hídrico edáfico extremo en el territorio?
- ¿Qué relaciones se establecen entre la lluvia, los déficit hídricos y la PPNA del pastizal?
- ¿Existen efectos inerciales y retardados en las relaciones entre las variables en los agroecosistemas?
- ¿La variabilidad de la PPNA es amplificada o amortiguada a nivel de la productividad de la ganadería de carne vacuna uruguaya?

4 MATERIALES Y MÉTODOS

La siguiente sección describe las principales fuentes de datos utilizados y presenta los métodos empleados para el análisis de la información.

4.1 Datos

La información de precipitaciones se obtuvo del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET). Comprende información sobre precipitación acumulada mensual para el período 1948-2010, de 25 estaciones meteorológicas sinópticas distribuidas por todo el país (Tabla 1 y Mapa 5).

La distribución de estaciones meteorológicas sinópticas resultó insuficiente para realizar los balances hídricos y estimar los DH en todas las SP seleccionadas en este estudio. Para completar la cobertura se solicitó al INUMET información complementaria de pluviómetros evaluados como confiables por este Instituto, ubicados en las SP del estudio.

La tabla 2 muestra las estaciones sinópticas y los pluviómetros del INUMET utilizados para cubrir las 30 SP del estudio y calcular los balances hídricos. Como se observa, los datos disponibles para una serie larga desde 1948 no cubren varias de las secciones policiales, por lo que se debió recurrir a estaciones sinópticas cercanas hasta 1979. En cambio para el período 1980 – 2010 fue posible utilizar datos de precipitación de cada sección policial.

Los valores de capacidad de almacenaje de agua en el suelo para los balances hídricos se tomaron del estudio realizado por Molfino (2009) para cada unidad de suelos CONEAT en las SP objeto de estudio. La información de existencias ganaderas procede de declaraciones juradas a DICOSE (MGAP) y cubre el período 1991 - 2010. Las variables seleccionadas son: existencias vacunas y ovinas por SP y por categoría al 30 de junio de cada año.

Las existencias vacunas y ovinas por categoría y por año se convirtieron en Unidades Ganaderas (UG) a efectos de poder sumar especies y categorías y obtener indicadores de carga animal por unidad de superficie (hectárea). Los factores utilizados para calcular las UG son los utilizados por el Instituto Plan Agropecuario en el caso de los vacunos, y toman como base que una UG equivale a una vaca de cría de 380 kg de peso. Para los ovinos se utilizan los nuevos valores acordados en 2012 entre el Secretariado Uruguayo de la Lana (SUL), FUCREA, INIA, MGAP, Facultad de Agronomía, Facultad de Veterinaria y el Instituto Plan Agropecuario. Los factores de conversión se describen en la tabla 3.

Tabla 1 Nombre, tipo y ubicación de las 25 estaciones utilizadas				
Nombre	Tipo	Latitud	Longitud W	Altitud (m)
1. Bella Unión	Agrometeorológica	30,27	57,58	53
2. Artigas	Met. Principal	30,40	56,51	125
3. Salto	Met. Principal	31,40	57,97	46
4. Paysandú	Met. Principal	32,35	58,04	60
5. Paso de los Toros	Met. Principal	32,80	56,53	78
6. Mercedes	Met. Principal	33,25	58,07	18
7. Colonia	Met. Principal	34,46	57,84	23
8. Treinta y Tres	Met. Principal	33,22	54,39	40
9. Rocha	Met. Principal	34,49	54,31	21
10. Rivera	Met. Principal	30,90	55,54	242
11. Young	Agrometeorológica	32,68	57,63	80
12. Baltasar Brum	Pluviométrica	30,73	57,32	147
13. Queguay Chico	Pluviométrica	32,07	56,87	200
14. Vichadero	Pluviométrica	31,80	54,72	190
15. Minas de Corrales	Pluviométrica	31,60	55,47	170
16. Nueva Palmira	Pluviométrica	33,88	58,38	10
17. La Estanzuela	Agrometeorológica	34,23	57,42	80
18. Palmita	Pluviométrica	33,52	57,80	90
19. Punta del Este	Met. Principal	34,97	54,95	16
20. Cerro Colorado	Pluviométrica	33,88	55,53	220
21. Chuy	Pluviométrica	33,70	53,39	10
22. Trinidad	Pluv, luego ppal.	33,53	56,88	105
23. Florida	Pluv., luego ppal.	34,30	56,24	90
24. Cebollatí	Pluviométrica	33,30	53,82	20
25. Libertad	Agromet luego pluv	34,68	56,53	

Fuente: Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET)

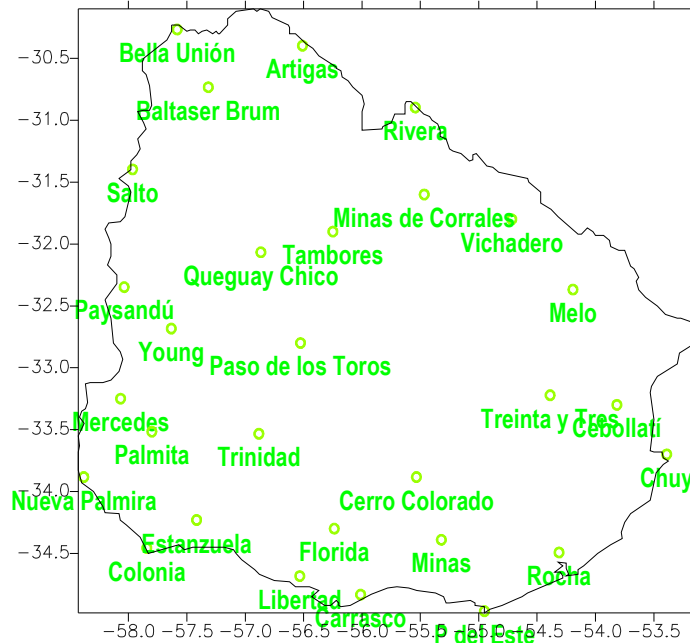


Figura 5. Mapa de estaciones meteorológicas. Fuente INUMET

Para estimar la PPNA se recurrió a datos de fPAR obtenidos de la base de datos MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, <http://modis-land.gsfc.nasa.gov7>) generada en base a los registros del satélite EOS Terra, la que provee datos espectrales desde el año 2000 y posee una resolución espacial de 5 ha y una resolución temporal de 16 días. La base de datos del proyecto LTDR (Land Long Term Data Record, <http://ltdr.nascom.nasa.gov/cgi-bin/ltdr/ltdrPage.cgi>) es derivada de los sensores AVHRR (advanced very high resolution radiometer) de NOAA y posee una resolución espacial de 2500 ha, y cubre el período 1981-1999 con una resolución temporal diaria.

Tabla 2. Estaciones meteorológicas y pluviómetros del INUMET utilizados para los balances hídricos 1948 – 2010 y 1980 - 2010

Departamento	Sección Policial	Estación meteorológica	Pluviómetros desde 1980
Artigas	03	Artigas hasta 2010	-
	04	Artigas hasta 1979	Bernabé Rivera
	05	Baltasar Brum hasta 1979	Paso Farías
	09	Baltasar Brum hasta 1979	Promedio de Paso Campamento y Sequeira
	10	Artigas hasta 1979	Paso Campamento
	11	Artigas hasta 1979	Rincón de Pacheco
	12	Artigas hasta 2010	-
Salto	10	Salto hasta 1979	Colonia Lavalleja
	11	Rivera hasta 1979	Sarandí de Arapey
	12	Rivera hasta 1979	Quintana
	13	Salto hasta 1979	Vera
	14	Salto hasta 1979	Paso Potrero
	15	Salto hasta 1979	Pueblo Biassini
	16	Salto hasta 1979	Laureles
Paysandú	09	Paysandú hasta 1980	Queguay Chico
Tacuarembó	06	Minas de Corrales	Promedio de Luján, Tambores y Valle Edén
	13	Minas de Corrales	Promedio de Luján, Tambores y Valle Edén
Lavalleja	03	Treinta y Tres hasta 1979 y Minas desde 1980	-
	05	Cerro Colorado hasta 1979	Barriga Negra
	06	Treinta y Tres hasta 1979	Barriga Negra
	07	Treinta y Tres hasta 1979	Marmarajá
	08	Treinta y Tres hasta 1979	Mariscal
	14	Treinta y Tres hasta 1979 y Minas desde 1980	-
Rocha	02	Chuy hasta 2010	-
	04	Chuy hasta 2010	-
	08	Rocha hasta 2010	-
	10	Rocha hasta 1979	Velázquez
	12	Rocha hasta 2010	-
Maldonado	04	Treinta y Tres hasta 1979 y Minas desde 1980	-
	08	Treinta y Tres hasta 1979	Aiguá

Tabla 3. Factores de conversión para equivalencia en UG de especies y categorías

Espece	Categoría	Factor de conversión
Vacunos	Toros	1,2
	Vacas de cría encarneradas	1
	Vacas de invernada	1
	Novillos de + 3 años	1
	Novillos de 2 a 3 años	0,8
	Novillos de 1 a 2 años	0,7
	Vaquillonas de 2 a 3 años	0,8
	Vaquillonas de 1 a 2 años	0,65
	Terneros/as	0,4
	Ovinos	Carneros
Ovejas de cría encarneradas		0,15
Ovejas de descarte		0,12
Borregas 2 a 4 dientes sin encarnerar		0,14
Borregas diente de leche		0,1
Borregos diente de leche		0,1
Corderos/as		0,1

Fuente: IPA y SUL

4.2 Análisis

En la presente tesis se estudian las relaciones entre la variabilidad de la lluvia, el déficit hídrico (DH) y la de descriptores de la productividad los niveles tróficos primario y secundario para un conjunto de secciones policiales comprendidas en dos ecozonas particularmente sensibles al déficit de precipitación: la Cuesta Basáltica (4.059.000 ha) y las Sierras del Este (2.394.000 ha) (Brazeiro *et. al*, 2010). Ambas ecozonas seleccionadas sumadas representan prácticamente el 50% de la superficie de ganadería extensiva del país. La sensibilidad de estas zonas se basa principalmente en el predominio de suelos Superficiales en la primera de las dos ecozonas y en el predominio de suelos Superficiales y medianamente Superficiales de texturas gruesas en el caso de la segunda. Las figuras 1 y 2 presentan las dos ecozonas y sus características de profundidad y textura. Estos suelos tienen una baja capacidad de almacenaje de agua por lo que sus balances hídricos tienen facilidad

para transformarse en deficitarios, resultando muy sensibles al comportamiento de la lluvia y la ETP. Ambas ecozonas incluyen del orden de 15.500 ganaderos familiares (DICOSE-MGAP 2010), lo que refleja su significación socio-económica.

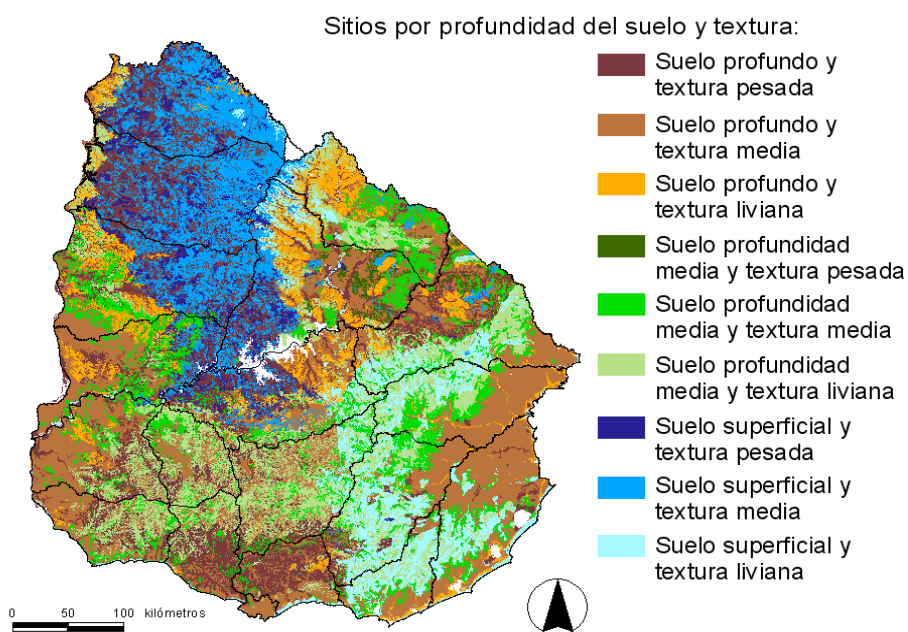


Figura 1. Clasificación de sitios por combinación de profundidad y textura (CIEDUR, Panario y Gutiérrez, 2011)

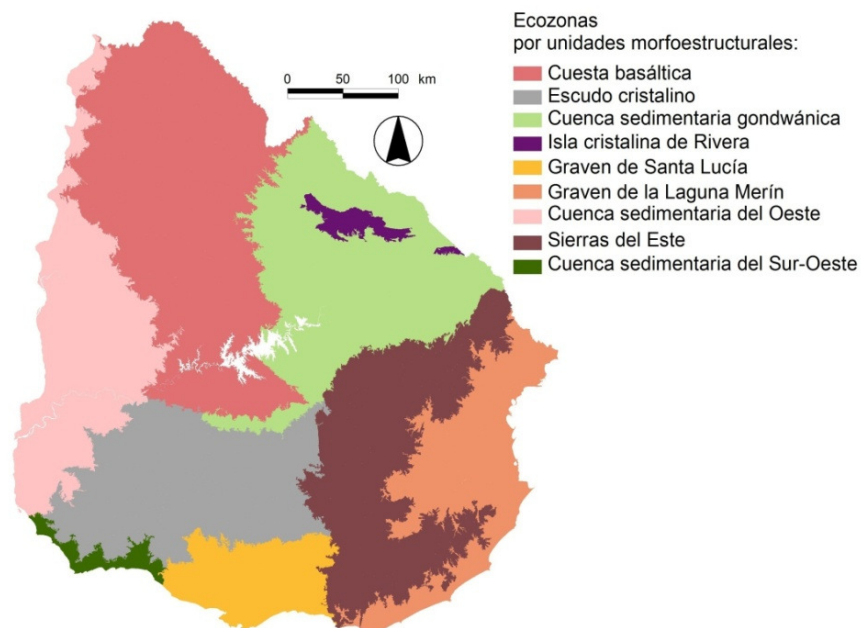


Figura 2. Ecozonas del Uruguay (CIEDUR, Panario y Gutierrez, 2011)

Dentro de estas dos ecozonas se seleccionaron dos unidades de paisaje, o ecoregiones, que incluyen los suelos más Superficiales de estas dos ecozonas y tienen a la vez una mayor abundancia relativa de productores familiares. Las unidades de paisaje fueron definidas por Panario y Gutiérrez (2011) para un proyecto del MGAP con el Fondo de Adaptación, como las más vulnerables del país para la ganadería extensiva, desde un punto de vista climático y socioeconómico. Estas dos unidades comprenden 38 secciones policiales (SP). De este grupo de SP se excluyeron aquellas con más de 40% de píxeles con más de 50% de cobertura forestal en 2011 y 2012, para minimizar el impacto distorsivo de las plantaciones forestales sobre el comportamiento espectral de la superficie. Por este motivo, en Sierras del Este se eliminó la SP 09 de Maldonado y en el Basalto Superficial se eliminaron las SP 13 de Rivera y 10 y 12 de Tacuarembó. Otras cuatro SP se eliminaron por ser urbanas o presentar mucha proporción de agua (SP 01 y 02 de Artigas, SP 01 de Lavalleja y SP 01 de Rocha). Quedó finalmente un conjunto de 30 SP: 17 en el Norte y 13 en Sierras del Este (Figuras 3 y 4).

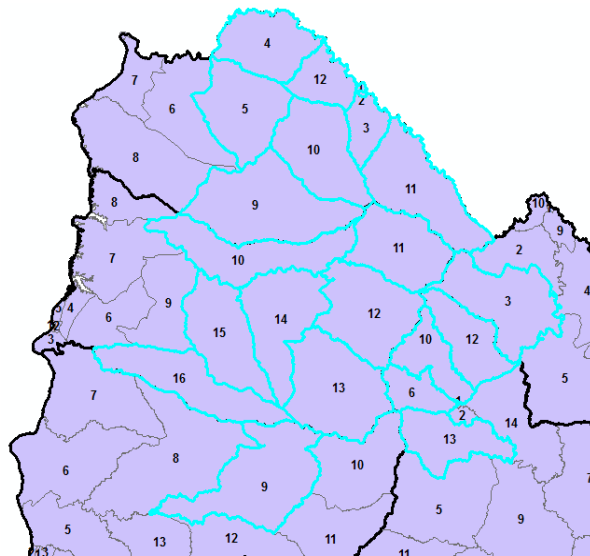


Figura 3. Secciones policiales seleccionadas en el Basalto Superficial. Fuente: elaboración propia

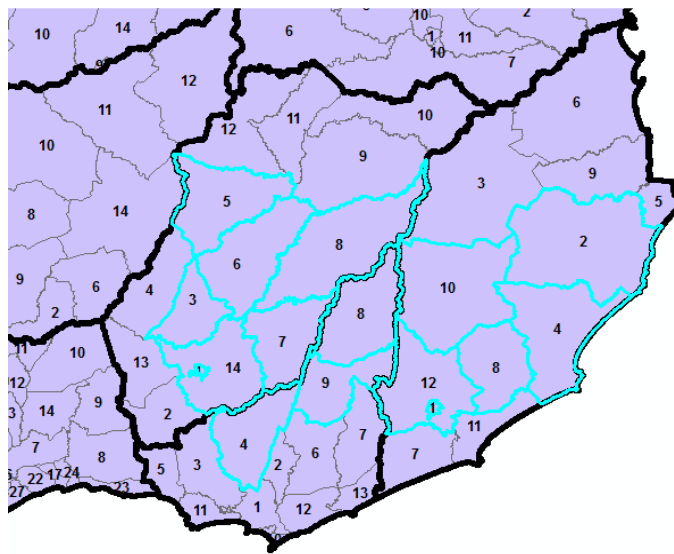


Figura 4. Secciones policiales seleccionadas en las Sierras del Este. Fuente: elaboración propia.

Para las variables lluvia, DH, fPAR (fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida) y existencias ganaderas se analizaron las distribuciones de frecuencias, los eventos típicos (media/mediana) y las tendencias (mediante regresión por cuantiles) para la mediana y percentiles extremos. Asimismo se efectuó el análisis de autocorrelación temporal y espacial (correlogramas). Finalmente se realizaron análisis de variabilidad relativa (CV) de DH, fPAR y existencias.

En el caso de la lluvia se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para identificar comportamientos similares entre 24 estaciones meteorológicas que permitiera simplificar los análisis gráficos a un conjunto representativo de estaciones.

Para determinar los déficit hídricos (DH) se calcularon balances hídricos en base al método de Thorntwaite-Mather (Thorntwaite et al, 1955;1957; Steenhuis et al, 1986), utilizando: precipitación (P); evapotranspiración potencial (ETP) climática y capacidad de retención de agua del suelo. Los déficits en mm se estimaron como la diferencia entre la ETP, la precipitación y el agua almacenada en el suelo. Se calculó el cambio de almacenaje considerando que la conductividad hidráulica del suelo es una función que declina exponencialmente. O sea que se calculó el **cambio de almacenaje** mediante la aplicación de un modelo logarítmico que considera la retención del agua por parte del suelo. Para el cálculo se utilizó la herramienta "T-M_model on line" elaborada por Vishal K. Mehta (Arghyam Trust/Cornell University en colaboración con Dr. M. Todd Walter (Cornell University) and Dr. Stephen D. DeGloria (Cornell University), Noviembre 2006 (<http://www.indiawaterportal.org/node/1043>)). El modelo considera que el agua se almacena en el suelo hasta que el contenido de agua en el suelo excede la capacidad de agua disponible. Determinar el balance de agua en el suelo requiere trazar la pérdida acumulada de agua potencial y la cantidad de agua en el suelo. Se calcularon los siguientes parámetros del modelo, a paso mensual:

AWC = Capacidad potencial de agua disponible (agua a Capacidad de campo CC menos agua en el punto de marchitez permanente PMP, para una determinada profundidad de suelo)

SW = Agua disponible en el suelo (por ejemplo sobre el PMP)

APWL = Pérdida acumulada de agua potencial (negativo)

ΔP = Precipitación neta; $P - ETP$

P = Precipitación

ETP = Evapotranspiración potencial

ETR = Evapotranspiración real

En función del porcentaje de cada unidad de suelo CONEAT por sección policial se calculó la capacidad de almacenaje agregada como promedio ponderado de las capacidades de almacenaje de cada unidad. Se analizó el comportamiento del DH, en mm, para la serie de tiempo 1949 a 2010. A diferencia del análisis de la lluvia, que se hizo desde 1948, para el DH se partió desde 1949 para asegurar que el DH de enero de 1949 está sustentado en balances hídricos no deficitarios en los meses del invierno anterior.

A partir de las salidas del modelo se calculó el cociente **ETR/ETP**. Valores de ETR/ETP cercanos a 1.0 indican que la vegetación se encuentra en valores de transpiración cercanos a la demanda potencial. Por el contrario valores de ETR/ETP cercanos a 0 indican que la

vegetación se encuentra en valores de transpiración muy por debajo de la demanda potencial, indicando que climatológicamente la vegetación se encuentra bajo estrés hídrico. La relación ETR/ETP puede considerarse un indicador de cierre estomático y se ha demostrado que correlaciona con la producción de materia seca de una comunidad vegetal (Robelin, 1967). La selección de un valor umbral a paso mensual permite discriminar razonablemente qué meses de la serie de tiempo bajo estudio representaron estrés hídrico para el pastizal natural. Por su parte, una secuencia de meses consecutivos por debajo de dicho umbral configuraría una situación de estrés hídrico prolongado.

Definir un valor para la humedad crítica o para ETR/ETP es difícil porque este concepto depende de diversos factores, como el tipo de vegetación y su capacidad para explorar el perfil del suelo. El valor de ETR/ETP que se usa en esta tesis se relaciona con Índice de Estrés de los Cultivos (CWSI). Cuando las plantas están en estrés hídrico se produce cierre estomático, el cual interrumpe la disipación de energía y produce un aumento en la temperatura de las hojas comparado con la temperatura del aire (Jackson e Idso, 1981). Partiendo del mecanismo del CWSI definido por Jackson e Idso, Zhiqiang Gao et al (2010) definen el Índice Regional de Estrés Hídrico (RWSI) como $1 - \text{ETR/ETP}$ y derivan rangos de valores para sequías de diverso grado de intensidad. Así, por ejemplo, definen el inicio de situaciones de sequía para valores de RWSI mayores a 0,612, que equivalen a ETR/ETP de 0,388. El umbral de 0,5 adoptado en esta tesis refleja, por lo tanto condiciones de estrés hídrico. INIA GRAS, por su parte establece como valores críticos de ETR/ETP, 0,4-0,5 para cultivos extensivos y 0,3-0,4 para pasturas sembradas. En base a estos datos se consideró que para un campo natural los valores inferiores a 0,5 eran susceptibles de reflejar estrés para las plantas. Valores de umbral más elevados a 0,5, como el valor de 0,7 utilizado por Facultad de Agronomía de Uruguay no parecen tener una justificación. Futuras investigaciones podrían explorar en cambio valores de umbral aun más restrictivos, como 0,3.

Por otra parte se tomó la definición de que tres o más meses consecutivos con valores de ETR/ETP por debajo de 0,5, constituyen un evento de estrés hídrico prolongado severo para la vegetación, asimilable a lo que se puede considerar una sequía. Una “sequía”, como se la considera en esta tesis es más que un evento de estrés puntual, implica permanencia del fenómeno en el tiempo. La selección de una ventana temporal, en este caso 3 o más meses, obedeció a que se quería identificar períodos prolongados en los que, en condiciones de pastizales con ganadería, los mecanismos de amortiguamiento de los impactos en la oferta de forraje no evitan efectos significativos de la disminución de la disponibilidad hídrica sobre el sistema productivo. Para respaldar esta opción por el período de tres o más meses se encontró que los estudios de sequías en base al Índice de Precipitación Estandarizado (IPE) se realizan habitualmente para períodos de 3, 6 o 12 meses, lo que se conoce como IPE3, IPE6 e IPE12. Como ejemplos se pueden mencionar los estudios del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos de la Universidad de Buenos Aires (Peñalba 2012 Citar) y los estudios de Coronel y Sacchi (2006). Para estos períodos prolongados es posible visualizar además la intensidad de estos eventos en términos de valores de ETR/ETP, que cuando más próximos a 0 indican mayor severidad. Se analizan en esta investigación dos aspectos: los meses con $\text{ETR/ETP} \leq 0,5$ por separado, y los períodos consecutivos de 3 y más meses de $\text{ETR/ETP} \leq 0,5$.

Utilizando el índice ETR/ETP se analizaron seis aspectos relacionados con la magnitud de los eventos con ETR/ETP menor a 0,5 en las dos unidades de paisaje estudiadas:

- (a) Frecuencia.
- (b) Extensión geográfica, medida como número de SP con 3 o más meses con ETR/ETP menor a 0,5.
- (c) Mes de inicio.
- (d) Duración, medida como número de meses con ETR/ETP menor a 0,5.
- (e) Intensidad, medida a través de variables como el DH promedio y la ETP/ETR promedio de los meses con ETR/ETP menor a 0,5 versus todos los valores mensuales del período 1949-2010.
- (f) Recurrencia, medida como el tiempo promedio de repetición del evento, en años.

Para estimar la PPNA se usó como indicador la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel (fPAR) (Sellers et al. 1992). En 1972 Monteith estableció un modelo ecofisiológico robusto que establece que la PPNA de una cubierta vegetal es proporcional a la radiación fotosintéticamente activa incidente (PAR, por sus siglas en inglés), la fracción de esta radiación que es absorbida (fPAR) y la eficiencia de conversión de la energía en biomasa (EUR). Pese a la incertidumbres relacionadas con la EUR, la fPAR interceptada por la canopia es un estimador confiable de la productividad primaria, y los modelos teóricos han sido respaldados por datos de la relación entre el IVN derivado de sensores de la NOAA y la fPAR interceptada (Paruelo et al., 2004). De esta manera, la fPAR es un importante parámetro para estimar la productividad de biomasa vegetal de un ecosistema (Piñeiro et al. 2006). La fPAR se puede medir a nivel de terreno o puede ser inferida utilizando sensores instalados en satélites a partir de índices espectrales, como el índice de vegetación normalizado (IVN). En esta tesis se usan los valores satelitales.

El índice de vegetación normalizado (IVN) se define como relaciones entre radiación infrarroja y roja $(IR - R)/(IR + R)$. Los valores de IVN, que varían entre -1 y 1, son un estimador lineal de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (fPAR) (Paruelo, 2008). En esta tesis se utilizó la variable fPAR, que correlaciona casi linealmente con el IVN y con el Índice de Área Foliar (IAF). Para la información de fPAR se utilizaron series de tiempo correspondientes al período 1980-2010, combinando información de dos bases de datos satelitales con diferentes características: LTDR versión II (1981-1999) y MODIS (2000-2010).

Los análisis de eventos típicos se hicieron mediante estadísticos usuales como la media y la mediana. La dispersión se caracterizó por el desvío estándar y la variación en torno a la media por el coeficiente de variación CV y los eventos extremos se estudiaron a través del percentil 90 de la distribución.

Se investigó la tendencia de la mediana y los eventos extremos de máximo DH y mínima fPAR utilizando la técnica de regresión por cuantiles y se determinó la significación estadística de las tendencias observadas. La técnica de regresión por cuantiles modela el efecto de una

variable “x” sobre toda la distribución de una variable “y”. En el caso presente “x” representa la serie de tiempo de DH mensual desde 1949 a 2010 para 17 SP de Basalto Superficial y 13 SP de Sierras del Este, e “y” representa el DH. En el caso de fPAR la serie de tiempo considerada corresponde al período agosto de 1980 a diciembre de 2010.

Las existencias ganaderas se analizaron como un indicador de la producción secundaria de los ecosistemas de pastizal. Se asumió que las fluctuaciones en las existencias son el resultado de cambios en la productividad secundaria de los rodeos vacunos. Se calculó la carga animal como unidades ganaderas por hectárea (UG/ha bovinas y ovinas), ya que el número absoluto de cabezas no incorpora la diferencias en requerimientos nutricionales de distintas especies y categorías, y el número absoluto de UG está afectado por el tamaño de las SP.

5.1 Series de precipitación

El estudio de déficit hídrico edáfico se inició con un análisis de la precipitación, por considerarlo un factor explicativo principal de la variabilidad en el DH edáfico. La Tabla 4 presenta los valores de la mediana, la media, el desvío estándar, el coeficiente de variación y el percentil 10 de las precipitaciones acumuladas mensuales para cada estación meteorológica incluida en el estudio, en el período 1948 a 2010. Se pueden observar diferencias importantes en la mediana de la precipitación, la cual es más elevada en el norte que en el sur del país. Por ejemplo, la mediana de Artigas es 39% mayor que la de Colonia. Asimismo, se observa que la mediana, que es un mejor indicador de tendencia central que la media en distribuciones asimétricas como las de la lluvia, está en todos los casos alrededor de un 20% por debajo de la media. Los coeficientes de variación de la precipitación a paso mensual para el período considerado son elevados y se ubican en un rango de 69% a 83%, sin que se perciba un patrón espacial diferenciado claro. El valor del percentil 90 está un orden de magnitud (10 veces) por encima del valor del percentil 10, reflejando la amplitud del rango de valores de los extremos en la distribución de la precipitación mensual. Por su parte, el percentil 10 es aproximadamente la cuarta parte de la mediana pero el percentil 90 es solo el doble de la mediana. Esto sugiere que los déficits en relación a la mediana, por la propia asimetría de la función de distribución son más severos que los excesos.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos de la lluvia acumulada mensual (1948 - 2010)

Estación meteorológica	Mediana (mm)	Media (mm)	Devío estándar	CV	Percentil 10	Percentil 90
Bella Unión	95	115	86,2	75%	25	239
Artigas	102	121	89,6	74%	28	242
Baltasar Brum	100	123	102,0	83%	27	257
Salto	88	109	86,6	80%	26	222
Queguay Chico	81	98	77,0	78%	18	197
Paysandú	84	102	79,2	78%	23	202
Young	82	104	85,2	82%	21	208
Mercedes	80	97	77,1	80%	20	193
Nueva Palmira	77	93	75,0	81%	20	188
Palmitas	80	96	78,8	82%	21	196
Colonia	74	92	71,7	78%	24	180
Estanzuela	76	93	72,0	77%	24	179
Libertad	75	91	68,2	75%	22	179
Trinidad	87	103	79,8	77%	24	202
Florida	82	98	74,4	76%	23	184
Cerro Colorado	82	99	73,7	75%	22	191
P. de los Toros	86	105	79,6	76%	24	212
M. de Corrales	94	115	85,9	74%	31	225
Rivera	112	133	97,2	73%	31	262
Vichadero	99	116	80,2	69%	30	224
Treinta yTres	90	110	80,7	73%	27	219
Cebollatí	89	104	78,2	75%	22	206
Rocha	84	97	66,5	69%	29	184
Chuy	78	92	68,8	75%	21	181
Melo	92	107	74,3	70%	25	204

Fuente: elaboración propia

Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre pares de 25 estaciones meteorológicas. El principal hallazgo es que todos los valores resultaron estadísticamente significativos, y de mayor magnitud absoluta entre estaciones cercanas que entre estaciones lejanas.

Para analizar la tendencia de las precipitaciones, se comenzó por tomar los totales anuales para el período 1948 a 2010. Se efectuaron análisis de regresión lineal y se estudió la significación estadística de la pendiente. Los resultados se muestran en la tabla 5.

Por otro lado se analizó la tendencia de la precipitación acumulada de la primavera (setiembre-octubre-noviembre), que es una estación del año relevante desde el punto de vista del aporte al crecimiento de forraje anual en el campo natural del país. En base a un Análisis de Componentes Principales (ACP) se agruparon las estaciones meteorológicas en tres regiones y se redujo el análisis de tendencias a un subconjunto de estaciones

espacialmente representativo:

- Norte: Baltasar Brum y Vichadero
- Litoral Centro y Centro: Young y Paso de los Toros
- Suroeste y sureste: La Estanzuela y Rocha

Se aplicó un modelo de regresión lineal para la lluvia acumulada de primavera en estas seis estaciones y el tiempo (años), para la serie 1948 a 2010. La Tabla 5 presenta los valores de la pendiente de la recta "b", los valores de r de Pearson y R^2 y la significación de la pendiente, tomando todas las estaciones meteorológicas disponibles para la lluvia anual y el acumulado de primavera.

Tabla 5. Correlación de Pearson, R^2 , pendiente de la recta estandarizada y significación de la pendiente al 5%, de la lluvia acumulada (en mm) anual y de primavera (setiembre a noviembre) por estación meteorológica y el tiempo (1948 a 2010).

Estación meteorológica	r	R^2 (%)	b (estandarizado)	p-valor	Sig
Acumulado anual					
Bella Unión	0,026	5,1	0,11	0,083	
Baltasar Brum	0,430	18,6	0,431	0,001	*
Salto	0,193	3,7	0,193	0,14	
Paysandú	0,188	3,6	0,188	0,149	
Young	0,213	4,5	0,213	0,102	
Mercedes	0,176	3,1	0,176	0,177	
Nueva Palmira	0,318	10,1	0,318	0,013	*
Palmitas	0,232	5,4	0,232	0,075	
Colonia	0,114	1,3	0,114	0,386	
La Estanzuela	0,064	0,4	0,064	0,628	
Libertad	0,084	0,7	0,084	0,524	
Trinidad	0,142	2	0,142	0,279	
Florida	0,173	3,0	0,173	0,187	
Cerro Colorado	0,308	9,5	0,308	0,017	*
P. de los Toros	0,258	6,6	0,258	0,047	*
M. de Corrales	0,11	1,2	0,11	0,404	
Rivera	0,046	0,2	0,046	0,728	
Vichadero	0,235	5,5	0,235	0,07	
Treinta y Tres	0,343	11,8	0,343	0,007	*
Cebollatí	0,224	5	0,224	0,086	
Rocha	0,373	13,9	0,373	0,003	*
Chuy	0,239	5,7	0,239	0,066	
Melo	0,335	11,2	0,335	0,01	
Carrasco	0,339	11,5	0,339	0,008	*
Acumulado de primavera					
Baltasar Brum	0,315	9,9	0,315	0,0012	*
Vichadero	0,120	1,4	0,119	0,335	
Paso de los Toros	0,161	2,6	0,161	0,207	
Young	0,096	0,9	0,096	0,455	
La Estanzuela	0,070	0,7	0,089	0,511	
Rocha	0,100	1,1	0,104	0,416	

Fuente: elaboración propia

Los valores de “r” son todos positivos y en la mayoría de las 24 estaciones meteorológicas son cercanos a 0. En solo siete estaciones los valores de “r” son mayores a 0,3, con un máximo en Baltasar Brum donde llega a 0,4. La pendiente “b” es positiva en todos los casos, pero resulta significativa ($p < 0,05$) solo en siete de las 24 estaciones meteorológicas, distribuidas geográficamente en diferentes zonas del país. En 17 estaciones meteorológicas, no hay elementos para descartar la hipótesis nula $H_0: \beta = 0$. Es decir, la relación (débil) positiva entre la serie temporal y la lluvia acumulada anual puede ser atribuida al azar en 17

de las 24 estaciones meteorológicas analizadas. En el caso de la lluvia acumulada de primavera, la herramienta de análisis de tendencia no identificó tendencias positivas con significación estadística, salvo en Baltasar Brum.

Los bajos valores de R^2 indican que la variabilidad interanual de la lluvia, tanto acumulada anual como acumulada de primavera, predomina fuertemente sobre la variabilidad de largo plazo o tendencia. Por su parte, la correlación de la lluvia acumulada de primavera entre las seis estaciones meteorológicas, tomadas de a pares, es positiva y es estadísticamente significativa al 1%, a dos colas (Tabla 6).

Tabla 6. Matriz de correlación de la lluvia acumulada de primavera en seis estaciones meteorológicas

Estación	Baltasar Brum	Vichadero	Paso de los Toros	Young	La Estanzuela	Rocha
Baltasar Brum	1	0,735 **	0,628 **	0,573 **	0,484 **	0,326 **
Vichadero		1	0,607 **	0,547 **	0,456 **	0,421 **
Paso de los Toros			1	0,851 **	0,498 **	0,495 **
Young				1	0,523 **	0,486 **
La Estanzuela					1	0,725 **
Rocha						1

** Significativo al 0,01 (a dos colas)

Fuente: elaboración propia

El coeficiente de variación (CV) para los registros de lluvia acumulada mensual de cada estación en toda la serie de tiempo y en dos períodos: 1948 a 1979 (32 años) y 1980 a 2010 (31 años) se muestra en la Tabla 7. Se encontró que en la mayoría de las estaciones (20 sobre 25) el CV es menor en el sub-período más reciente que en el más lejano. La Tabla permite observar también un aumento importante de la mediana en la mayoría de las estaciones, con crecimientos de 20% o más en siete estaciones. El cambio más fuerte se observa en Rocha (42,6%). Baltasar Brum, Melo, Florida, Cerro Colorado, Paso de los Toros y Melo superan el 20% de aumento de la mediana a paso mensual. Asimismo, es notable el aumento del valor absoluto del percentil 10 en la mayoría de las estaciones estudiadas: en 14 estaciones el aumento supera el 25 por ciento y en seis supera el 50 por ciento, indicando que los eventos extremos de mínima tendieron a ser menos perjudiciales para la vegetación en los 30 últimos años.

Tabla 7. Cambios en la mediana y el coeficiente de variación de la precipitación mensual en mm entre períodos

Estación meteorológica	Período 1948-1979			Período 1980-2010			Cambio porcentual		
	Percentil			Percentil			Δ Mediana	Δ C.V.	Δ p10
	Mediana	CV	10	Mediana	CV	10			
Bella Unión	91	75%	22	100	74%	27	10,2%	-1,3%	20,3%
Artigas	104	70%	31	101	77%	27	-2,4%	9,8%	-12,8%
Baltasar Brum	88	80%	24	107	83%	30	22,3%	4,2%	25,0%
Salto	89	78%	26	88	81%	26	-0,6%	3,1%	0,4%
Queguay Chico	78	79%	18	83	77%	18	6,5%	-2,5%	2,7%
Paysandú	79	80%	23	86	76%	24	9,7%	-4,8%	4,9%
Young	80	85%	18	84	79%	25	5,2%	-6,5%	38,6%
Mercedes	74	79%	18	84	81%	21	13,4%	2,0%	16,6%
Nueva Palmira	72	83%	17	84	79%	24	17,0%	-5,3%	40,3%
Palmita	73	81%	19	87	82%	23	18,8%	1,4%	20,4%
Colonia	67	79%	19	81	77%	26	20,0%	-3,2%	32,6%
La Estanzuela	72	81%	21	80	74%	28	11,7%	-9,0%	34,7%
Libertad	67	78%	18	79	72%	25	17,5%	-8,2%	37,8%
Trinidad	78	81%	17	91	73%	28	16,2%	-10,1%	64,5%
Florida	75	81%	18	91	71%	29	20,7%	-12,2%	58,5%
Cerro Colorado	72	81%	18	91	68%	31	26,4%	-15,9%	69,7%
P de los Toros	79	81%	21	96	71%	26	21,8%	-12,7%	23,8%
M. de Corrales	92	70%	30	97	78%	31	6,0%	10,8%	2,6%
Rivera	112	78%	32	112	69%	32	0,0%	-12,1%	0,3%
Vichadero	90	70%	29	107	68%	32	19,0%	-2,8%	9,8%
Treinta y Tres	86	76%	19	94	70%	33	10,1%	-8,3%	72,7%
Cebollatí	83	76%	18	91	75%	24	10,3%	-1,9%	36,5%
Rocha	69	75%	23	98	62%	36	42,6%	-17,0%	57,5%
Chuy	71	80%	16	83	70%	25	16,9%	-12,6%	56,3%
Melo	84	72%	24	101	66%	31	20,8%	-9,0%	29,5%

Fuente: elaboración propia

Para profundizar la caracterización de posibles tendencias inter-decádicas en la variabilidad se estimó el coeficiente de variación a escala décadas para las seis estaciones seleccionadas, a dos pasos: paso mensual y paso anual. Los resultados se observan en la Tabla 8 y muestran, en primer lugar, que la variabilidad a paso mensual es mucho más alta que a paso anual, lo que puede explicarse por la compensación que dentro de un año se produce entre meses de alta y baja precipitación en los datos a paso anual. Los datos a paso mensual muestran aumentos y disminuciones sucesivas de la variabilidad, sugiriendo la posibilidad de comportamientos cíclicos y no de aumentos sostenidos en la variabilidad de la precipitación acumulada de primavera entre décadas. En los 60 años considerados, no se observa ninguna tendencia clara de cambio en la variabilidad. Cuando se observan los datos a paso anual, las conclusiones son similares, pero el hipotético comportamiento cíclico es más marcado: la variabilidad sube fuertemente en la década de 1958 a 1967 comparada con la década 1948 a 1957, cae fuertemente en la décadas 1968 a 1977 y 1978 a 1987, pega un salto fuerte en la década de 1988 a 1987 (la de mayor variabilidad del período) y vuelve a caer, aunque a niveles algo superiores a los de la década inicial.

Tabla 8. Coeficiente de variación de la lluvia a paso mensual y anual según década para seis estaciones												
Década	Baltasar Brum		Vichadero		Rocha		La Estanzuela		Paso de los		Young	
	mensual	anual	mensual	anual	mensual	anual	mensual	anual	mensual	anual	mensual	anual
1948-1957	83%	17%	72%	16%	76%	15%	92%	20%	94%	16%	89%	18%
1958-1967	79%	27%	72%	30%	73%	29%	83%	29%	80%	23%	89%	35%
1968-1977	77%	15%	65%	18%	78%	23%	68%	19%	71%	22%	75%	22%
1978-1987	73%	20%	59%	17%	58%	19%	64%	21%	72%	22%	85%	35%
1988-1997	86%	43%	72%	44%	57%	38%	76%	45%	68%	41%	77%	44%
1998-2007	76%	29%	63%	34%	64%	14%	76%	17%	66%	29%	70%	27%

Fuente: elaboración propia

Los valores de la mediana de la lluvia acumulada mensual en mm para las seis décadas en seis estaciones seleccionadas muestran distintos patrones según estación meteorológica. Baltasar Brum es la única que muestra un comportamiento sistemáticamente ascendente. La Estanzuela, en cambio crece solo en el decenio 1978 a 1987, para luego caer. Vichadero, Paso de los Toros y Rocha presentan una tendencia general ascendente en la mediana por decenio, con un descenso claro en el decenio 1998-1987, en tanto que Young muestra un comportamiento más errático (Figura 7). Futuras investigaciones podrían explorar la relación entre el comportamiento de la variabilidad de la lluvia y ciclos de 8 a 12 años encontrados en la rotación de los vientos que correlaciona fuertemente con la temperatura en la superficie del mar (SST) del Sudeste de América del Sur (Simionato, 2005).

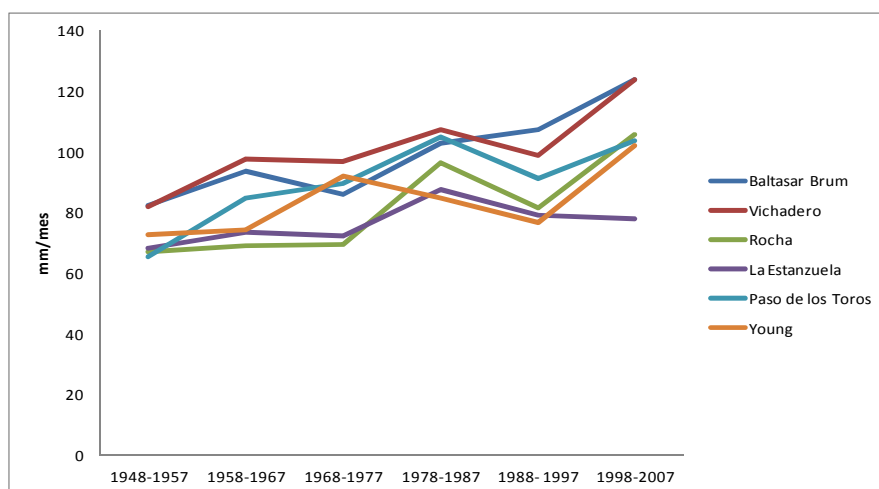


Figura 7. Evolución de la mediana de la lluvia acumulada mensual, en mm, por décadas en seis estaciones meteorológicas. Fuente: elaboración propia

Se realizaron los correlogramas para la serie de lluvia acumulada mensual del período 1948 a 2010 para 23 estaciones meteorológicas sinópticas con series de tiempo completas, para representar la función de autocorrelación. Para hacer los correlogramas se crearon matrices de correlación de la lluvia mensual para todas las estaciones tomadas de a pares y de distancia en línea recta entre estaciones, en kilómetros.

Las Figuras 8a y 8b presentan los correlogramas para los doce meses del año en la serie de tiempo analizada, y la Tabla 9 resume los valores del coeficiente angular de la recta de regresión lineal y el valor del coeficiente de correlación de Pearson.

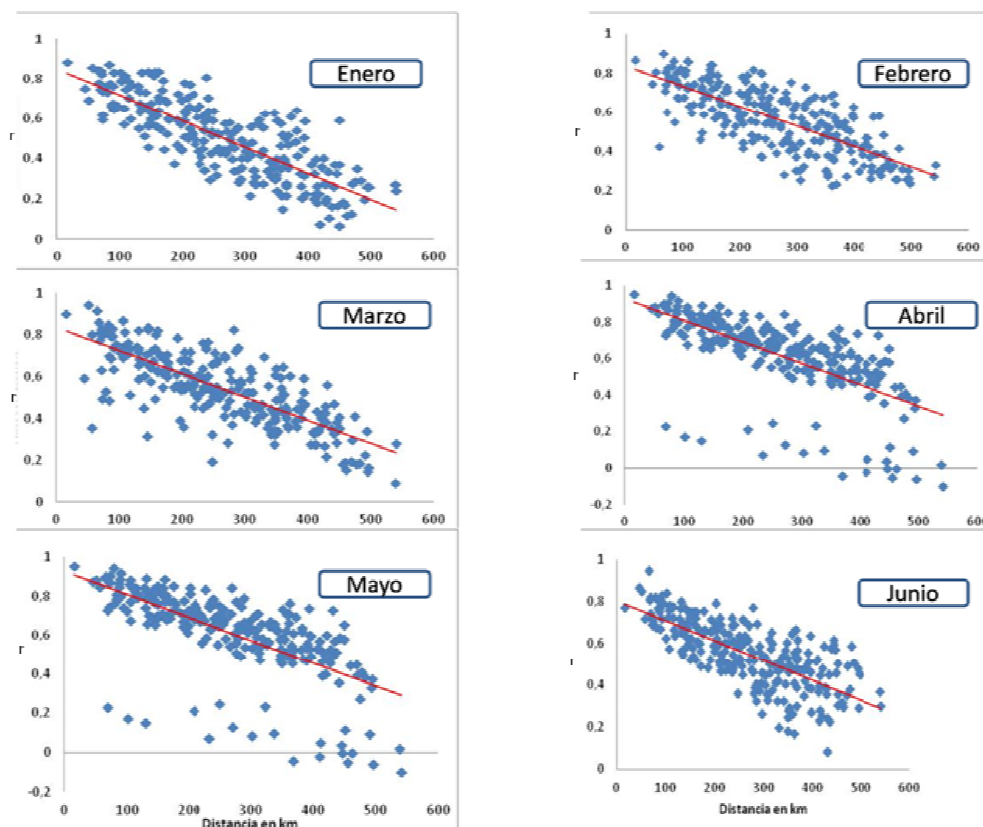


Fig 8a. Correlogramas de la lluvia acumulada mensual según distancia entre estaciones meteorológicas (enero a junio 1948-2010). Los valores de correlación se muestran en el eje de las ordenadas. Fuente: elaboración propia.

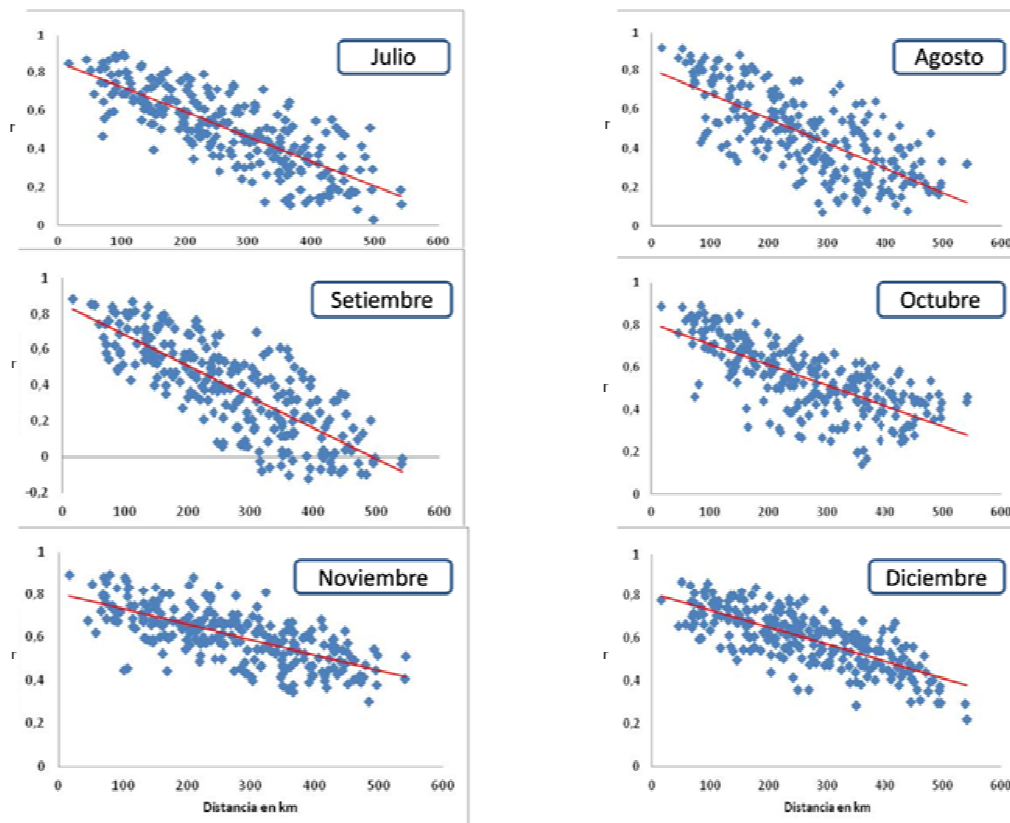


Figura 8b. Correlogramas de la lluvia acumulada mensual según distancia entre estaciones meteorológicas (julio a diciembre 1948-2010). Los valores de correlación se muestran en el eje de las ordenadas. Fuente: elaboración propia.

Todos los correlogramas muestran tendencia negativa de la correlación de la lluvia acumulada mensual entre estaciones según distancia. Asimismo, a mayor distancia entre pares de estaciones meteorológicas, menor es la correlación entre la lluvia acumulada mensual. La Tabla 9 muestra los valores de “r”, los valores de la pendiente “b” y los p-valores para “b”. Los valores de “r” son todos negativos y con un valor absoluto elevado, lo que señala que la asociación es fuerte. Los menores valores relativos de “r” se observan en abril y noviembre, y los mayores en enero, julio y marzo. Los valores de “r” se encuentran en el rango de 0,66 (abril) a 0,82 (enero). Los altos valores de “r” se traducen en valores de R^2 que también son elevados en todos los meses, con un rango de 0,44 a 0,67.

Por su parte, los p-valores indican que las pendientes son estadísticamente significativas al 1%. Valores de “b” de 0,001 indican una tasa de cambio de “r” (disminución) del orden de 0,1 puntos cada 100 km que aumenta la distancia. Simplificando, se podría decir que la correlación entre puntos separados 500 km es la mitad que la correlación de la precipitación entre sitios muy cercanos.

Tabla 9. Correlación (Pearson), coeficiente de la recta de regresión lineal "b", y significación (p-valor) para la significación de "b", para los correlogramas de lluvia acumulada mensual en mm y distancia entre estaciones meteorológicas en km (1948-2010).

Mes	r	b	p-valor
Enero	-0,82	-0,0013	0,0001
Febrero	-0,75	-0,0010	0,0001
Marzo	-0,77	-0,0011	0,0001
Abril	-0,66	-0,0012	0,0001
Mayo	-0,71	-0,0010	0,0001
Junio	-0,73	-0,0013	0,0001
Julio	-0,79	-0,0010	0,0001
Agosto	-0,73	-0,0013	0,0001
Septiembre	-0,79	-0,0017	0,0001
Octubre	-0,71	-0,0010	0,0001
Noviembre	-0,69	-0,0007	0,0001
Diciembre	-0,75	-0,0008	0,0001

Fuente: elaboración propia

5.2 Análisis del déficit hídrico edáfico

5.2.1 Análisis de eventos típicos y eventos extremos

No se observan diferencias de relieve en la media de DH mensual entre eco-regiones, pero la variabilidad en términos de CV es mayor en el Basalto Superficial (Tabla 10). Para el conjunto de los valores mensuales en el año, la mediana del DH muestra valores muy cercanos a 0 en el DH de Basalto Superficial y algo mayores en Sierras del Este. Sin embargo los valores extremos, el p90, son mayores en Basalto Superficial que en Sierras del Este. El análisis del DH debe tomar en consideración que los suelos de Basalto Superficial en las SP analizadas tienen una capacidad de almacenamiento de agua mayor que los de Sierras del Este. En promedio, esa mayor capacidad de almacenaje resulta de 35 por ciento. Sin embargo, los datos de la Tabla 10 no muestran diferencias en DH promedio.

Tabla 10. Eventos típicos, eventos extremos y variabilidad del déficit hídrico edáfico en mm, por eco-región.

	Basalto Superficial	Sierras del Este
Meses totales	12647	9673
Media	34	32
Desvío std	50	42
p25	0	0
Mediana	4	10
p75	56	55
p90	108	116
CV	148%	130%

Fuente: elaboración propia

Cuando se analizan los valores discriminando los 12 meses del año (Tablas 11 y 12), se encuentra que el DH máximo se ubica como promedio en enero, donde también se observa el máximo valor para los eventos extremos definidos como el percentil 90. En cuanto a la variabilidad, los mayores valores del coeficiente de variación se observan en junio y julio y los menores valores en enero y diciembre.

Tabla 11. Basalto superficial, estadísticos del déficit hídrico edáfico mensual en mm (1949-2010)

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Datos	1054	1054	1054	1054	1054	1054	1054	1054	1054	1054	1054	1054
Media	94	76	36	18	7	3	3	6	9	18	51	83
Desv. Std.	64	62	40	26	15	10	8	11	15	26	47	60
Máximo	218	200	148	105	89	72	58	70	82	117	177	214
p25	35	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	27
Mediana	100	78	20	0	0	0	0	0	0	1	39	82
p75	146	126	68	33	6	0	1	8	13	34	86	132
p90	181	164	98	62	26	10	11	20	34	58	122	165
CV	68%	82%	109%	149%	213%	307%	254%	185%	168%	142%	93%	72%

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Sierras del Este, estadísticos del déficit hídrico edáfico mensual en mm (1949-2010)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Datos	806	806	806	806	806	806	806	806	806	806	806	806
Media	81	67	49	32	16	6	4	4	6	15	34	70
Desv. Std.	51	50	44	32	14	10	9	9	21	31	42	60
Máximo	174	167	149	110	90	67	54	48	50	91	127	160
p25	37	10	0	0	0	0	0	0	0	0	3	36
Mediana	87	74	46	29	1	0	0	0	0	3	31	74
p75	121	109	83	58	31	1	2	4	9	24	51	105
p90	148	134	115	80	55	31	14	14	19	48	80	122
CV	62%	74%	89%	98%	137%	228%	233%	221%	164%	140%	92%	60%

Fuente: elaboración propia

Los eventos extremos alcanzaron valores más altos en Basalto Superficial que en Sierras del Este. Sin embargo, los DH en el otoño en Sierras del Este son más intensos que en el Basalto Superficial. El invierno, como era esperable, no muestra eventos extremos de DH intensos, y tampoco la primavera temprana (setiembre y octubre), lo que tiene importante significado desde el punto de vista de la PPNA de los recursos forrajeros, dado que la humedad del suelo no sería una limitante frecuente del crecimiento en la estación en que están aumentando la radiación solar y la temperatura.

En el Basalto Superficial, noviembre es un mes más deficitario que marzo, y la inversa se observa en Sierras del Este. En Basalto Superficial el grueso de los DH se concentra en el cuatrimestre noviembre- marzo. En Sierras del Este, en cambio el período más crítico es un mes más tardío: diciembre-abril.

En suma, el período con DH medio relevante desde el punto de vista del crecimiento de las pasturas es el que se extiende desde noviembre a abril, con claro destaque de enero, seguido de cerca por febrero y diciembre. Junio, julio, agosto y septiembre presentan valores de DH cercano a cero, más allá de algunos eventos extremos aislados.

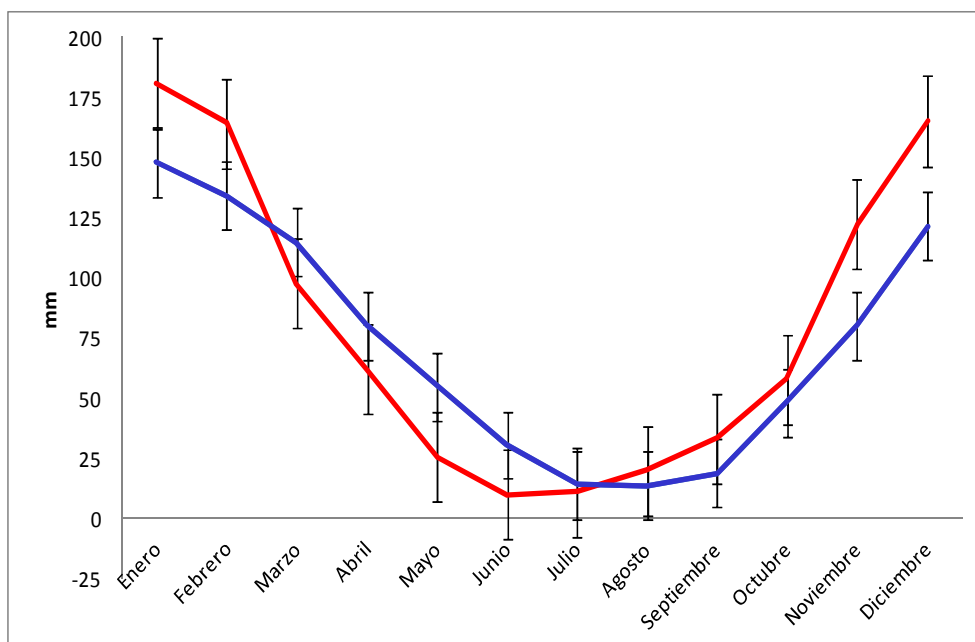


Figura 9. Percentil 90 del déficit hídrico edáfico en mm por mes y región, con barras de error estándar (1949-2010). En rojo, Basalto Superficial; en azul, Sierras del Este. Fuente: elaboración propia.

Se observa que las barras de error estándar se superponen en todos los meses, salvo en noviembre y diciembre. En consecuencia las dos regiones resultaron significativamente diferentes solo en el comportamiento de dos meses del año: noviembre y diciembre. Se observa que la curva de Basalto Superficial se ubica por debajo de la de Sierras del Este en otoño y por encima, en primavera, lo que sugiere otoños más secos y primaveras más húmedas en esta región comparado con Basalto Superficial.

La tabla 13 permite observar con mayor claridad el análisis pero esta vez por estación del año. La magnitud de los eventos extremos de DH (p90) en verano, en Basalto Superficial, es 11 veces mayor que la del invierno, dos veces mayor que la de la primavera y 2,3 veces mayor que la del otoño. La Tabla 14 muestra similares resultados para las Sierras del Este. En esta región, la magnitud de los extremos (p90) de DH de verano es 7,5 veces mayor que el correspondiente p90 del invierno.

En ambas regiones, la variabilidad medida por el CV, es mínima en verano y máxima en invierno. Los valores son muy contrastantes. En otras palabras, los veranos tienden a ser más consistentemente secos, mientras que los inviernos presentan mayor variabilidad en el DH, aunque difícilmente representen niveles de estrés para las plantas por la baja ETP y la baja temperatura.

Tabla 13. Estadísticos del déficit hídrico por mes-estación, en mm, en Basalto superficial (1949-2010)				
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Datos	3162	3162	3162	3162
Media	26	84	20	4
Desv. Std.	37	62	31	10
Máximo	177	218	148	72
p25	0	22	0	0
Mediana	6	85	0	0
p75	41	135	35	2
p90	83	170	73	15
CV	142%	74%	154%	238%

Fuente: elaboración propia

Tabla 14. Estadísticos del déficit hídrico por mes-estación, en mm, en Sierras del Este (1949-2010)				
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Datos	2418	2418	2418	2418
Media	18	73	33	5
Desv. Std.	25	48	36	11
Máximo	127	174	149	67
p25	0	32	0	0
Mediana	5	79	21	0
p75	30	111	57	2
p90	54	135	88	18
CV	139%	66%	111%	231%

Fuente: elaboración propia

La dispersión de los datos de DH en Basalto Superficial es sustancialmente mayor que en Sierras del Este (Figura 10), lo que sumado a que los extremos de DH son más intensos, significa, que Basalto Superficial es, de las dos, la región de mayor riesgo climático.

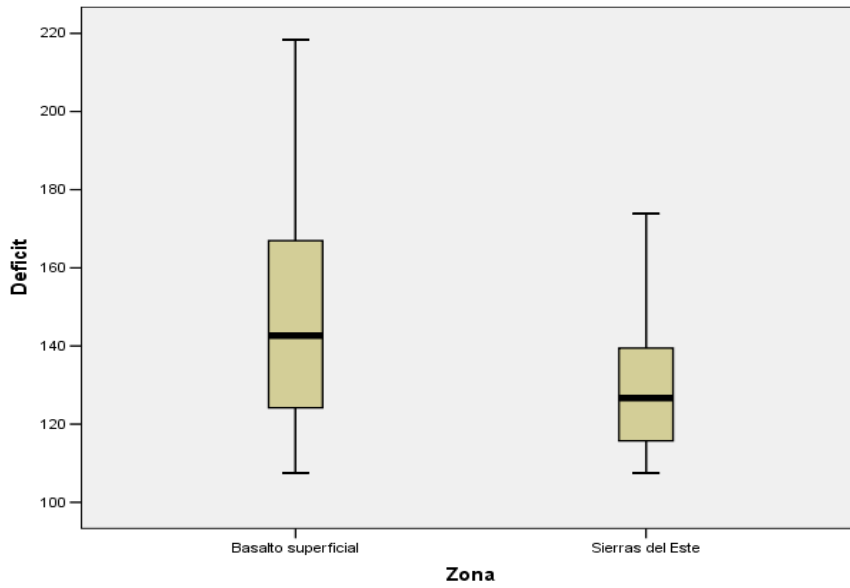


Figura 10. *Boxplot* del déficit hídrico edáfico en mm en Basalto Superficial y Sierras del Este. Fuente: elaboración propia.

5.2.2 Evolución del DH estacional

Los períodos relevantes para analizar las tendencias del DH son aquellos donde se concentra el crecimiento de las pasturas. Para Basalto y Sierras del Este se graficó la tendencia de la media mensual del DH para el período noviembre-marzo (Figura 11).

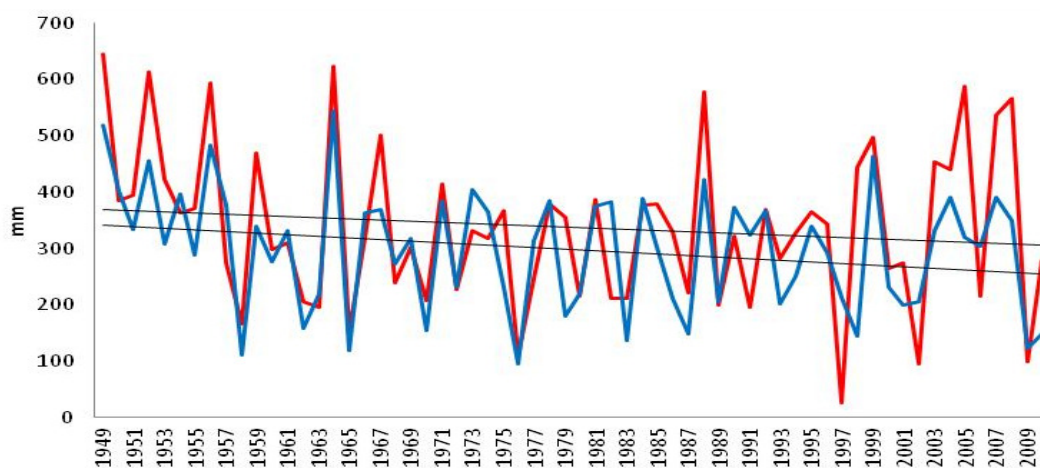


Figura 11. Evolución de la media del déficit hídrico edáfico acumulado de noviembre a marzo, 1949-2010. En rojo, Basalto Superficial; en azul, Sierras del Este. Las líneas de tendencia tienen la

siguientes ecuaciones: Basalto Superficial: $y = -1,0331x + 369,72$ con $R^2 = 5,9\%$; Sierras del Este $y = -1,4431x + 343,69$ con $R^2 = 1,7\%$. Fuente: elaboración propia.

Se analizó la significación estadística de las tendencias en DH edáfico del período noviembre-marzo. La tendencia descendente en Sierras del Este resultó marginalmente significativa al 0.05 ($p=0.06$) y resultó no significativa para Basalto Superficial ($p=0.30$).

5.2.3 Análisis de correlación entre precipitación y déficit hídrico

Siendo el DH edáfico una variable temporalmente dinámica y relacionada con la humedad del suelo del período anterior, se investigó cuanto de la variabilidad en el DH edáfico mensual se explica por la precipitación del mismo mes. Para la serie de tiempo bajo análisis el valor del coeficiente "r" de Pearson de DH y P arroja valores negativos de -0,402 en el conjunto del Basalto Superficial y -0,552 en Sierras del Este, significativos a un nivel de 0,01 (a dos colas).

El valor de R^2 resulta de 17% para Basalto Superficial y de 31% para Sierras del Este. O sea que en Basalto Superficial, y a pesar de la superficialidad de los suelos, casi 83 % de la varianza del DH mensual resultó explicado por razones distintas a la precipitación del mismo mes. En Sierras del Este el porcentaje desciende a 69% pero sigue siendo elevado. Entre las razones que pueden explicar el bajo porcentaje de la varianza del DH mensual explicado por la lluvia del mismo mes podrían estar la precipitación de meses anteriores, el agua acumulada en el suelo y la ETP. A paso mensual la lluvia acumulada de un mes resultaría un pobre indicador del DH del mismo mes. Las Tablas 15 y 16 muestran los valores de correlación entre DH y P mensual para las dos regiones, destacándose la similitud de los valores de las distintas SP.

Tabla 15. Correlación (Pearson) entre precipitación y déficit hídrico edáfico, en mm, por secciones policiales en Basalto Superficial (1949-2010)	
SP	r
Salto SP10	-0,372
Salto SP11	-0,421
Salto SP12	-0,369
Salto SP13	-0,336
Salto SP14	-0,323
Salto SP15	-0,307
Salto SP16	-0,382
Artigas SP3	-0,422
Artigas SP4	-0,402
Artigas SP5	-0,512
Artigas SP9	-0,508
Artigas SP10	-0,412
Artigas SP11	-0,41
Artigas SP12	-0,421
Paysandú SP9	-0,416
Tacuarembó SP6	-0,538
Tacuarembó SP13	-0,529
Todos los valores de "r" son significativos al 1%	

Fuente: elaboración propia

Tabla 16. Correlación (Pearson) entre precipitación y déficit hídrico edáfico en mm por secciones policiales de Sierras del Este (1949-2010)	
SP	r
Lavalleja SP3	-0,547
Lavalleja SP5	-0,541
Lavalleja SP6	-0,544
Lavalleja SP7	-0,547
Lavalleja SP8	-0,524
Lavalleja SP14	-0,548
Maldonado SP4	-0,55
Maldonado SP8	-0,557
Rocha SP2	-0,581
Rocha SP4	-0,583
Rocha SP8	-0,546
Rocha SP10	-0,553
Rocha SP12	-0,549
Todos los valores de "r" son significativos al 1%	

Fuente: elaboración propia

Cuando se compara la correlación entre precipitación y DH por estación y región se encuentran patrones de comportamiento claros. En ambas regiones la correlación es mucho más alta en verano que en invierno. Por su parte los valores de r son más altos en Sierras del Este que en Basalto Superficial (Tabla 17).

Tabla 17. Correlación (Pearson) entre precipitación y déficit hídrico edáfico, en mm, por estación y región	
Estación	r
Basalto Superficial	
Primavera	-0,55
Verano	-0,79
Otoño	-0,49
Invierno	-0,41
Sierras del Este	
Primavera	-0,63
Verano	-0,87
Otoño	-0,63
Invierno	-0,51

Fuente: elaboración propia

Finalmente, se hizo el análisis de “ r ” entre precipitación (P) y DH por SP para cada estación del año. Los valores de “ r ” resultaron todos negativos y significativos al 1%. La Tabla 18 muestra que la correlación es consistentemente más alta en verano en todas las SP, y que en 11 de las 17 el valor de “ r ” entre P y DH supera 0,8.

Tabla 18. Coeficientes de correlación entre precipitación y déficit hídrico mensual por estación, en mm en secciones policiales de Basalto Superficial y Sierras del Este. Período 1949-2010.				
Sección policial	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Salto SP10	-0,564	-0,836	-0,467	-0,411
Salto SP11	-0,544	-0,831	-0,462	-0,428
Salto SP12	-0,445	-0,762	-0,403	-0,324
Salto SP13	-0,503	-0,66	-0,41	-0,32
Salto SP14	-0,514	-0,656	-0,372	-0,343
Salto SP15	-0,498	-0,658	-0,388	-0,318
Salto SP16	-0,605	-0,886	-0,466	-0,437
Artigas SP03	-0,595	-0,891	-0,505	-0,506
Artigas SP04	-0,573	-0,868	-0,462	-0,487
Artigas SP05	-0,61	-0,786	-0,622	-0,599
Artigas SP09	-0,626	-0,785	-0,613	-0,586
Artigas SP10	-0,600	-0,878	-0,493	-0,492
Artigas SP11	-0,557	-0,822	-0,483	-0,506
Artigas SP12	-0,593	-0,89	-0,505	-0,505
Paysandú SP09	-0,649	-0,912	-0,516	-0,469
Tacuarembó SP06	-0,605	-0,843	-0,634	-0,554
Tacuarembó SP13	-0,593	-0,823	-0,625	-0,527
Lavalleja SP03	-0,610	-0,874	-0,630	-0,491
Lavalleja SP05	-0,621	-0,863	-0,594	-0,504
Lavalleja SP06	-0,626	-0,869	-0,596	-0,51
Lavalleja SP07	-0,624	-0,877	-0,607	-0,489
Lavalleja SP08	-0,608	-0,845	-0,565	-0,472
Lavalleja SP14	-0,611	-0,876	-0,630	-0,492
Maldonado SP04	-0,615	-0,880	-0,632	-0,495
Maldonado SP08	-0,634	-0,861	-0,621	-0,494
Rocha SP02	-0,632	-0,844	-0,728	-0,559
Rocha SP04	-0,637	-0,851	-0,730	-0,562
Rocha SP08	-0,614	-0,878	-0,650	-0,550
Rocha SP10	-0,632	-0,86	-0,615	-0,499
Rocha SP12	-0,629	-0,891	-0,650	-0,550

Fuente: elaboración propia

5.2.4 Análisis de autocorrelación del DH edáfico con retardos

Se realizó un análisis de autocorrelación (Pearson) del DH de un mes respecto a hasta cuatro meses anteriores y se realizó un test de significación de la correlación para distinguir aquellos meses con valores de autocorrelación estadísticamente significativa ($\alpha = 5\%$). Los Tablas 19 y 20 resumen la cantidad de secciones policiales con meses con correlación positiva por ecoregión.

Tabla 19. Autocorrelación del déficit hídrico mensual con retardos. Se presenta el n° de secciones policiales para cada mes con valores de "r" significativo al 5% en Basalto Superficial (17 secciones policiales).

Mes	t-t ₁	t-t ₂	t-t ₃	t-t ₄
Enero	5	0	0	0
Febrero	13	0	0	0
Marzo	6	1	0	0
Abril	14	1	0	0
Mayo	1	0	4	3
Junio	14	0	0	0
Julio	12	8	0	0
Agosto	6	4	0	2
Septiembre	14	5	2	0
Octubre	4	4	4	0
Noviembre	16	1	0	0
Diciembre	16	10	1	1

Fuente: elaboración propia

Tabla 20. Autocorrelación del déficit hídrico mensual con retardos. Se presenta el n° de secciones policiales para cada mes con valores de "r" significativo al 5% en Sierras del Este (13 secciones policiales).

Mes	t-t ₁	t-t ₂	t-t ₃	t-t ₄
Enero	1	0	0	0
Febrero	11	0	0	0
Marzo	5	0	0	0
Abril	1	1	0	0
Mayo	1	8	0	0
Junio	12	2	2	0
Julio	9	8	0	0
Agosto	7	1	0	7
Septiembre	0	0	0	0
Octubre	12	1	0	2
Noviembre	13	5	1	0
Diciembre	13	7	4	0

Fuente: elaboración propia

En Basalto Superficial se encontraron correlaciones estadísticamente significativas del DH de un mes versus el DH del mes anterior extendidas a la mayoría de las SP de esta ecoregión

para siete de los doce meses del año. En las Sierras del Este la correlación significativa del DH de un mes respecto al mes anterior se muestra extendida en cinco de los doce meses, destacándose febrero, junio, octubre, noviembre y diciembre. Para las dos ecoregiones se observa que la autocorrelación fue en general fuerte con el mes anterior, se debilita cuando el rezago es de dos meses y tiende a 0 cuando el rezago es de tres meses. Se destaca que los febreros tienden a correlacionar fuertemente con los enero, pero que no sucede lo mismo entre los enero y los diciembre anteriores, lo cual resulta llamativo. Por su parte, en ambas ecoregiones junio y julio tienden a correlacionar con el (bajo) DH del mes anterior.

5.2.5 Tendencias en la mediana y los eventos extremos de máxima

Los resultados del análisis de la tendencia de los eventos extremos de máximo DH usando la regresión por cuantiles (Figuras 12 y 13) muestran tendencias negativas en la pendiente del percentil 90 del DH en 12 de las 17 SP del Basalto Superficial. En algunas SP el p90 es estable, y en otras dos la tendencia es de signo positivo. En Sierras del Este 11 de las 13 SP muestran tendencias negativas en el percentil 90 del DH, a la vez que dos tienen tendencia positiva.

El comportamiento de la mediana del DH en la regresión por cuantiles muestra en los gráficos comportamientos similares al del p90 en la mayoría de las situaciones.

Se estudió la significación estadística de la pendiente de las regresiones por cuantiles (Tablas 21 a 24) para las dos ecoregiones. Se encontró que las pendientes para el período estudiado para el p90 no son significativas en ninguna de las 17 SP de Basalto Superficial. Para la mediana las tendencias no son significativas en 14 de las 17 SP. Por lo tanto no es posible rechazar la hipótesis nula $H_0: \beta = 0$ y se concluye que las tendencias observadas a simple vista no son estadísticamente significativas y pueden ser atribuidas al azar (salvo para la mediana en 3 SP del departamento de Salto).

En Sierras del Este los resultados son un poco diferentes, ya que en 9 de 13 SP la tendencia decreciente de DH no resultó estadísticamente significativa y en otras 4 sí lo fue.

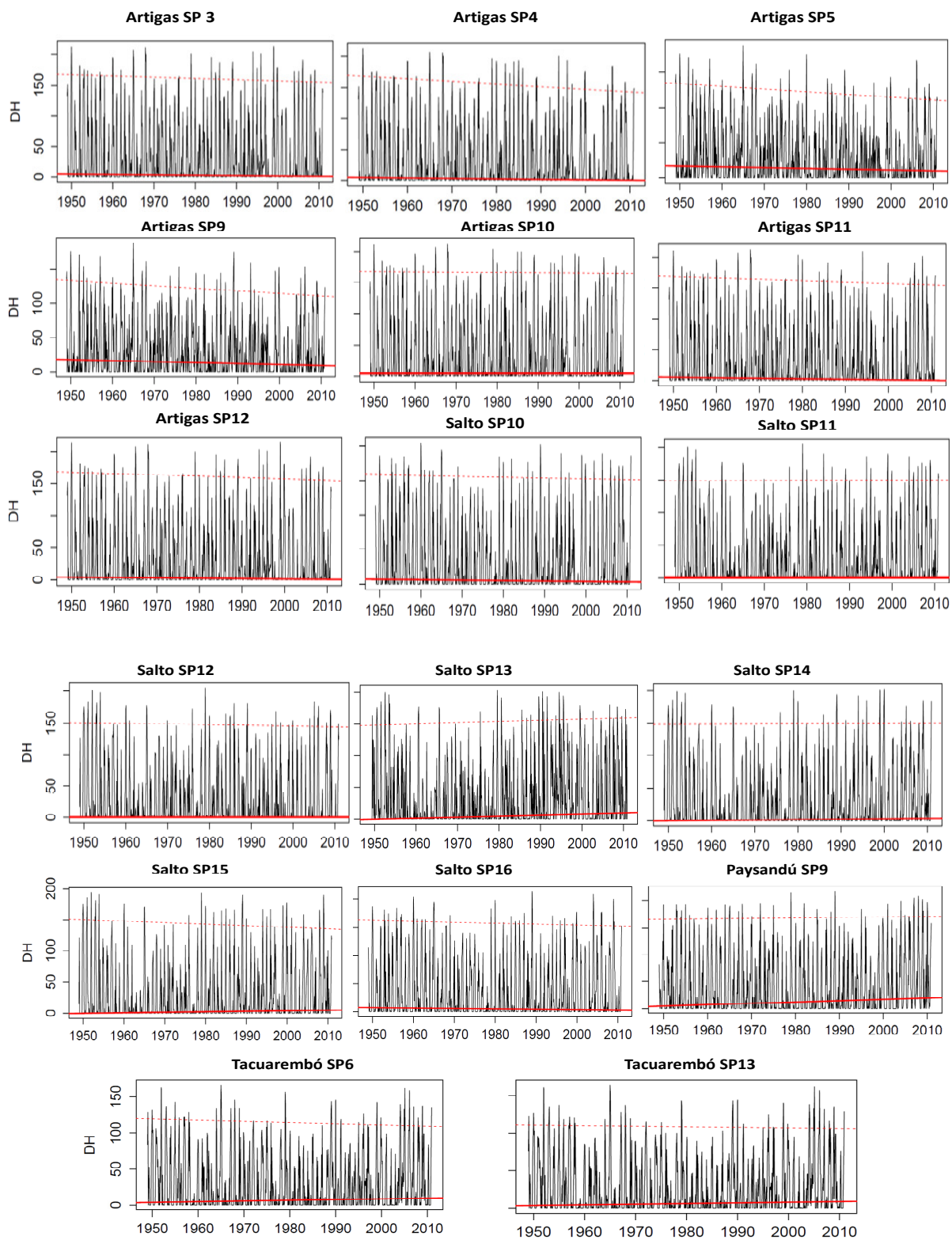


Figura 12. Regresión por cuantiles de la mediana y el percentil 90 del déficit hídrico edáfico en Basalto Superficial (línea roja punteada = p90; línea roja llena = mediana). Fuente: elaboración propia.

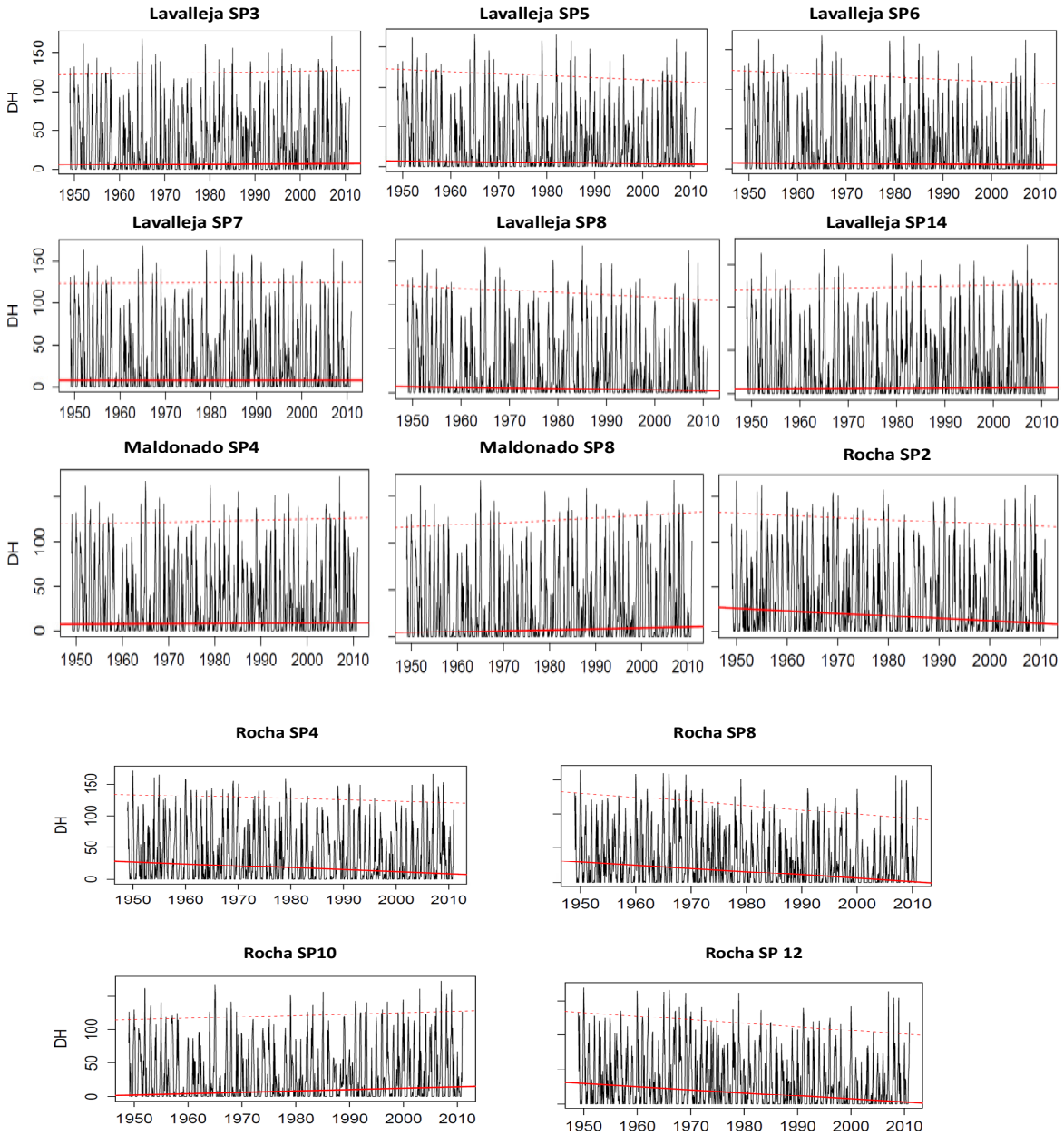


Figura 13. Regresión por cuantiles de la mediana y el percentil 90 del déficit hídrico edáfico en Basalto Superficial (línea roja punteada = p90; línea roja llena = mediana). Fuente: elaboración propia.

Tabla 21. Pendiente de la recta de la regresión por cuantiles (b) para el percentil 90 y la mediana (p50) del DH en mm, en Basalto Superficial y significación estadística al 5%. Período 1949-2010.				
Sección policial	b; p10	Significación	b; p50	Significación
Artigas SP03	-0,06	N/S	-0,06	N/S
Artigas SP04	-0,49	N/S	-0,08	N/S
Artigas SP05	-0,41	N/S	-0,11	N/S
Artigas SP09	-0,40	N/S	-0,14	N/S
Artigas SP10	-0,12	N/S	0,00	N/S
Artigas SP11	-0,25	N/S	-0,08	N/S
Artigas SP12	-0,32	N/S	-0,06	N/S
Salto SP10	-0,57	N/S	0,23	N/S
Salto SP11	-0,21	N/S	-0,06	N/S
Salto SP12	-0,35	N/S	0,00	N/S
Salto SP13	-0,37	N/S	0,00	N/S
Salto SP14	-0,30	N/S	0,16	S
Salto SP15	-0,04	N/S	0,07	S
Salto SP16	0,00	N/S	0,09	S
Paysandú SP09	-0,43	N/S	-0,07	N/S
Tacuarembó SP06	0,04	N/S	0,10	N/S
Tacuarembó SP13	0,00	N/S	0,08	N/S

Fuente: elaboración propia

Tabla 22. Pendiente de la recta de la regresión por cuantiles (b) para el percentil 90 y la mediana (p50) del DH en mm, en Sierras del Este y significación estadística al 5%. Período 1949-2010.				
Sección policial	b; p10	Significación	b; p50	Significación
Lavalleja 03	-0,12	N/S	0,03	N/S
Lavalleja 05	-0,46	S	-0,07	N/S
Lavalleja 06	-0,43	S	-0,04	N/S
Lavalleja 07	-0,15	N/S	0,00	N/S
Lavalleja 08	-0,26	N/S	-0,08	N/S
Lavalleja 14	-0,12	N/S	0,03	N/S
Maldonado 04	-0,11	N/S	0,03	N/S
Maldonado 08	0,27	N/S	0,10	N/S
Rocha 02	-0,18	N/S	-0,28	S
Rocha 04	-0,16	N/S	-0,30	S
Rocha 08	-0,83	S	-0,48	S
Rocha 10	0,26	N/S	0,18	N/S
Rocha 12	-0,80	S	-0,45	S

Fuente: elaboración propia

5.2.6 Análisis de similitud del DH entre ecoregiones

Se realizó un análisis de correlación del DH acumulado por SP del período noviembre-marzo, para 1949 a 2010 entre las dos regiones.

El coeficiente de correlación arrojó un valor de 0,74 y la pendiente de la recta de regresión arrojó un valor de 0,97, cercano a 1, y significativo al 0,0001. Este resultado muestra que la evolución del DH en ambas regiones está muy fuertemente asociada (Figura 14). En 62 años solo los valores de cuatro años se ubican por fuera del intervalo de confianza (95%). Se observa también que para los valores de DH más elevados los puntos del Basalto Superficial están siempre por encima de la recta de regresión, indicando que el Basalto Superficial presenta valores de DH superiores en términos absolutos a las Sierras del Este.

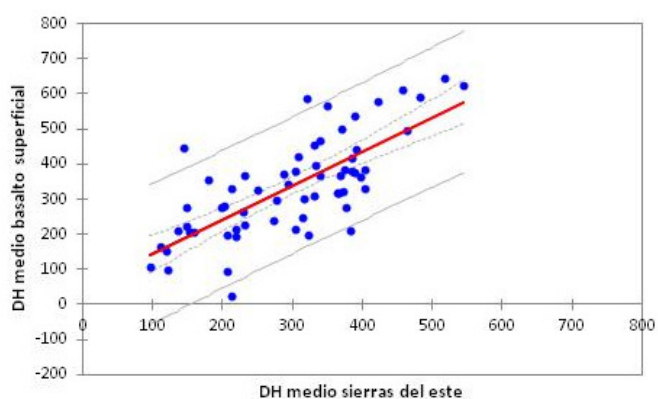


Figura 14. Regresión de la media del déficit hídrico en mm, del período noviembre-marzo en Basalto Superficial sobre Sierras del Este (1949-2010). Fuente: elaboración propia.

Para observar la proximidad entre los DH de las SP de cada región se construyeron matrices de autocorrelación del DH acumulado del mismo período para todas las SP tomadas de a pares (Tablas 23 y 24).

Las correlaciones son altas y estadísticamente significativas ($\alpha=0,05$) entre todas las SP del Basalto Superficial. En el caso de Sierras del Este, la mayoría de las SP tiene correlaciones estadísticamente significativas ($\alpha=0,05$) entre sí, a excepción de las SP 8 de Maldonado con la SP 4 de Rocha.

Tabla 23. Matriz de proximidad (coeficiente de correlación de Pearson) del déficit hídrico edáfico en mm, acumulado de noviembre a marzo, en secciones policiales de Basalto Superficial. Período 1949 -2010.

	Artigas 03	Artigas 04	Artigas 05	Artigas 09	Artigas 10	Artigas 11	Artigas 12	Pays andú 09	Salto 10	Salto 11	Salto 12	Salto 13	Salto 14	Salto 15	Salto 16	Tacua rembó 06	Tacua rembó 13
Artigas 03	1																
Artigas 04	0,92	1															
Artigas 05	0,84	0,85	1														
Artigas 09	0,83	0,84	0,98	1													
Artigas 10	0,93	0,90	0,84	0,87	1												
Artigas 11	0,90	0,90	0,82	0,84	0,92	1											
Artigas 12	1,00	0,92	0,83	0,83	0,93	0,90	1										
Paysandú 09	0,68	0,59	0,63	0,64	0,68	0,67	0,68	1									
Salto 10	0,74	0,72	0,82	0,84	0,77	0,73	0,74	0,70	1								
Salto 11	0,81	0,77	0,71	0,73	0,83	0,78	0,81	0,60	0,66	1							
Salto 12	0,83	0,78	0,75	0,74	0,82	0,81	0,83	0,53	0,64	0,93	1						
Salto 13	0,71	0,61	0,57	0,60	0,72	0,65	0,71	0,54	0,54	0,79	0,78	1					
Salto 14	0,79	0,76	0,68	0,72	0,83	0,75	0,79	0,63	0,65	0,92	0,86	0,87	1				
Salto 15	0,82	0,78	0,69	0,70	0,82	0,75	0,82	0,60	0,65	0,93	0,91	0,83	0,94	1			
Salto 16	0,76	0,73	0,80	0,80	0,77	0,70	0,76	0,69	0,93	0,65	0,65	0,54	0,65	0,68	1		
Tacuarembó 06	0,78	0,72	0,78	0,76	0,76	0,71	0,78	0,69	0,66	0,78	0,75	0,63	0,76	0,76	0,65	1	
Tacuarembó 13	0,78	0,71	0,77	0,76	0,76	0,71	0,78	0,68	0,66	0,78	0,74	0,63	0,76	0,75	0,66	1,00	1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación alfa=0,05

Fuente: elaboración propia

Tabla 24. Matriz de proximidad (coeficiente de correlación de Pearson) del déficit hídrico edáfico en mm, acumulado de noviembre a marzo, en secciones policiales de Sierras del Este. Período 1949 - 2010.

	Lavalleja 03	Lavalleja 05	Lavalleja 06	Lavalleja 07	Lavalleja 08	Lavalleja 14	Maldonado 04	Maldonado 08	Rocha 10	Rocha 12	Rocha 02	Rocha 04	Rocha 08
Lavalleja 03	1												
Lavalleja 05	0,89	1											
Lavalleja 06	0,90	1,00	1										
Lavalleja 07	0,87	0,91	0,91	1									
Lavalleja 08	0,89	0,94	0,94	0,91	1								
Lavalleja 14	1,00	0,89	0,90	0,87	0,89	1							
Maldonado 04	1,00	0,89	0,89	0,87	0,89	1,00	1						
Maldonado 08	0,54	0,59	0,59	0,61	0,60	0,54	0,53	1					
Rocha 10	0,86	0,84	0,84	0,86	0,86	0,86	0,86	0,62	1				
Rocha 12	0,45	0,46	0,47	0,45	0,53	0,45	0,46	0,12	0,41	1			
Rocha 02	0,46	0,49	0,49	0,49	0,50	0,46	0,46	0,14	0,51	0,57	1		
Rocha 04	0,46	0,48	0,49	0,49	0,50	0,46	0,47	0,13	0,51	0,57	1,00	1	
Rocha 08	0,44	0,46	0,46	0,44	0,52	0,44	0,45	0,11	0,40	1,00	0,56	0,56	1

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación alfa=0,05

Fuente: elaboración propia

5.3 Análisis del indicador ETR/ETP

5.3.1 Frecuencia de meses con ETR/ETP ≤ 0,5 según región y estación del año

Para comenzar el análisis se observó la cantidad de veces que un mismo mes estuvo en situación de fuerte estrés hídrico, con el ETR/ETP por debajo del umbral establecido. Los resultados se presentan en las Tablas 25 y 26, para Basalto Superficial y Sierras del Este, respectivamente, y permiten observar que, para el período julio de 1949 a junio de 2010:

- (1) El 47% de todos los eneros (casi uno de cada dos) presenta valores de ETP/ETR inferiores al umbral, sin diferencias entre Basalto Superficial y Sierras del Este.
- (2) Los febreros y los diciembres también presentan porcentajes muy altos (del orden de 41 a 44% según región) de valores de ETR/ETP por debajo de 0,5.
- (3) En Basalto Superficial el 89% de las rachas de 3 o más meses con el indicador menor a 0,5 se ubica en el período noviembre-marzo. En cambio en Sierras del Este, el período crítico se rezaga y es diciembre a abril.
- (4) Noviembre presenta más meses con bajo ETR/ETP en Basalto Superficial que Sierras del Este.
- (5) Setiembre y octubre (meses importantes para el crecimiento de las pasturas naturales estivales) son meses de muy baja frecuencia de ETR/ETP menor a 0,5.
- (6) En las dos regiones estudiadas, el DH edáfico severo y prolongado en el tiempo, es esencialmente un fenómeno estival, resultante de la combinación de la escasez de lluvias, la elevada ETP y la limitada capacidad de almacenaje de los suelos de estas regiones.
- (7) En general, los otoños tienen más probabilidad de ocurrencia de meses con ETR/ETP menor a 0,5 en Sierras del Este que en Basalto Superficial.
- (8) Junio a septiembre no presentan déficits.
- (9) Noviembre a marzo es el período del año con más frecuencia de meses con ETR/ETP por debajo de 0,5.

Tabla 25. Frecuencia de meses de año con $ETP/ETP \leq 0,5$, de a uno y en rachas, en 17 secciones policiales de Basalto Superficial, julio de 1949 a junio de 2010

Mes	En rachas			Total	% en total de cada mes
	Duración de 1 mes	En rachas de 2 meses	de 3 o más meses		
Julio	25	2	7	34	3%
Agosto	20	6	4	30	3%
Septiembre	27	9	1	37	4%
Octubre	15	13	26	54	5%
Noviembre	94	52	102	248	24%
Diciembre	138	98	192	428	41%
Enero	163	129	202	494	47%
Febrero	143	100	185	428	41%
Marzo	64	61	108	233	22%
Abril	68	45	38	151	14%
Mayo	28	19	9	56	5%
Junio	19	15	9	43	4%
Total	804	549	883	2236	
NDEFM	602	440	789	1831	
%NDEFM/Total	75%	80%	89%		

Fuente: elaboración propia

Tabla 26. Frecuencia de meses de año con ETR/ETP ≤ 0,5, de a uno y en rachas, en 13 secciones policiales de Sierras del Este, julio de 1949 a junio de 2010					
Mes	Duración de 1 mes	En rachas		Total	% en total de cada mes
		En rachas de 2 meses	de 3 o más meses		
Julio	26	4	8	38	5%
Agosto	17	2	0	19	2%
Septiembre	4	1	3	8	1%
Octubre	20	3	23	46	6%
Noviembre	25	39	58	122	15%
Diciembre	112	91	149	352	44%
Enero	106	108	163	377	47%
Febrero	88	93	159	340	42%
Marzo	66	69	109	244	30%
Abril	94	55	51	200	25%
Mayo	61	42	18	121	15%
Junio	24	25	14	63	8%
Total	643	532	755	1930	
NDEFM	372	361	580	1313	
%NDEFM/Total	58%	68%	77%		

Fuente: elaboración propia

Cuando se observan los datos agregados por estación del año, se encuentra que la mayoría absoluta de los meses del año con ETR/ETP por debajo de 0,5 (Figura 15) ocurren en verano (60% en Basalto Superficial y 55% en Sierras del Este).

Las barras de error estándar de la media del DH estacional para las dos ecoregiones se superponen en las cuatro estaciones, lo que indica que en una aproximación de estaciones del año, ambas ecoregiones no son significativamente diferentes.

El otoño es una estación con más riesgo de sequía que la primavera.

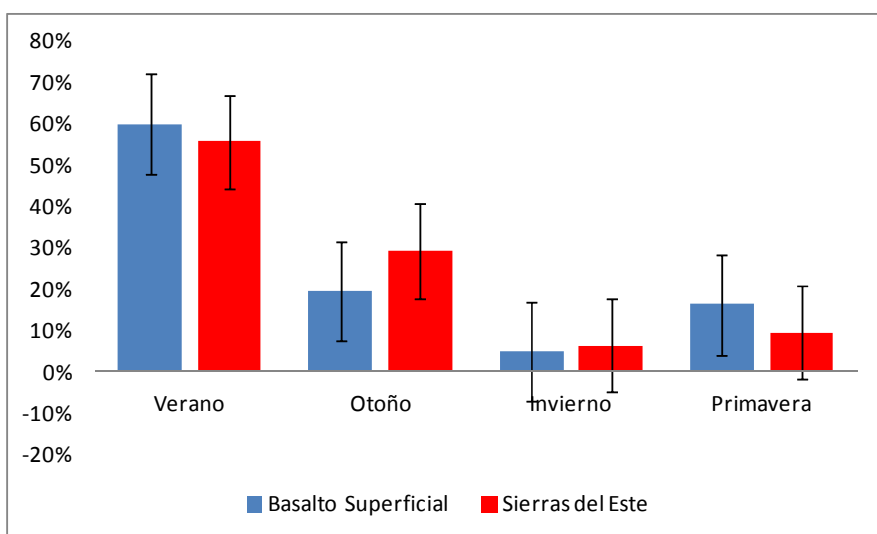


Figura 15. Porcentaje acumulado de meses con ETR/ETP \leq a 0,5 según estación y ecoregión, con barras de error estándar. En rojo Basalto Superficial y en azul Sierras del Este. Fuente: elaboración propia

5.3.2 Extensión geográfica de las rachas

Para visualizar la extensión geográfica de eventos de ETR/ETP menor a 0,5 durante al menos 3 meses como indicador de severidad, se cuantificó la cantidad de SP de cada región en los cuales el indicador cumple esa condición en un mismo año tomado de julio a junio. Los resultados se presentan en la Figura 16 para Basalto Superficial y en la Figura 17 para Sierras del Este, expresados como porcentaje de SP de cada ecoregión con presencia de este tipo de evento. En los gráficos se agrega la línea de tendencia (regresión lineal) y se suaviza la serie mediante media móvil de 7 años. La elección del valor 7 se fundamenta en la periodicidad media de los fenómenos ENSO.

En Basalto Superficial la extensión geográfica tiene pendiente negativa (-0,001). Esta tendencia decreciente en extensión no resulta sin embargo estadísticamente significativa ($p < 0,05$), ya que el p-valor resultó 0,686. La suavización de la curva muestra que el Basalto Superficial presenta en el período de 62 años una variabilidad multidecadal bastante clara, con picos a mediados de los 50, de los 60, de los 90 y de los 2000. Se observa también en Basalto, un prolongado "valle húmedo" desde mediados de los 70 a fines del 80.

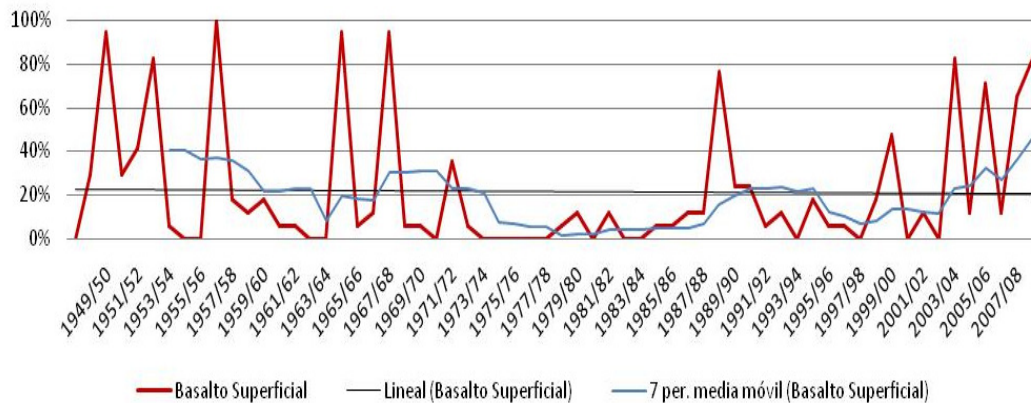


Figura 16. Porcentaje de secciones policiales con 3 o más meses consecutivos con ETP/ETR \leq 0,5, por año, en Basalto Superficial, 1948/49-2009/10. Fuente: elaboración propia

En Sierras del Este la extensión geográfica también tiene pendiente negativa (-0,004). A diferencia de la ecoregión anterior, esta tendencia decreciente en extensión resultó estadísticamente significativa ($p < 0,05$), ya que el p-valor es 0,03. La suavización de la curva muestra en el período de 62 años una variabilidad multidecadal más atenuada en Sierras del Este que en Basalto Superficial con picos suaves a mediados de los 50, de los 60 y los 70, que desaparecen prácticamente en los últimos veinte años. Los eventos de déficit extendido parecen cada vez menos frecuentes en Sierras de Este. Se observa también que no se produce el aumento en la frecuencia en la década de los 2000 que sí se observa en Basalto Superficial.

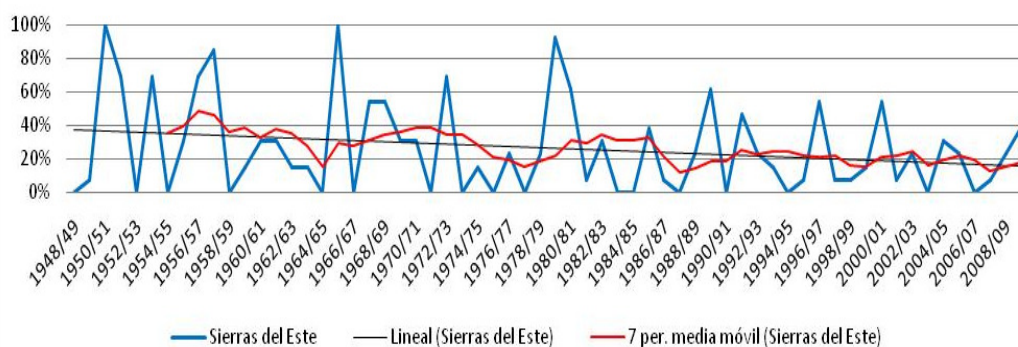


Figura 17. Porcentaje de secciones policiales con 3 o más meses consecutivos con ETP/ETR \leq 0,5, por año, en Sierras del Este, 1948/49-2009/10. Fuente: elaboración propia

En Basalto Superficial se observan 10 eventos de amplia extensión (más del 50% de las SP), que se relacionan con lo que se suele considerar las grandes “sequías”, y se destaca que

cuatro de ellos se producen en la segunda mitad de la última década. Nueve de los 10 eventos cubren más del 75% de las SP de esta ecoregión. Estos años de “sequías” generalizadas son: 1949/50, 1952/53, 1956/57, 1964/65, 1967/68, 1988/89, 2003/04, 2005/06 y 2008/09.

Se destaca que los eventos muy generalizados de la década del 2000 (2003/04, 2004/05, 2007/08 y 2008/09) se expresan sólo en Basalto Superficial. Por su parte hay cinco eventos (1950/51, 1955/56, 1071/72, 1995/96 y 1999/00) que se expresan en forma extendida en Sierras del Este y no en Basalto Superficial. En todo caso es claro que en la última década de ambas ecoregiones, la que resultó impactada por rachas de DH intenso muy extendido geográficamente fue el Basalto Superficial.

La correlación del número de SP con rachas de 3 o más meses con $ETR/ETP \leq 0,5$, entre las dos ecoregiones arroja un valor de 0,563, significativo al 0,01 (a dos colas).

En el otro extremo, se comprueba que en 17 de los 62 años, la totalidad de las SP de ambas ecoregiones no atravesó por rachas de 3 o más meses de $ETR/ETP \leq 0,5$. La mirada intra-ecoregional muestra que entre los años sin presencia de rachas y los años con rachas muy extendidas en el espacio, existe un subconjunto de años en los que un número menor de SP atravesó igualmente situaciones de déficit hídrico severo. Se puede concluir que no existe una dicotomía del tipo de “hay sequía-no hay sequía” en todo el territorio, y que en años sin “sequías” generalizadas igualmente puede haber diversas SP (y sus correspondientes establecimientos agropecuarios) que atravesen eventos de alto déficit hídrico edáfico prolongado.

5.3.3 Mes de inicio de las rachas

La Figura 18 muestra la frecuencia de los meses de inicio de los períodos de $ETR/ETP \leq 0,5$ de 3 o más meses consecutivos en Basalto Superficial y Sierras del Este. En Basalto Superficial se produjeron 241 períodos de $ETR/ETP \leq 0,5$ entre julio de 1949 y junio de 2010 en las 17 SP analizadas. Sobre un total de 2240 meses con $ETR/ETP \leq 0,5$, el 11% se constituyó en rachas de 3 o más meses. En el 89% restante de los meses el indicador fue $\leq 0,5$ en un mes o como máximo en dos meses.

En Sierras del Este, de 12 648 meses totales que comprende el período de 62 años en las 13 SP, en 2284 meses el $ETR/ETP \leq 0,5$ fue parte de una racha. Esto representa que en el 18% de los meses se configuró una situación de estrés hídrico en esta ecoregión. Más de un tercio de las rachas de bajo ETR/ETP en Basalto Superficial se iniciaron en diciembre (37%), seguido de cerca por noviembre, con casi un tercio (32%). En Sierras del Este (Figura 18) de 9672 meses totales que comprende el período de 62 años en 13 SP, en 1943 meses –el 20%– el ETR/ETP fue igual o menos de 0,5. Casi la mitad de los períodos de tres o más meses con $ETR/ETP \leq 0,5$, se iniciaron en diciembre (48%), seguido por enero con 18% y noviembre con 17%.

Cuando se agregan las barras de error estándar para mostrar la significación entre regiones para cada mes de inicio de un período de $ETR/ETP \leq 0,5$, se encuentra que solo en noviembre las diferencias entre las dos ecoregiones son significativas en cuanto a fecha de inicio de períodos de déficit pronunciado (Figura 18).

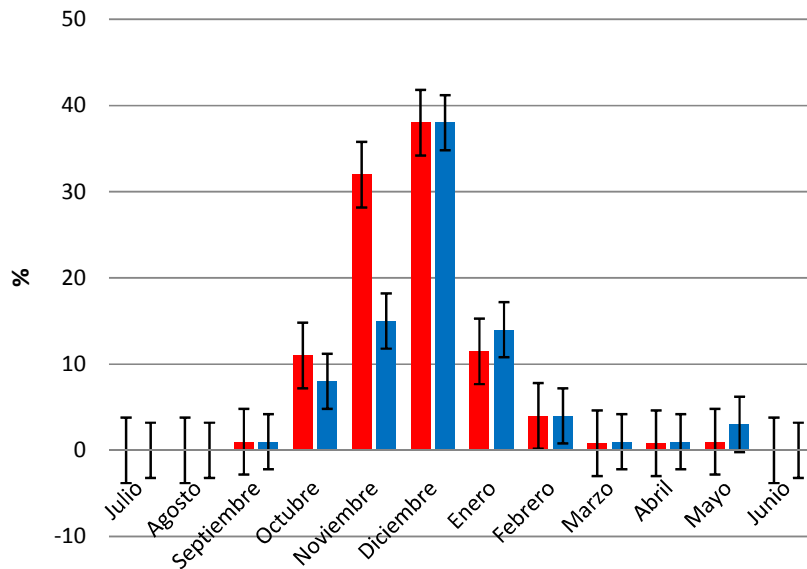


Figura 18. Mes de inicio de rachas de 3 o más meses con $ETR/ETP \leq 0,5$, con barras de error estándar, en el período 1949-2010. Las barras rojas y azules representan porcentajes de fecha de inicio según mes el Basalto Superficial y en Sierras del Este, respectivamente. Fuente: elaboración propia

Considerando separadamente las 13 SP de Sierras del Este, entre 1949 y 2010, se iniciaron 187 períodos de $ETR/ETP \leq 0,5$. En otros términos, sobre un total de 1943 meses detectados con $ETR/ETP \leq 0,5$, el 10% se constituyó en rachas de 3 o más meses. En el 90% restante de los meses el DH severo duraron un mes o como máximo dos meses.

5.3.4 Duración de las rachas

La duración media de los períodos de 3 o más meses con $ETR/ETP \leq 0,5$ es de 3,7 meses en las 17 SP del Basalto Superficial y de 3,8 meses en las Sierras del Este (Tablas 27 y 28). La mitad de los eventos dura solamente un mes.

Tabla 27. Duración media por sección policial de Basalto Superficial de los períodos con ETR/ETP $\leq 0,5$ en el período julio 1949- junio 2010		
Duración	Frecuencia	%
1 mes	47,4	63%
2 meses	15,1	20%
3 meses	7,7	10%
4 meses	2,8	4%
5 meses	1,6	2%
6 meses	1,1	1%
7 meses	0,1	0%
Subtotal de 3 o más meses	13,3	18%
Total de períodos de ETR/ETP $\leq 0,5$	75,8	100%

Fuente: elaboración propia

Tabla 28. Duración media por sección policial de Sierras del Este de los períodos con ETR/ETP $\leq 0,5$ en el período julio 1949- junio 2010		
Duración	Frecuencia	%
1 mes	49,5	59%
2 meses	20,2	24%
3 meses	7,0	8%
4 meses	4,0	5%
5 meses	3,0	4%
6 meses	0,3	0%
7 meses	0,1	0%
Subtotal de 3 o más meses	14,4	17%
Total de períodos de ETR/ETP $\leq 0,5$	84,1	100%

Fuente: elaboración propia

5.3.5 Intensidad de las rachas

La intensidad de las rachas, medida por el DH promedio y la ETP/ETR promedio se presenta en la Tabla 29.

Tabla 29. Indicadores de intensidad mensual media del déficit hídrico edáfico en mm y valores medios de ETR/ETP para la totalidad de los valores de DH y ETR/ETP y para los meses con ETR/ETP $\leq 0,5$.						
Ecoregión	A. Todos los valores		B. Valores si ETR/ETP $\leq 0,5$		C. Diferencia B/A	
	DH	ETR/ETP	DH	ETR/ETP	DH	ETR/ETP
Basalto Superficial	33,70	0,79	130,97	0,30	289%	38,2%
Sierras del Este	32,20	0,77	108,56	0,32	237%	41,9%

Fuente: elaboración propia

Los períodos de DH de 3 o más meses estudiados han sido intensos, ya que la media de la ETR/ETP se ha situado bastante por debajo del valor del umbral de 0,5, en valores del orden de 0,30 – 0,32, muy similares entre ecoregiones. El DH medio resulta muy similar cuando se observan todos los datos, pero es 20% mayor en Basalto Superficial que en Sierras del Este cuando se analizan sólo los datos para los eventos críticos definidos. La columna C de la Tabla 29 muestra que en Basalto Superficial el DH medio de los meses de ETR/ETP menor a 0,5 es casi 300% mayor que el DH medio para el total de la serie de tiempo de ETR/ETP. Por su parte, la ETR/ETP media de los meses con ETR/ETP menor a 0,5 resulta 0,3, y es 62% menor que la ETR/ETP del total de los meses y años (0,79). En Sierras del Este las diferencias son también muy notables, aunque menos acentuadas que en Basalto Superficial.

5.3.6 Recurrencia de las rachas

La recurrencia de los períodos de tres o más meses de ETR/ETP $\leq 0,5$ se calculó como la cantidad de años dividida por la cantidad de eventos. La serie de tiempo consta de 62 años. Los resultados se visualizan en la Tabla 30.

Tabla 30. Recurrencia de los eventos de 3 o más meses de ETR/ETP $\leq 0,5$ para el período 1949-2010 y para dos subperíodos consecutivos, por sección policial (SP).					
Basalto Superficial	N° de		N° de SP	N° de	Recurrencia
	Eventos	Años			
I) 1949-2010	244	62	17	14,4	4,3
II) 1949-1979	130	31	17	7,6	4,1
III) 1980-2010	114	31	17	6,7	4,6
Sierras del Este					
I) 1949-2010	187	62	13	14,4	4,3
II) 1949-1979	122	31	13	9,4	3,3
III) 1980-2010	65	31	13	5,0	6,2

Fuente: elaboración propia

Para explorar cambios en la recurrencia se analizaron dos sub-períodos consecutivos de 31 años (1949-1979 y 1980-2010)

Se observa un leve aumento del período medio de recurrencia en el Basalto Superficial y un fuerte aumento en Sierras del Este, donde los datos indican que hay menos períodos de déficit (la mitad) en el período más reciente. La recurrencia disminuye un 50 por ciento en Sierras del Este en el segundo subperíodo.

5.4 Análisis de la productividad primaria neta aérea

El análisis de la PPNA se realiza utilizando la variable fPAR a paso mensual para el período noviembre a marzo de cada año. Como se señaló en el capítulo 4, del análisis de la ecoregión Sierras del Este se excluyó la sección policial 4 de Rocha por limitada disponibilidad de datos.

5.4.1 Eventos típicos y eventos extremos de fPAR

La media, la mediana de la fPAR son 11% más elevadas en Sierras del Este que en Basalto Superficial y el percentil 10 es 14% mayor, para el período agosto de 1980-diciembre de 2010. Sin embargo, la variabilidad –medida por el CV%- es prácticamente igual (Tabla 31).

Tabla 31. Estadísticos de la fPAR mensual según ecoregión. Período agosto de 1980 a diciembre de 2010. Para todo el período se indican los datos disponibles y los faltantes			
Estadísticos	Basalto Superficial	Sierras del Este	
Datos disponibles	5803	4393	
Datos faltantes	434	320	
Media	0,306	0,340	
Desvío estándar	0,090	0,096	
Mínimo	0,034	0,043	
Máximo	0,608	0,645	
Percentiles			
	10	0,189	0,216
	25	0,425	0,271
	50	0,305	0,339
	75	0,369	0,412
	90	0,425	0,463
CV	29%	28%	

Fuente: elaboración propia

5.4.2 Variación mensual de fPAR

Se analizaron los patrones de variación mensual media de la fPAR para Basalto Superficial y Sierras del Este (Figura 19). Se observan curvas bimodales, con picos a fin de primavera y otoño. Los valores en Sierras del Este están por encima de Basalto Superficial en todos los meses. Las barras de error en el Figura 37 señalan que las productividades entre ambas regiones son significativamente distintas, desde el punto de vistas estadístico, en el período octubre - abril. Las mayores distancias, a favor de Sierras del Este se observan en diciembre y en segundo lugar en noviembre.

En Basalto Superficial los máximos se observan en abril y noviembre, mientras que en Sierras del Este los máximos se observan en abril y noviembre-diciembre. Se destaca que en Basalto Superficial la fPAR cae fuertemente en diciembre, cosa que en Sierras del Este ocurre un mes más tarde. En promedio del período octubre-abril (que es el que presenta diferencias significativas entre ecoregiones, como muestra la Figura 19) la fPAR de Sierras del Este es 17% mayor que la de Basalto. En diciembre, esa diferencia promedio a favor de Sierras del Este alcanza a 44%.

Los mínimos se producen en ambas regiones al final del invierno (Agosto)

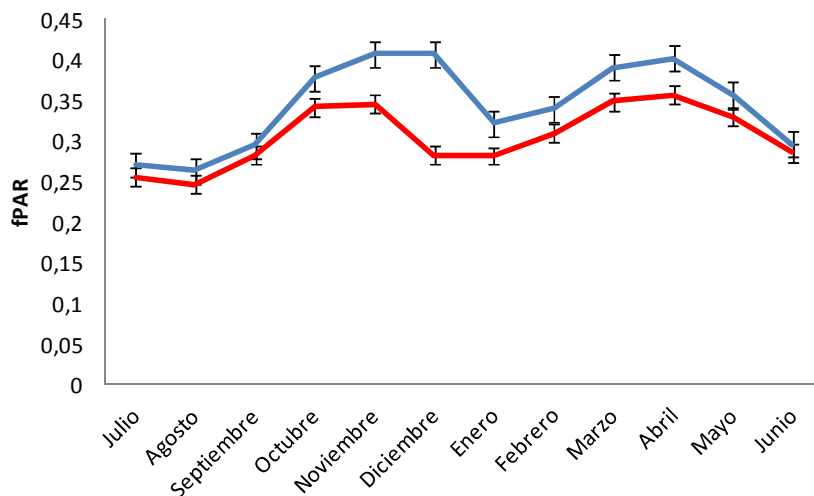


Figura 19. fPAR media por mes, según ecoregión (1980-2010), con barras de error estándar. La línea roja corresponde a Basalto Superficial y la azul a Sierras del Este. Fuente: elaboración propia

5.4.3 fPAR en el período de mayor crecimiento de las pasturas

La mayor parte de la suma de la fPAR anual se concentra en primavera, verano y otoño. A los efectos de analizar este período se toman los cinco meses que transcurren desde noviembre a marzo, que acumulan el 43% y el 45% de la fPAR anual para Basalto Superficial y Sierras del Este, respectivamente. Este período no solo es relevante en términos de aporte a la producción de forraje anual, sino también para la producción secundaria vacuna y ovina, en términos productivos y reproductivos (amamantamiento, ganancia de peso de las hembras previo al entore y encarnerada, destete, etc.). Dado que el invierno representa por su baja PPNA una época limitante en los sistemas ganaderos pastoriles en Uruguay, el manejo busca hacer coincidir las etapas de mayores requerimientos de los animales con el período de mayor PPNA.

En el caso de Basalto Superficial (Tabla 32) se observa que la media y la mediana por SP son semejantes a lo largo de todas las SP, en el eje de 1,5, salvo en las SP de Tacuarembó, donde resulta sustancialmente más alta. No es posible en el marco de esta tesis profundizar en las razones de estos valores más elevados en Tacuarembó, que podrían resultar de una combinación de factores edáficos, mayor "estivalidad" de la producción de materia seca y/o diferente uso de la tierra (por ejemplo presencia de plantaciones forestales en SP que siendo predominantemente de basalto superficial presenten áreas de areniscas forestadas). Media y mediana se muestran prácticamente coincidentes, lo que sugiere que a diferencia de la precipitación, la función de distribución de fPAR sería simétrica. El percentil 10 resulta en valores absolutos alrededor de 34 % más bajos que la mediana, lo que significaría reducciones de similar magnitud y muy importantes en la oferta forrajera cuando se dan los extremos.

Tabla 32. Estadísticos de fPAR del período noviembre-marzo (1980-2010) por departamento y sección policial de Basalto Superficial.					
Depto/SP	Media	Mediana	Percentil 10	Desvío estándar	Coficiente de variación
Artigas SP3	1,587	1,597	1,062	0,327	21%
Artigas SP4	1,587	1,597	1,062	0,327	21%
Artigas SP5	1,645	1,711	1,201	0,337	21%
Artigas SP9	1,528	1,575	0,975	0,376	25%
Artigas SP10	1,422	1,458	0,900	0,357	25%
Artigas SP11	1,591	1,654	1,024	0,352	22%
Artigas SP12	1,513	1,550	0,968	0,373	25%
Paysandú SP9	1,433	1,486	0,931	0,334	23%
Salto SP10	1,499	1,558	0,950	0,352	23%
Salto SP11	1,586	1,623	0,972	0,366	23%
Salto SP12	1,467	1,561	0,973	0,329	22%
Salto SP13	1,452	1,549	0,891	0,358	25%
Salto SP14	1,461	1,527	0,942	0,349	24%
Salto SP15	1,564	1,601	1,042	0,370	24%
Salto SP16	1,455	1,542	0,857	0,352	24%
Tacuarembó SP 13	2,009	2,006	1,546	0,306	15%
Tacuarembó SP6	1,784	1,842	1,218	0,351	20%
Media	1,564	1,614	1,030		22%
Porcentaje		100	63,8		

Fuente: elaboración propia

En Sierras del Este (Tabla 33) los valores de la media y la mediana de fPAR del período noviembre-marzo son superiores a los de Basalto Superficial. Se observan los valores más bajos en Lavalleja, comparado con Maldonado y Rocha. La media y mediana son también prácticamente coincidentes, lo que sugiere semejantes conclusiones que para el Basalto Superficial en relación a la simetría de la distribución. En general los valores de fPAR en esta ecoregión están por encima de los de Basalto Superficial, en un orden de 20%. El percentil 10 resulta en valores absolutos alrededor de 25 % más bajo que la mediana, lo que significaría reducciones de similar magnitud y muy importantes en la oferta forrajera cuando se dan los extremos. Es interesante observar que las reducciones en la fPAR asociadas al percentil 10 son bastante menores en Sierras del Este (alrededor de 25%) que en Basalto Superficial. Esto vuelve a confirmar la menor severidad de las situaciones de alto DH relativo en Sierras del Este.

Tabla 33. Estadísticos de fPAR del período noviembre-marzo (1980-2010) por departamento y sección policial de Sierras del Este.					
Depto/SP	Media	Mediana	Percentil 10	Desvío estándar	Coficiente de variación
Lavalleja SP3	1,533	1,536	1,041	0,340	22%
Lavalleja SP5	1,793	1,872	1,127	0,481	27%
Lavalleja SP6	1,720	1,712	1,247	0,362	21%
Lavalleja SP7	1,718	1,724	1,338	0,301	17%
Lavalleja SP8	1,730	1,721	1,267	0,340	20%
Lavalleja SP14	1,548	1,542	1,192	0,267	17%
Maldonado SP4	1,853	1,820	1,524	0,299	16%
Maldonado SP8	1,830	1,870	1,392	0,347	19%
Rocha SP2	1,859	1,897	1,423	0,318	17%
Rocha SP4	1,918	1,891	1,474	0,320	17%
Rocha SP8	1,923	1,868	1,515	0,313	16%
Rocha SP10	1,830	1,840	1,418	0,329	18%
Rocha SP12	1,892	1,871	1,524	0,294	16%
Media	1,780	1,782	1,345		19%
Porcentaje		100	75,5		

Fuente: elaboración propia

La Figura 20 ilustra las diferencias entre ambas regiones en los valores de fPAR de la mediana y el percentil 10. Las barras de error estándar muestran que las diferencias son significativas.

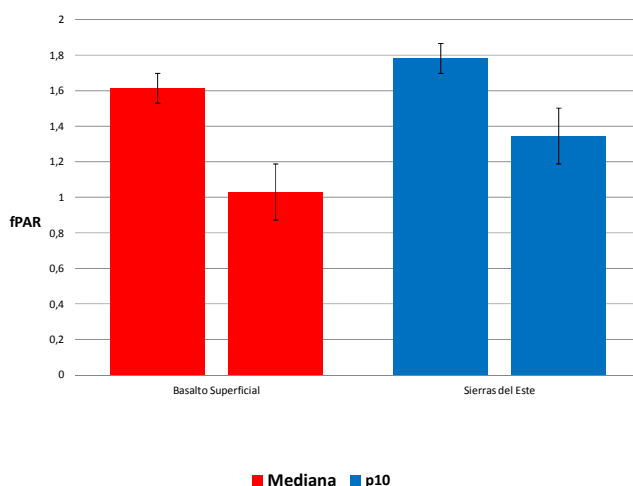


Figura 20. Mediana y percentil 10 de fPAR en las ecoregiones como un todo (1980-2010). Fuente: elaboración propia.

5.4.4 Correlación entre DH y fPAR

Se estudió la correlación entre el DH acumulado y la fPAR acumulada del período noviembre – marzo. Los resultados (Tabla 34) muestran que en Basalto Superficial existe una correlación fuertemente negativa entre DH y fPAR, del orden de -0,6 a -0,8. Para las 17 SP, la correlación en el período 1980 a 2010 resultó significativa ($p < 0,01$).

En Sierras del Este se encontró un patrón totalmente distinto. Once de las trece secciones policiales tienen correlación positiva entre DH y fPAR, pero ningún valor de “r” resultó estadísticamente significativo. Se probaron otros períodos como: setiembre-noviembre y diciembre-abril, pero tampoco se encontraron correlaciones estadísticamente significativas entre DH y fPAR en Sierras del Este. No resulta clara la explicación de la falta de correlación entre DH y fPAR en Sierras del Este. Algunas hipótesis que se pueden avanzar y que merecen mayor estudio son: a) en Basalto Superficial no hay capacidad *buffer* en los suelos ante falta de precipitación; b) En Sierras del Este el movimiento del relieve (la topografía) redistribuye el agua en el paisaje y esto puede amortiguar los efectos de la falta de precipitación; c) en Sierras del Este hay mayor cobertura boscosa y los árboles son capaces de tomar agua de las fisuras de las rocas cristalinas y aprovechar la alta luminosidad asociada a períodos de alto DH; d) mayor cobertura boscosa nativa y plantaciones forestales distorsionan los resultados.

Tabla 34. Correlación de Pearson entre déficit hídrico edáfico en mm y fPAR en Basalto Superficial y Sierras del Este para el período Noviembre - Marzo (1980/81-2009/10)					
Basalto superficial	r	Sig (a dos colas)	Sierras del este	r	Sig (a dos colas)
Artigas SP03	-0,561	**	Lavalleja SP3	0,263	N/S
Artigas SP04	-0,562	**	Lavalleja SP5	0,230	N/S
Artigas SP05	-0,792	**	Lavalleja SP6	0,274	N/S
Artigas SP09	-0,825	**	Lavalleja SP7	0,223	N/S
Artigas SP10	-0,754	**	Lavalleja SP8	0,212	N/S
Artigas SP11	-0,790	**	Lavalleja SP14	0,071	N/S
Artigas SP12	-0,612	**	Maldonado SP4	0,215	N/S
Salto SP10	-0,741	**	Maldonado SP8	-0,291	N/S
Salto SP11	-0,714	**	Rocha SP2	0,206	N/S
Salto SP12	-0,608	**	Rocha SP4	-0,314	N/S
Salto SP13	-0,621	**	Rocha SP8	0,149	N/S
Salto SP14	-0,772	**	Rocha SP10	0,306	N/S
Salto SP15	-0,679	**	Rocha SP12	0,080	N/S
Salto SP16	-0,681	**			
Paysandú SP09	-0,689	**			
Tacuarembó SP06	-0,752	**			
Tacuarembó SP13	-0,707	**			

** = Significativo al 0,01. N/S = no significativo al 0,05.

Fuente: elaboración propia

5.4.5 Tendencias en la mediana y los eventos extremos de mínima

Uno de los objetivos específicos de esta investigación es detectar tendencias significativas en los eventos extremos de las variables principales del análisis. Se realizó el análisis de tendencias de la mediana y el percentil 10 utilizando la técnica de regresión por cuantiles (Figuras 21a y 21b).

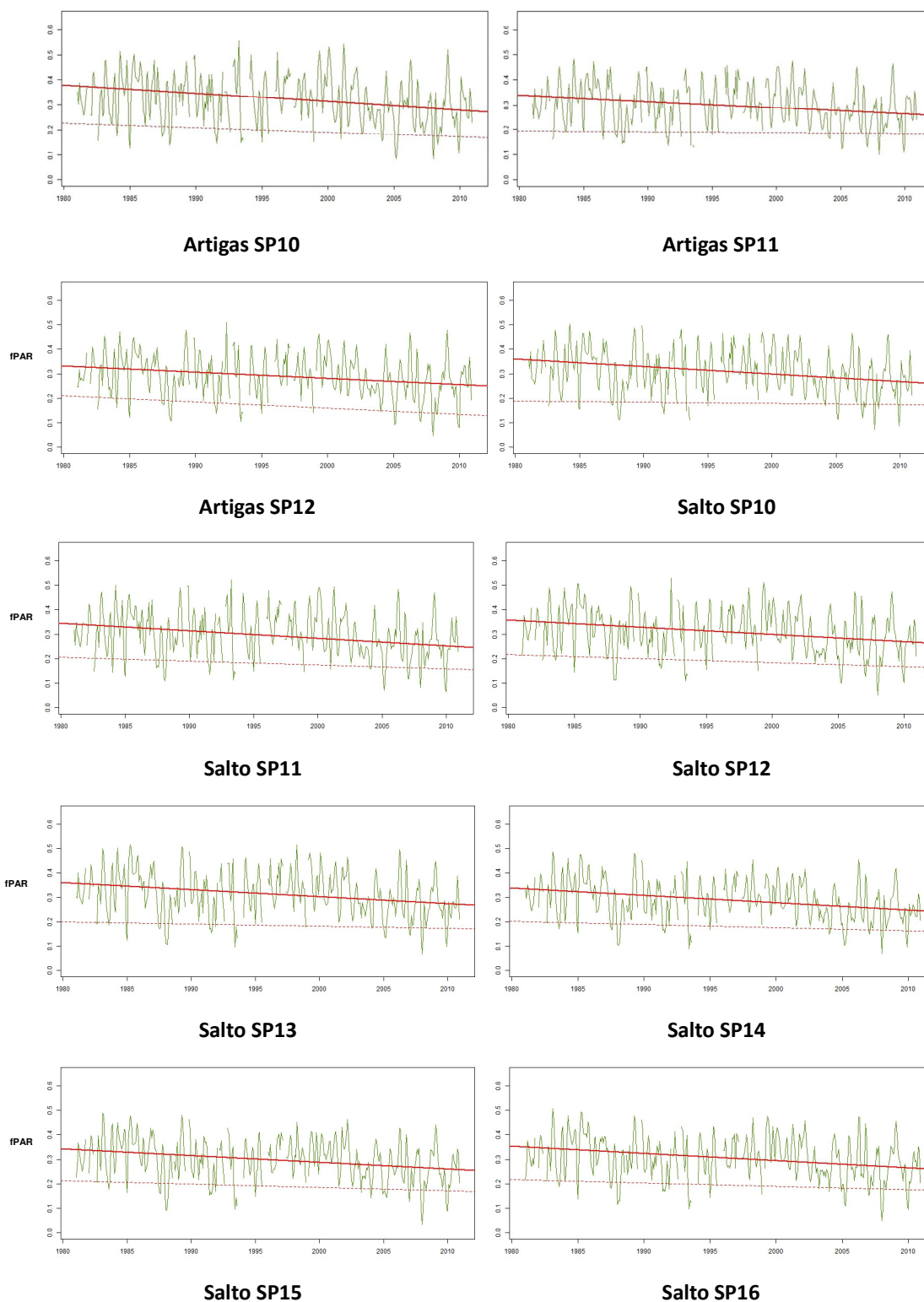
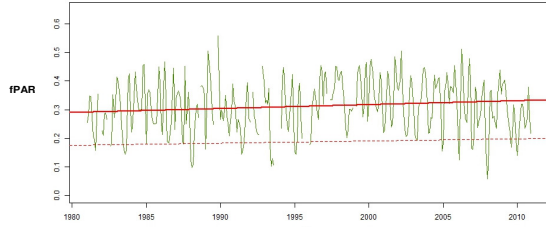
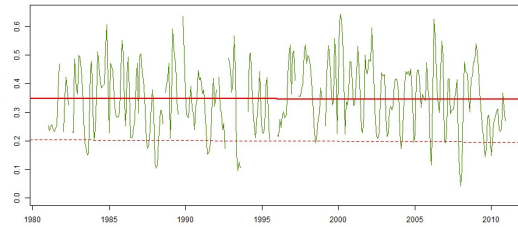


Figura 21a. Gráficos de la regresión por cuantiles de la mediana (línea roja llena) y el percentil 10 (línea roja punteada) de fPAR para el período 1980-2010 en secciones policiales de Basalto Superficial. Fuente: elaboración propia.

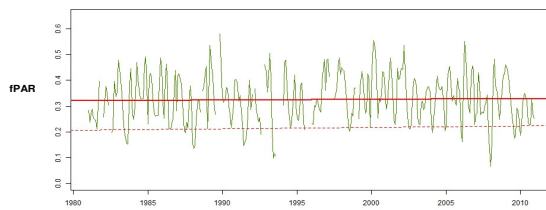
Lavalleja SP 3



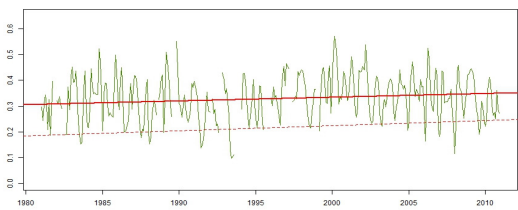
Lavalleja SP 5



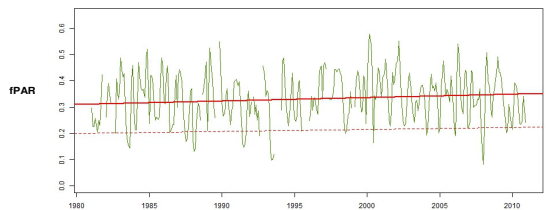
Lavalleja SP6



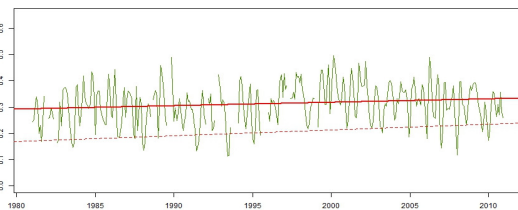
Lavalleja SP7



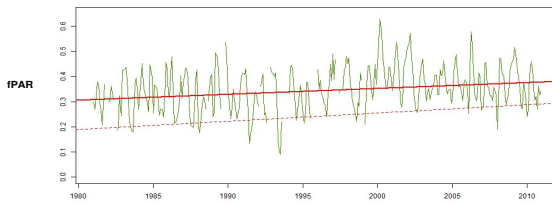
Lavalleja SP8



Lavalleja SP14



Maldonado SP 4



Maldonado SP8

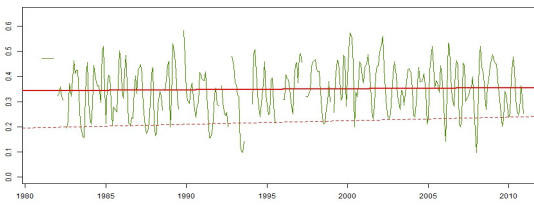


Figura 21b. Gráficos de la regresión por cuantiles de la mediana (línea roja llena) y el percentil 10 (línea roja punteada) de fPAR para el período 1980-2010 en secciones policiales de Sierras del Este.

Se observa que todas las SP del Basalto Superficial, a excepción de las SP de Tacuarembó (6 y 13) exhiben una tendencia decreciente en la recta de regresión mediana y en el percentil 10 de la fPAR contra el tiempo. En Sierras del Este la tendencia es la opuesta (salvo en la sección 5 de Lavalleja), crecen tanto la mediana como el percentil 10, sugiriendo una tendencia al aumento de la fPAR y a la disminución de la magnitud absoluta de los valores extremos (típico del eucalipto). Se acorta en algunos casos la distancia entre p10 y p50.

En Basalto Superficial las tendencias del percentil 10 no resultaron estadísticamente significativas (al 5%) en 11 de las 17 SP y resultaron significativas en las seis restantes. En el caso de la mediana, la tendencia decreciente en fPAR resultó estadísticamente significativa (al 5%) en todas las SP (Tabla 35). En consecuencia, medida con una significación de 5% no parece haber una tendencia generalizada de disminución de los valores extremos de fPAR, pero sí se constata una tendencia a la reducción en la mediana de la fPAR, o sea una pérdida de productividad media de los pastizales de esta ecoregión.

En Sierras del Este las tendencias crecientes del percentil 10 resultaron estadísticamente significativas (al 5%) en 10 de las 13 SP. En el caso de la mediana, la tendencia generalizada creciente en fPAR resultó estadísticamente significativa (al 5%) en siete de las 13 SP (Tabla 35). En consecuencia, y a diferencia del Basalto Superficial, en Sierras del Este hay en términos generales una tendencia que es significativa en términos estadísticos al aumento de la fPAR, o sea un aumento de la productividad media de los ecosistemas de esta ecoregión, así como un aumento de la magnitud absoluta de los valores extremos de mínima. Una posible explicación de estos resultados podría ser el fuerte avance de la forestación industrial con eucaliptos en las Sierras del Este. Entre 2000 y 2010, según las estadísticas que publica la Dirección General Forestal del MGAP ([http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx?7,20,441,O,S,0,MNU;E;134;2;MNU;,"](http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx?7,20,441,O,S,0,MNU;E;134;2;MNU;,)) se plantaron 92.456 ha de árboles en Lavalleja, Maldonado y Rocha. Si bien se eliminaron las SP con alta proporción de deforestación al 2006, es posible que el efecto de los árboles sobre la fPAR por SP haya permanecido.

Tabla 35. Pendiente de la recta de la regresión por cuantiles (b) para el percentil 10 y la mediana (p50) de fPAR, en Basalto Superficial y significación estadística al 5%. Período 1949-2010.				
Sección policial	b; p10	Significación	b; p50	Significación
Artigas SP03	-0,0003	N/S	-0,0020	S
Artigas SP04	-0,0003	N/S	-0,0020	S
Artigas SP05	-0,0020	N/S	-0,0003	S
Artigas SP09	-0,0003	N/S	-0,0020	S
Artigas SP10	-0,0030	S	-0,0020	S
Artigas SP11	-0,0004	N/S	-0,0003	S
Artigas SP12	-0,0020	N/S	-0,0003	S
Salto SP10	-0,0010	S	-0,0003	S
Salto SP11	-0,0010	N/S	-0,0003	S
Salto SP12	-0,0010	N/S	-0,0003	S
Salto SP13	-0,0010	S	-0,0003	S
Salto SP14	-0,0010	N/S	-0,0003	S
Salto SP15	-0,0020	S	-0,0003	S
Salto SP16	-0,0020	S	-0,0003	S
Paysandú SP09	-0,0020	S	-0,0003	S
Tacuarembó SP06	-0,0001	N/S	-0,0020	S
Tacuarembó SP13	-0,0030	N/S	-0,0010	S

Fuente: elaboración propia

Tabla 36. Pendiente de la recta de la regresión por cuantiles (b) para el percentil 90 y la mediana (p50) de fPAR, en Sierras del Este y significación estadística al 5%. Período 1949-2010.				
Sección policial	b; p10	Significación	b; p50	Significación
Lavalleja 03	0,0010	N/S	0,0010	S
Lavalleja 05	-0,0003	N/S	-0,0002	N/S
Lavalleja 06	0,0010	N/S	0,0002	N/S
Lavalleja 07	0,0020	S	0,0010	N/S
Lavalleja 08	0,0010	S	0,0010	N/S
Lavalleja 14	0,0020	S	0,0010	S
Maldonado 04	0,0030	S	0,0020	S
Maldonado 08	0,0010	S	0,0004	N/S
Rocha 02	0,0020	S	0,0010	N/S
Rocha 04	0,0040	S	0,0030	S
Rocha 08	0,0030	S	0,0030	S
Rocha 10	0,0010	S	0,0020	S
Rocha 12	0,0040	S	0,0030	S

Fuente: elaboración propia

5.5 Análisis de las existencias ganaderas

5.5.1 Eventos típicos y dispersión

Los principales estadísticos de la carga animal se presentan discriminados por ecoregión en la Tabla 37. Los valores de carga media del período 1991 a 2010 son 7% más altos en Sierras del Este que en Basalto Superficial, lo que resulta consistente, aunque menos que proporcional, con la mayor fPAR observada en aquella ecoregión.

Tabla 37. Estadísticos de la carga animal por ecoregión en Basalto Superficial y Sierras del Este, en unidades ganaderas por hectárea. Junio de 1991 a junio de 2010				
	A. Basalto superficial	B. Sierras del este	C. Cociente B/A	
Media	0,65	0,69	1,07	
Desvío estándar	0,06	0,07	1,18	
Rango	0,30	0,39	1,30	
Mínimo	0,50	0,48	0,96	
Máximo	0,80	0,87	1,08	
Percentiles	25	0,61	0,65	1,07
	50	0,65	0,70	1,08
	75	0,69	0,73	1,07
C.V. %	9%	10%	1,10	

Fuente: elaboración propia

Las SP de ambas ecoregiones muestran diferencias en su carga por hectárea (Figuras 21 y 22). Destacan por mayor carga absoluta las secciones 12 de Artigas en Basalto y 4 de Rocha. Por menor carga absoluta destacan las secciones 13 de Salto y 9 de Paysandú, en Basalto Superficial, y la sección 2 de Rocha en Sierras de Este.

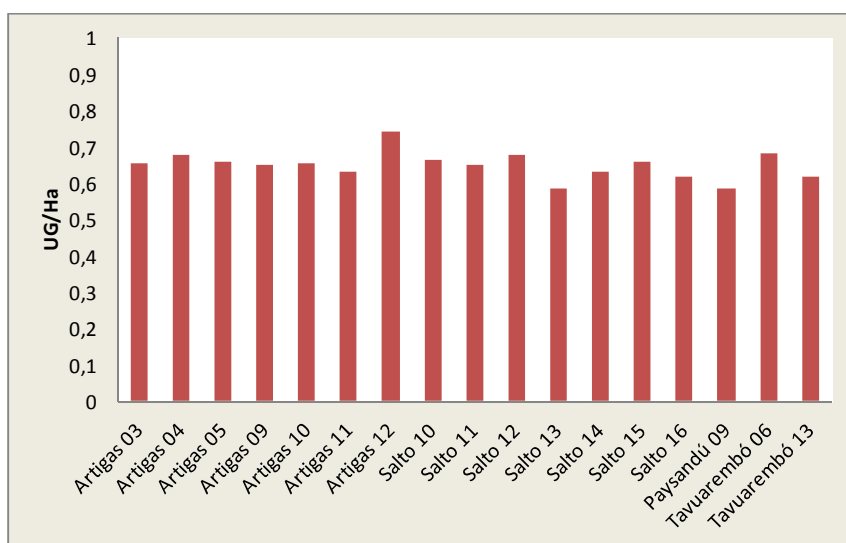


Figura 22. Carga animal media en secciones policiales de Basalto Superficial, en unidades ganaderas por hectárea. Fuente: elaboración propia

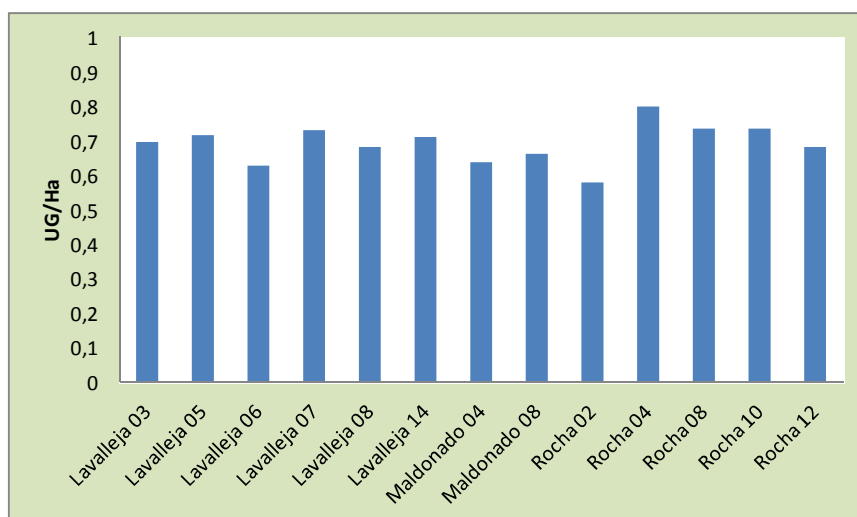


Figura 23. Carga animal media en secciones policiales de Sierras del Este, en unidades ganaderas por hectárea. Fuente: elaboración propia

5.5.2 Evolución temporal en las dos regiones

La evolución de la carga para todo el Basalto Superficial en el período 1991 a 2010, revela ciclos de aumento (1991 a 1994; 2000 a 2005) y de fuerte caída (1995-2000) (Figura 23). En esta ecoregión, luego de la fuerte caída de 1995 a 2009, no se volvieron a retomar los niveles de carga anteriores. En Sierras del Este, por su parte, se observan comportamientos cíclicos en la carga animal pero más suaves que en Basalto Superficial.

El análisis de coeficiente de correlación (Pearson) arrojó valores de “r” que indican una débil asociación entre carga y año (0,28 en Basalto Superficial y 0,194 en Sierras del Este). El R² de la regresión lineal muestra, en las Sierras del Este que este modelo explica el 43% de la varianza en las existencias, mientras que en Basalto Superficial R² explica solo el 23% de la varianza (Figura 24).

La tendencia de la carga animal, medida por la regresión lineal, ha sido descendente en el período 1991-2010 para ambas ecoregiones. La pendiente de la recta arrojó valores de -0.03 en Basalto Superficial y -0.02 en Sierras del Este. Realizados los test de significación ambas tendencias resultaron estadísticamente significativas al 1%, tanto en Basalto Superficial (p-valor = 0,000) como en Sierras del Este (p-valor = 0.002). La tendencia descendente en la carga en el Basalto Superficial puede estar asociada a una disminución de la capacidad de carga por menor PPNA. La reducción de la carga en Sierras del Este, por su parte, puede estar asociada a cambios en el uso de la tierra (expansión de las plantaciones forestales).

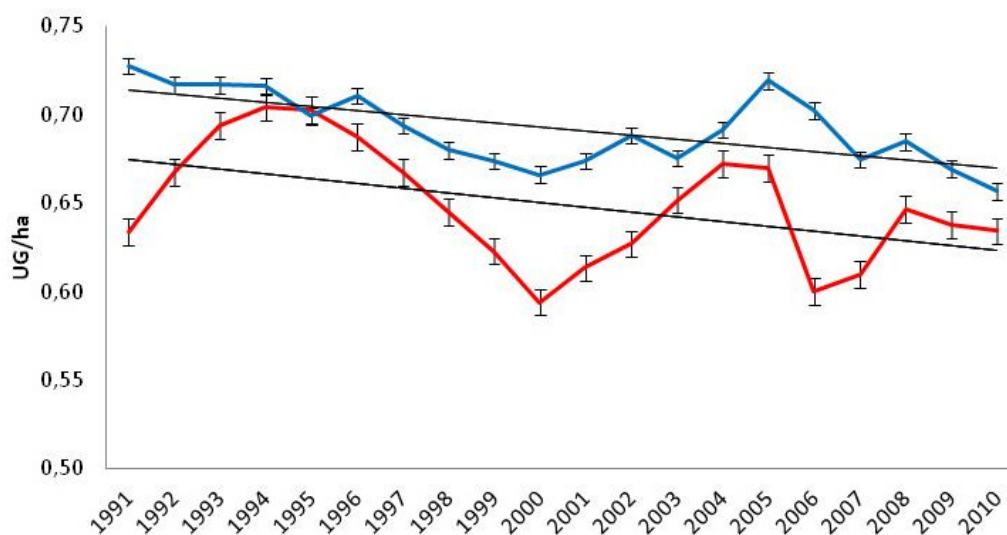


Figura 24. Tendencia de la carga animal media anual según región en UG/ha. 1991-2010. La línea roja representa el Basalto Superficial y la azul las Sierras del Este. La ecuación de regresión lineal para Basalto Superficial es $y = -0,0027x + 0,6778$, con $R^2 = 0,2341$. La ecuación de regresión lineal para Sierras del Este es $y = -0,0023x + 0,716$, con $R^2 = 0,4259$. Fuente: elaboración propia

5.5.3 Relaciones entre carga animal y DH

La correlación entre el DH medio anual y las existencias para el período 1991-2010 arroja valores diferentes según el período de retardo. Los resultados (Tabla 38) señalan que la correlación varía con la duración del período de retardo.

Tabla 38. Coeficiente de correlación (Pearson) del déficit hídrico edáfico versus carga en UG/ha, con distintos retardos.				
	Basalto Superficial	Significación 5%	Sierras del Este	Significación 5%
r DH_t - Carga_{t+1}	-0,24	N/S	-0,12	N/S
r DH_t - Carga_{t+2}	-0,31	N/S	-0,22	N/S
r DH_t - Carga_{t+3}	-0,12	N/S	-0,36	N/S

N/S = no significativo al 5%

Fuente: elaboración propia

En Basalto Superficial se observa que el grado de asociación entre ambas variables aumenta cuando se pasa de uno a dos años de retardo en el DH, pero no así cuando el retardo es de tres años. En las Sierras del Este, el grado de asociación aumenta cuando aumenta el rezago desde uno a dos y a tres años. Se estudió la significación estadística de estas correlaciones, y en ningún caso resultaron significativas al 5%, lo que no permite identificar que el déficit DH sea un forzante significativo de la carga en ninguna de las dos ecoregiones.

5.5.4 Relaciones entre PPNA y carga animal

Se analizaron las relaciones temporales entre la suma anual de la fPAR mensual y la carga animal por hectárea para el período 1991 a 2010. Se hizo el análisis para los valores de ambas variables en el mismo año y para un rezago de un año (fPAR de un año y carga del año siguiente). Tanto para Basalto Superficial como para Sierras del Este se encontraron correlaciones negativas entre fPAR y carga. Como no es posible pensar que el aumento de la PPNA influya negativamente en la carga, cabe concluir que la carga no está determinada principalmente por la PPNA, sino por otros factores.

5.6 Relaciones entre variabilidad de la precipitación, déficit hídrico edáfico, PPNA y existencias

Uno de los objetivos de esta investigación es aportar a la comprensión de las relaciones entre variables del marco físico (precipitación P y déficit hídrico edáfico DH), con la producción primaria neta (utilizando fPAR como *proxy*) y la producción secundaria (estimada por la carga en unidades ganaderas UG por hectárea) en ecosistemas de pastizales a escala de paisaje. Para eso se caracterizaron las relaciones entre las variables en términos de variabilidad, buscando visualizar si la variabilidad en un nivel de la cadena se amortigua o amplifica en el siguiente nivel.

Se calcularon los valores del coeficiente de variación para las cuatro variables señaladas, y se graficaron los valores para cada sección policial en el período 1990/91 a 2009/10, que es el período para el cual se cuenta con datos para las cuatro variables, tomando las variables de a pares. Se utilizó una asociación de tipo jerárquico:

P → DH

DH → fPAR

fPAR → UG/ha

Los resultados se presentan en las Figuras 25 a 30 para las dos ecoregiones por separado.

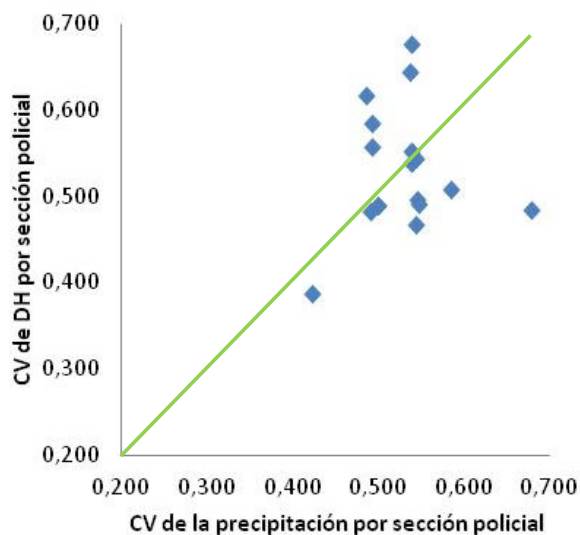


Figura 25. Gráfico de los coeficientes de variación (desvío estándar dividido por la media) de la precipitación y el déficit hídrico edáfico acumulados de noviembre a marzo de 17 secciones policiales de Basalto Superficial, en el período 1990/91 a 2009/10. Fuente: elaboración propia

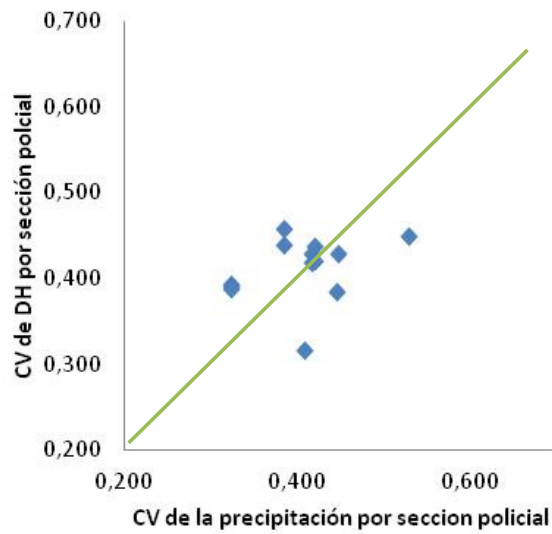


Figura 26. Gráfico de los coeficientes de variación (desvío estándar dividido por la media) de la precipitación y el déficit hídrico edáfico acumulados de noviembre a marzo de 13 secciones policiales de Sierras del Este, en el período 1990/91 a 2009/10. Fuente: elaboración propia

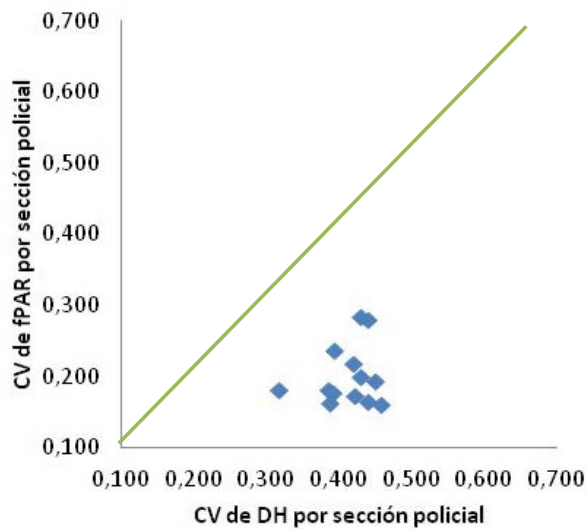


Figura 27. Gráfico de los coeficientes de variación (desvío estándar dividido por la media) del déficit hídrico edáfico y la fPAR acumulada de noviembre a marzos, de 17 secciones policiales de Basalto Superficial, en el período 1990/91 a 2009/10. Fuente: elaboración propia

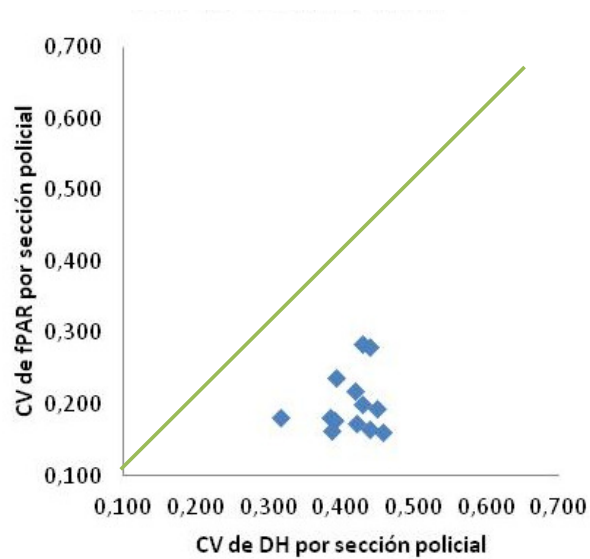


Figura 28. Gráfico de los coeficientes de variación (desvío estándar dividido por la media) del déficit hídrico edáfico y la fPAR acumulada de noviembre a marzo, de 13 secciones policiales de Sierras del Este, en el período 1990/91 a 2009/10. Fuente: elaboración propia.

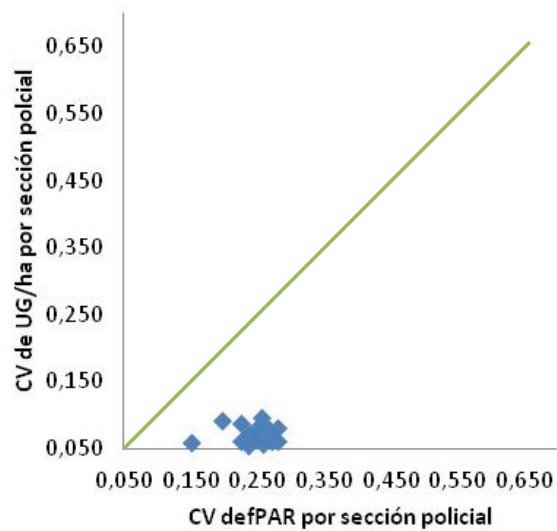


Figura 29. Gráfico de los coeficientes de variación (desvío estándar dividido por la media) de la fPAR acumulada de noviembre a marzo y la carga animal por hectárea en unidades ganaderas, de 17 secciones policiales de Basalto Superficial, en el período 1990/91 a 2009/10. Fuente: elaboración propia

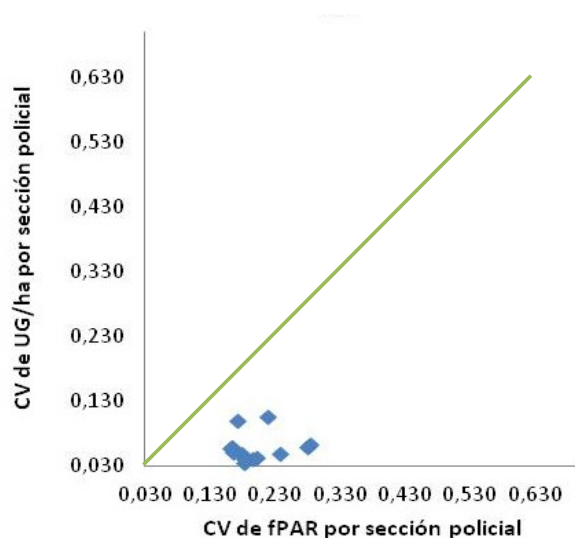


Figura 30. Gráfico de los coeficientes de variación (desvío estándar dividido por la media) de la fPAR acumulada de noviembre a marzo y la carga animal por hectárea en unidades ganaderas, de 13 secciones policiales de Sierras del Este, en el período 1990/91 a 2009/10. Fuente: elaboración propia

La observación de las Figuras 25 a 30 permite destacar algunos resultados:

P-DH:

Tanto en Basalto Superficial como Sierras del Este en variabilidad de la precipitación no tiene un patrón homogéneo de amortiguación o amplificación en el déficit hídrico edáfico; en algunas secciones policiales ocurre un efecto y en otras el opuesto.

DH-fPAR:

En ambas ecoregiones la variabilidad del DH edáfico resulta claramente amortiguada en la fPAR, lo que pone de manifiesto la capacidad de la vegetación del pastizal, por distintos mecanismos fisiológicos y morfológicos, de soportar variaciones del DH edáfico. Esta capacidad refleja en alguna medida la adaptación y resiliencia de este tipo de vegetación ante la variabilidad climática.

fPAR-Carga animal:

La variabilidad de la fPAR resulta fuertemente amortiguada en la carga animal. A diferencia de los niveles anteriores, que son ecosistémicos, la variabilidad en el nivel fPAR-Carga confronta el sistema natural (fPAR) con el sistema social (las decisiones de los productores en relación a la carga).

Para el conjunto de la cadena P-DH-fPAR-carga, se observa una tendencia global al amortiguamiento de la variabilidad, lo que es una fuente de estabilidad de los sistemas.

6.1 Tendencias en las precipitaciones

El análisis del comportamiento de la precipitación acumulada de primavera muestra aumento en el período de sesenta y tres años considerado (1948-2010). Los resultados son consistentes con estudios regionales disponibles que muestran un aumento de la precipitación en el sudeste de Sudamérica, sobre todo en primavera. Sin embargo en esta tesis solo en siete de 24 estaciones meteorológicas se encontraron evidencias de significación estadística en la pendiente de la recta de regresión. En las restantes estaciones meteorológicas de distintas regiones del país la pendiente de la recta de regresión lineal no resultó significativa, por lo que el comportamiento creciente observado podría ser atribuido al azar. La mediana de las tres décadas más recientes resultó casi un 20% mayor que la de los 30 años anteriores y los eventos extremos, representados por los percentiles 10 y 90 de P, están a un orden de magnitud de distancia (o sea que los primeros son diez veces mayores que los segundos). Los estudios realizados en el marco del proyecto AIACC (2006) señalaron que “en términos generales se ha determinado un incremento de la lluvia promedio anual (en el período 1931 a 2000). Dicho efecto se manifiesta fundamentalmente en el período comprendido entre los meses de octubre y febrero” y muestra incrementos en la precipitación al comparar la primera mitad del período con la segunda. En ese sentido, los resultados de esta tesis muestran también aumentos en la mediana de la precipitación al comparar dos períodos consecutivos de 30 años.

El estudio de la correlación de la lluvia acumulada mensual entre 24 estaciones encontró que ésta es estadísticamente significativa para todos los pares de estaciones, pero que la magnitud de la correlación decrece con la distancia a una tasa media de 10 % cada 100 km. A paso mensual, los acumulados de precipitación tienen una asociación fuerte en el Uruguay y el grado de asociación entre sitios muy cercanos es mucho mayor que entre sitios alejados. Se concluye que en Uruguay la lluvia acumulada mensual tiene en todos los meses un patrón de distribución caracterizado por valores similares entre sitios cercanos, y valores de correlación más baja entre sitios separados por distancias importantes.

La exploración de cambios en la variabilidad de la lluvia acumulada mensual usando el coeficiente de variación no encontró señales claras de aumento. Analizada por décadas la variabilidad mostró aumentos y disminuciones cíclicas. No se encontraron evidencias de aumento en la variabilidad de la lluvia; incluso, cuando se compararon dos períodos consecutivos de 30 años. En la mayoría de las estaciones sinópticas el CV de la segunda treintena es menor que el de la primera. Desde el punto de vista de la disponibilidad hídrica para recarga de agua en el perfil de los suelos el conjunto de resultados significa, en la serie

de tiempo analizada, que ésta sería mayor y menos variable en los últimos 30 años comparado con los 30 años precedentes.

Asimismo, al estudiar la variabilidad de las precipitaciones se encontró que la componente interanual predomina fuertemente sobre la variabilidad medida a escalas mayores (decádica y tendencia de largo plazo). En términos de estrategias de adaptación en pastizales, los resultados sugieren que es mucho más importante adaptarse a la variabilidad interanual que a las tendencias de largo plazo (cambio climático).

6.2 Tendencias en el déficit de hídrico edáfico

Los análisis realizados muestran una tendencia descendente del DH anual acumulado de noviembre a marzo, en ambas ecoregiones, tanto en la mediana como en el percentil 90 (déficit extremo). Estas tendencias, sin embargo, no son estadísticamente significativas en Basalto Superficial para ambos estadísticos, mientras que en Sierras del Este resultan marginalmente significativas. De esta forma, se puede afirmar que los suelos de estas regiones no habrían presentado una tendencia a mayor DH edáfico en el período analizado. Esta conclusión, sobre el largo plazo, no se contradice sin embargo con la existencia de eventos muy extremos de DH, como los que se experimentaron de manera frecuente en la década del 2000.

El DH medio mensual en Basalto Superficial está por encima del de Sierras del Este de agosto a febrero, y está por debajo de marzo a julio. Sin embargo, desde un punto de vista estadístico, ambas regiones resultaron estadísticamente diferentes solo en los meses noviembre y diciembre. Los resultados sugieren que en Sierras del Este, comparado con Basalto Superficial, las primaveras y los veranos tenderían a ser más húmedos y los otoños más secos. Es posible que en estos resultados incida que en verano la ETP en el Norte es más alta que en el Este, mientras que en invierno ocurre a la inversa.

Se encontró que la variabilidad del DH es mínima en verano y máxima en invierno. Esto sugiere que los veranos tienden a ser consistentemente secos, pero que los inviernos son más variables en su nivel de DH, sin que eso implique niveles de estrés para la plantas. Desde el punto de vista de la gestión de riesgos de DH, esto significa que la probabilidad de alto DH estival es elevada, y por lo tanto sistemas productivos poco vulnerables serán los que estén adaptados a pasar por estas condiciones. Como cabía esperar, la correlación entre DH y P es negativa, pero es interesante verificar que resulta significativa al 0,01, para ambas ecoregiones, y que es particularmente fuerte en verano ($r > 0,8$).

La dispersión de los datos y los extremos de DH son mayores en Basalto Superficial que en Sierras del Este, lo que señala el primero tiene mayor riesgo climático. La lluvia acumulada mensual resultó un pobre indicador del DH del mismo mes, sin embargo la lluvia por estación del año y el DH estacional si tiene una correlación negativa. Sin embargo la amplitud del

intervalo temporal (paso mensual) sugiere relativizar esta conclusión, ya que la lluvia no se distribuye homogéneamente en un mes; por ejemplo un mes de bajo DH puede coincidir con mes de alta precipitación en el que la lluvia se da los últimos días.

Para las dos ecoregiones la autocorrelación de DH es en general fuerte con el mes anterior, pero se debilita en el segundo mes y tiende a 0 desde el tercer mes previo. Estos resultados sugieren la relativamente escasa presencia de períodos muy prolongados de DH severo. Se verificó una correlación fuertemente negativa y estadísticamente significativa entre DH y fPAR, del orden de -0,6 a -0,8, para el período noviembre-abril en las SP de la ecoregión del Basalto Superficial. En Sierras del Este, en cambio, no se encontró un patrón comparable.

El Basalto Superficial presenta valores máximos extremos (percentil 90) del DH mayores que Sierras del Este, con los máximos en promedio en enero. En cuanto a la variabilidad del DH por ecoregión, los mayores valores del coeficiente de variación se observan en junio y julio y los menores en enero y diciembre, lo que señala que los veranos son más consistentemente secos. Los valores de DH en los meses del otoño en Sierras del Este tienden a ser más altos que en Basalto Superficial. Se observó que al interior de ambas ecoregiones las correlaciones entre el DH de las secciones policiales son altas y estadísticamente significativas, lo que habla de que déficit en una sección policial se asocia positivamente con déficit en las otras de la misma ecoregión.

En las dos regiones estudiadas, el DH edáfico severo y prolongado en el tiempo, resultó un fenómeno esencialmente estival, resultante de la combinación de la escasez de lluvias, la elevada ETP y la limitada capacidad de almacenaje de los suelos de estas regiones. No existe una definición cuantitativa de "sequía" generalizada y consensuada. Sin embargo, sí pueden manejarse algunos índices que reflejen el grado de estrés hídrico prolongado a que puede estar sometida la vegetación de los pastizales. En esta tesis se optó por el cociente de ETR/ETP y se logró caracterizar una serie de características de este índice por mes y para rachas de 3 o más meses seguidos con el índice por debajo de un valor crítico seleccionado (0,5). La evolución de la extensión geográfica de las rachas de meses de ETR/ETP por debajo del umbral (medida en cantidad de secciones policiales afectadas) muestra en ambas ecoregiones pendiente negativa y cercana a cero. Cuando se suavizan las series el Basalto Superficial presenta en el período de 62 años una variabilidad multidecadal bastante clara, con picos a mediados de los 50, de los 60, de los 90 y en los 2000. Se observa también en Basalto Superficial, un prolongado período de ausencia de rachas desde mediados de los 70 a fines del 80. En Sierras del Este las rachas de déficit mostraron una tendencia a reducir su extensión geográfica. Es claro que en la década del 2000 la ecoregión impactada por rachas muy extendidas geográficamente de $ETR/ETP \leq 0,5$ fue el Basalto Superficial, y no las Sierras del Este. La correlación entre número de SP con 3 o más meses con $ETR/ETP \leq 0,5$ entre ambas ecoregiones (0,563) resultó significativa al 0,01, por lo que se concluye que la asociación de extensión geográfica de los eventos estudiados en ambas regiones es positiva y tiene una fuerza media.

Se encontró que casi uno de cada dos eneros estuvo bajo el valor crítico de ETR/ETP considerado en este análisis (0,5) para el período analizado, y que en algo más de 40% de los noviembre y diciembre el índice también es inferior al valor crítico. Se encontró que, en general, hay más riesgo de ocurrencia de otoños con ETR/ETP menor a 0,5 en Sierras del Este que en Basalto Superficial. La investigación muestra que los meses con $ETR/ETP \leq 0,5$ en casi el 90 % de los meses no se constituyeron en una racha de 3 o más meses consecutivos por debajo de ese valor crítico. La recurrencia de rachas está en torno a 4 años para el periodo de 62 años de DH analizado. Sin embargo, si se comparan los últimos 31 años con los 31 anteriores se observa que la recurrencia media disminuye en el Basalto Superficial de 4,1 a 4,6 años y disminuye aún más fuertemente en Sierras del Este de 3,3 a 6,2 años. Esto sugiere que las llamadas “sequías” serían en realidad menos frecuentes ahora que hace décadas.

En conclusión en todas las SP de Basalto Superficial no se encontró una tendencia significativa de aumento ni disminución de los eventos extremos de elevado DH para el período de 62 años 1949-2010. Para Sierras del Este, la conclusión es que predomina la ausencia de significación en la mayoría de las SP, pero en otras apareció una tendencia significativa de disminución. Se considera interesante realizar en el futuro estos mismos análisis para series de tiempo más cortas (por ejemplo en los últimos 30 años) y verificar si se mantienen las mismas conclusiones.

La discusión de los datos encontrados en esta tesis sobre DH se ve limitada por la inexistencia de trabajos anteriores que analicen el comportamiento del DH edáfico en series de tiempo en Uruguay, y de trabajos que “miren a través”, analizando a la vez las relaciones entre el marco físico, la PPNA y las variables ganaderas asociadas a la producción secundaria.

6.3 Caracterización de rachas de bajo nivel de ETR/ETP

En Basalto Superficial casi el 90 % de las rachas de tres o más meses consecutivos se ubica en el período noviembre – marzo, y en Sierras del Este, el porcentaje es de 77%, lo que indica que es muy poco frecuente que se desarrolle un período seco de 3 o más meses que no tenga el verano como eje.

La correlación del número de SP con rachas de 3 o más meses con $ETR/ETP \leq 0,5$, entre las dos ecoregiones se ubicó en 0,563, y resultó significativa al 0,01, por lo que se concluye que la extensión geográfica de los eventos estudiados en ambas regiones esta estadísticamente asociada. Existen algunos trabajos de la Facultad de Agronomía de la UDELAR que utilizan el valor crítico de 0,7. Sin embargo, dado que se ha analizado que el valor de umbral para situaciones de estrés hídrico para el pastizal no debiera ser mayor de 0,5 sino incluso menor, se sugiere la utilidad de expandir este tipo de análisis considerando valores aún más restrictivos, como 0,3.

Las rachas tienen una duración media de 3,7-3,8 meses, sin diferencia entre ecoregiones. Sin embargo, siendo relativamente breves, su naturaleza mayormente estival les otorga gran potencial de impacto sobre la producción de pasto y sobre la performance animal, en la ganadería vacuna (de cría) y ovina de estas dos ecoregiones.

Se analizó la serie de tiempo de extensión geográfica de las rachas detectadas. Se encontró que en Basalto Superficial hay 10 años sobre 62 en que se registraron rachas en al menos 50% de todas las SP de esta ecoregión. Estos períodos de “sequía generalizada” tendrían pues una recurrencia media de seis años. La recurrencia media resulta sin embargo un valor a tomar con cuidado, ya que se encuentra que cinco de esos eventos extremos se concentran en el período 1949/50 - 1967/68, y otros cinco en el período 1988/89 – 2008/2009, mientras que entremedio hubo 20 años sin eventos generalizados. La recurrencia media no resulta por lo tanto un dato de valor significativo para planificar, por ejemplo, medidas de adaptación.

6.4 Tendencias en la fPAR

La fPAR se utilizó en esta tesis como un subrogado de la PPNA. Se encontró que la fPAR mensual media de Sierras del Este es significativamente superior a la de Basalto Superficial en primavera, verano y otoño, con marcadas diferencias a favor de aquella en noviembre y diciembre. En Basalto Superficial la fPAR media mensual cae abruptamente en diciembre, mientras que en Sierras del Este la caída se da en enero. Para el caso de las Sierras del Este, los resultados no coinciden con los encontrados por Baeza *et. al* (2011b), al no observarse una unimodalidad en la distribución mensual de la PPNA, sino un comportamiento bimodal, aunque algo más atenuado que en Basalto Superficial. Los menores DH primaverales facilitarían una mayor expresión del potencial de las especies C3 en el final de su ciclo y de las C4 en las etapas iniciales y medias.

En Basalto Superficial la fPAR muestra, al efectuar la regresión por cuantiles, una tendencia decreciente para el período 1980-2010, tanto para la mediana como para los eventos extremos (percentil 10). Esta tendencia resultó estadísticamente significativa, con $\alpha = 0,05$, para la mediana en todas las SP, y para el percentil 10 en seis de las 17 SP. En Sierras del Este la tendencia positiva de la regresión por cuantiles para el percentil 10 resulta significativa en 10 de las 13 SP. En el caso de la mediana, la tendencia resulta estadísticamente significativa en siete de las 13 SP. Para el caso de Basalto Superficial, esta tendencia significativa de la fPAR es uno de los hallazgos más importantes de esta tesis, ya que reflejaría un uso no sostenible del campo natural.

La correlación entre fPAR y DH para el período noviembre – marzo arrojó resultados diferentes en las ecoregiones. En Basalto Superficial resultó negativa y significativa ($p < 0,01$), como era esperable. En Sierras del Este, en cambio no fue significativa y arrojó valores positivos. Se estimó la correlación para otros períodos y los resultados fueron los mismos en

Sierras del Este. La explicación de estos resultados contrarios a lo esperado podría encontrarse en la tendencia al aumento observado en la fPAR de varias de las SP de esta ecoregión. No es claro a qué se puede atribuir este aumento observado de la fPAR; una hipótesis a explorar a futuro podría ser que la fPAR media por SP aumentó principalmente por efecto de la introducción de la forestación, por lo cual futuros estudios podrían focalizarse en SP donde el incremento de la forestación fue más débil.

Los mayores valores de fPAR en Sierras del Este pueden ser en buena medida explicados por una mayor capacidad de reserva de agua. Los suelos de Sierras de Este tienen mayor capacidad de almacenar agua en el perfil, por lo que la mayor fPAR de esta ecoregión es consistente con lo que concluyen Sala *et al.* 1988, en el sentido de que la capacidad de almacenaje de agua del suelo es el mayor determinante de la PPNA en pastizales subhúmedos. Asimismo es posible que existan efectos debidos a la mayor superficie arbórea y al bajo número de ovinos. En Sierras del Este la relación Lanar/vacuno es baja y lo contrario ocurre en Basalto Superficial, y los ovinos tienden a seleccionar las pasturas más tiernas, por lo que es esperable que influyan en alguna medida sobre la fPAR. Por últimos se resalta que no se identificaron trabajos que relacionen DH con PPNA, por lo que no es posible discutir estos resultados tomando como referencia trabajos anteriores.

6.5 Efectos inerciales y retardados en las relaciones entre DH y carga animal

Si bien la correlación entre el DH medio anual y la carga medida a junio de cada año, resultó negativa (a más déficit, menos carga) para el período 1991-2010, medida con diferentes retardos: 1 año, 2 años y 3 años, los valores de la correlación no resultaron estadísticamente significativos. No se pudo, por lo tanto, identificar impactos estadísticamente significativos del DH sobre la carga animal.

6.6 Relaciones entre la lluvia, DH, fPAR y Carga animal

Una originalidad de esta tesis es considerar las relaciones entre variables del marco físico relacionadas con el agua (lluvia y DH edáfico) y variables relacionadas con la productividad primaria y secundaria de los ecosistemas pastoriles de Uruguay. Se verificó, para ambas ecoregiones que en algunas SP el DH amortigua la variabilidad de la lluvia, pero en otras SP la variabilidad se amplifica. No hay por lo tanto un patrón de respuesta consistente. Sería interesante estudiar a futuro las relaciones causales que explican este tipo de comportamiento diferencial.

A diferencia, cuando se analizó la relación entre DH y fPAR, se encontró que la variabilidad de la fPAR se amortigua en forma notoria y consistente en todas las SP de las dos

ecoregiones. Esta respuesta de amortiguamiento, y aún más fuerte, se encontró en la relación fPAR - carga.

6.7 Conclusiones e implicancias para el diseño de políticas públicas

Los resultados arriba reseñados se consideran de utilidad para los procesos de diseño de políticas públicas de reducción de la vulnerabilidad climática. En primer lugar los resultados sustentan la idea de que es mucho más importante adaptarse a la variabilidad interanual e intraanual que a los cambios en la variabilidad de largo plazo (cambio climático). En segundo lugar señalan que cuando se considera un período largo de tiempo (60 años hacia atrás) no hay evidencias de aumento en la frecuencia de eventos extremos de déficit hídrico edáfico. En los 30 años que van de 1981 a 2010, la mediana de la lluvia acumulada mensual y anual es superior a la del período de 30 años anteriores. Sin embargo, el estudio de las tendencias para los dos sub-períodos unidos no muestra tendencias estadísticamente significativas en la precipitación en dos tercios de las estaciones meteorológicas analizadas. Esto implica que en Uruguay no hay hasta el momento evidencias para sostener una política de adaptación al cambio climático en el agro que apunte a enfrentar una tendencia de escasez de agua creciente. Tampoco parece haber evidencias de cambios sistemáticos en la variabilidad de la lluvia a paso anual y mensual, e incluso, medida por el CV la variabilidad se redujo en algunas estaciones meteorológicas. Las rachas de 3 o más meses de $ETR/ETP \leq 0,5$ han disminuido en ocurrencia, particularmente en Sierras del Este. Dados los componentes de variabilidad interdecádica identificados, lo anterior no implica incompatibilidad con períodos de intensificación de la frecuencia e intensidad de rachas de déficit de humedad en los suelos.

Los resultados señalan que Basalto Superficial y Sierras del Este, si bien tienen comportamientos similares en varios aspectos, son diferentes en severidad de eventos extremos de DH y PPNA, lo que puede estar relacionado con capacidad media de retención de agua de los suelos, que es en promedio 35% mayor en Sierras del Este, para las SP analizadas. El Basalto Superficial aparece como una región claramente más prioritaria que Sierras del Este en términos de adaptación climática. Los resultados muestran que en años "sin sequías" generalizadas igualmente puede haber SP que atraviesen eventos de DH muy intensos. Esto tiene implicancias relevantes desde el punto de las políticas públicas, que han tendido en el pasado a atender solo situaciones espacialmente generalizadas y con enfoques de tipo reactivo. En tal dirección, los resultados obtenidos respaldan fuertemente el desarrollo de instrumentos como los seguros de índice climático de alto grado de resolución espacial (por ejemplo basado en el IVN o en el Índice de Precipitación Estandarizado). Finalmente, se destaca la verificación de una tendencia decreciente y estadísticamente significativa de la productividad de las pasturas en Basalto Superficial, que estaría reflejando un uso no sostenible de los pastizales, eventualmente atribuible a un mal manejo de la presión de pastoreo. Asimismo, y desde el punto de vista de la reducción de la sensibilidad al DH a escala predial, los resultados sugieren que -especialmente en los campos sobre Basalto

Superficial- las estrategias de manejo de las pasturas deberían apuntar a aumentar la asignación de forraje por animal (reduciendo el sobrepastoreo) y con mayor altura media del pasto aumentar la PPNA, mejorar condición corporal y disponer de mayores reservas de forraje en pie.

7 Bibliografía

- AIACC (2006). Final Report Project LA 27, Climate Change and Variability in the Mixed Crop/Livestock Production Systems of the Argentinean, Brazilian and Uruguayan Pampas.
- Alexander LV, Zhang X, Peterson TC, Caesar J, Gleason B, Klein Tank AMG, Haylock M, Collins D, Trewin B, Rahimzadeh F, Tagipour A, Rupa Kumar A, Revadekar J, Griffiths G, Vincent L, Stephenson DB, Burn J, Aguilar E, Brunet M, Taylor M, New M, Zhai P, Rusticucci M, Vazquez-Aguirre JL (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J Geophys Res* 111:D05109. doi:10.1029/2005 JD006290.
- Allan, R.P and Soden, B.J. (2008). Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*. Vol. 321.
- Allen, V.G., *et al.* (2011). "An international terminology for grazing lands and grazing animals". *Grass and Forage Science*. Blackwell Publishing Ltd. 66, 2–28.
- Baethgen W. (2009). Gestión de Riesgos Climáticos en el Sector Agropecuario para la Adaptación al Cambio Climático. International Research Institute for Climate and Society (IRI).
- Baeza, S., Lezama, F., Piñeiro, G., Altesor, A. y Paruelo, J.M. (2010). Spatial variability of above-ground net primary production in Uruguayan grasslands: a remote sensing approach. *Applied Vegetation Science* 13: 72-85.
- Baeza, S.; Gallego, F.; Lezama, F.; Altesor A.; y Paruelo J. (2011a). Cartografía de los pastizales naturales en las regiones geomorfológicas del Uruguay predominantemente ganaderas. Proyecto FPTA 175. En INIA, Serie FPTA-INIA 26.
- Baeza, S.; Paruelo J.; y Lezama, F. (2011b). Caracterización funcional de pastizales y sus aplicaciones en Uruguay. Proyecto FPTA 175. En INIA, Serie FPTA-INIA 26.
- Baeza S., Paruelo J., Ayala W. (2011). Eficiencia en el uso de la radiación y productividad primaria en recursos forrajeros del este de Uruguay. *Agrociencia Uruguay - Volumen 15* 2:48-59 - julio/diciembre.
- Barros V. y Kullock D. (2006). Informe Final para el Programa Nacional de Adaptación y Planes Regionales de Adaptación. Argentina.
- Brazeriro et. al. (2010). Mapa de ambientes de Uruguay y distribución potencial de especies, Convenio con MGAP (PPR). Montevideo.
- Caffera R. M., Bidegain M., Nagy G., y colaboradores, 2005. "Análisis de la estadística climática y desarrollo y evaluación de escenarios climáticos e hidrológicos de las principales cuencas hidrográficas del Uruguay y de su Zona Costera" Unidad de Cambio Climático – DINAMA – MVOTMA – 2005. Montevideo. UY.

- Caffera, R.M. (2006) Variación de largo período en la disponibilidad potencial de agua para pasturas en Uruguay. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires.
- Caffera R. M., Cuello B. y Salaberri G., 2007. "Algunos Cambios en la variabilidad de la precipitación y en la disponibilidad de agua en la segunda mitad del siglo XX sobre el territorio uruguayo" 49-71 pp. Anales de la "Semana de Reflexión sobre Cambio y Variabilidad Climáticas", 2 al 7 de julio de 2007, Facultad de Agronomía.
- Caffera R. y H. Berbery, 2006. "Climatología de la Cuenca del Plata" Capítulo II (19-36) en "El Cambio Climático en la Cuenca del Plata". V. Barros, R. Clarke, P. Silva Dias (eds.) 232pp, ISBN 950-692-066-4, CIMA-CONICET-UBA, Bs. As.
- Caffera R.M. & Oyhantcabal, W. (2009). Cambios en la variabilidad de la precipitación sobre Uruguay: Nuevas Contribuciones. "II Semana de Reflexión sobre Cambio y Variabilidad Climáticas", Facultad de Agronomía.
- CARVALHO, P. C. F. ; SANTOS, Davi Teixeira dos ; NEVES, Fábio Pereira. (2007) "Oferta de forragem como condicionadora da estrutura do pasto e do desempenho animal". In: Miguel Dall'Agnol; Carlos Nabinger; Danilo Menezes Santana; Rogério Jaworski dos Santos. (Org.). Sustentabilidade Produtiva do Bioma Pampa. 1 ed. Porto Alegre: Gráfica Metrópole Ltda., p. 23-60.
- Chapin, F.S.III, (2009). Ecosystem stewardship: sustainability strategies for a rapidly changing planet. Trends in Ecology and Evolution. Vol.25 No.4.
- MGAP-FAO, 2013. Clima de cambios: Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay.
- Costanza, R. R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, S. Naeem, K. Limburg, J. Paruelo, R.V. O'Neill, R. Raskin, P. Sutton, and M. van den Belt. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 387:253-260.
- Costanza et. al. (2012). Building a Sustainable and Desirable Economy-in-Society-in-Nature. New York. United Nations Division for Sustainable Development.
- Díaz A., Studzinsky C., Mechoso C. (1998) Relationships between Precipitation Anomalies in Uruguay and Southern Brazil and Sea Surface Temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. Journal of Climate. Vol 11.
- DICOSE-MGAP. (2010). Declaración jurada.
<http://www.mgap.gub.uy/DGSG/DICOSE/dicose.htm>.
- DIEA.MGAP. (2014). Censo General Agropecuario de 2011.
<http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx?7,5,149,O,S,0,MNU;E;2;16;10;12;MNU;>
- Durán V. (2010) Evolución y perspectivas de las cadenas agropecuarias. Anuario de OPYPA. MGAP. UY.
- Gao, Z., et al., Integrating temperature vegetation dryness index (TVDI) and regional water stress index (RWSI) for drought assessment with the aid of LANDSAT TM/ETM+ images. Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf. (2010), doi:10.1016/j.jag.2010.10.005
- Geider, R.J., Delucia, E.H., Falkowski, P.G. et al. (2001) Primary productivity of planet earth: biological determinants and physical constraints in terrestrial and aquatic habitats. *Global Change Biology*, 7, 849–882.
- Giménez A. y Lanfranco B. (2008). Vulnerabilidad al Cambio Climático de los Sistemas de Producción Agrícola en América Latina y el Caribe: Desarrollo de Respuestas y Estrategias. Capítulo Uruguay. Informe Final. INIA. UY.

- Gimenez A. Baethgen W. Castaño J.P. y Lanfranco B. (2009) Cambio Climático en Uruguay, posibles impactos y medidas de adaptación en el sector agropecuario. INIA Serie Técnica Nº 178. UY.
- Golluscio R. A., Deregebius y Paruelo J.M. (1998). Sustainability and range management in the Patagonian steppes. *Ecología Austral* 8:265–284.
- Guido, A. (2011) Estimación de la variabilidad espacial y temporal de la productividad primaria neta en Pastizales de Uruguay mediante sensores remotos. Tesis de Maestría. Facultad de Biología. Universidad de Santiago de Compostela, España.
- Guido A. , Díaz Varela R. Baldassini P. and José Paruelo (2014). Spatial and Temporal Variability in Aboveground Net Primary Production of Uruguayan Grasslands. *Rangeland Ecology & Management*, 67(1):30-38.
- Haylock M.R. (2006). Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*. Vol. 19.
- Hipel, K.W. y McLeod A. I. (1994). Time series modeling of water resources and environmental systems. Elsevier. Amsterdam.
- IPCC, 2007a. Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Contribution of to the Fourth Assessment Report, Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers. <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>
- IPCC, 2007b. Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report, Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability, Summary for Policymakers <http://www.ipcc.ch/SPM6avr07.pdf>
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: *The Physical Science Basis*
- Irisarri, J. Gonzalo. (2008). Variación espacial y temporal de la productividad primaria neta aérea de mallines del noroeste de la Patagonia. Tesis. UBA.FA, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados, Magister de la Universidad de Buenos Aires área Recursos Naturales; Recursos Naturales.
- Irisarri, J.G.N; Gundel, P.E.; Clavijo, M.P; Durante, M.; Sosa, P. (2013) “Estimación de la PPNA y la capacidad de carga por ambientes mediante información satelital en un establecimiento ganadero en la Pampa Deprimida. *Revista Argentina de Producción animal*. Vol.33. Balcarce. Argentina.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.* 17, 133–138.
- Jobbagy, E.G., Sala, O.E. & Paruelo, J.M. (2002) Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach. *Ecology*, 83, 307–319.
- Knapp, A.K. & Smith, M.D. (2001) Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production. *Science*, 291,481–484.
- Legendre P. and Legendre L. (1998). Numerical Ecology. Elsevier. Amsterdam.
- MGAP (2011). “Building resilience to climate change in smallholders”. Adaptation Fund.
- Ma, W. et al. (2010). Climate change alters interannual variation of grassland aboveground productivity: Evidence from a 22-year measurement series in the Inner Mongolian grassland. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Volume 107, Issue 18, Pages 8275-8280.

- Medvigy, d. et al. (2005). Responses of terrestrial ecosystems and carbon budgets to current and future environmental variability. *Climatic Change*. Volume 70, Issue 1-2, Pages 1-3.
- Molfino J. (2009). Agua potencialmente disponible por unidad de suelos CONEAT. Acuerdo de trabajo MGAP (RENARE) INIA (GRAS).
- Monteith, J. (1972). "Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems". *Journal of Applied Ecology* 9: 747-766.
- Oesterheld M., Sala O.E., y McNaughton S.J. (1992) Effect of animal husbandry on herbivore-carrying capacity at regional scale. *Nature*. Vol. 356.
- Oesterheld M., Di Bella, C.; Herdiles, K. (1998). Relations between NOAA-AVHRR satellite data and stocking rate of rangelands. *Ecological applications* 8: 207-212.
- Oesterheld M., Paruelo J.M., y Oyarzabal, M. (2011). "Capítulo VII. Estimación de la productividad primaria neta aérea a partir de diferencias de biomasa y de integración de la radiación absorbida". En *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales*. Serie FPTA-INIA 26.
- MCNAUGHTON, S.J., OESTERHELD J., FRANK D.A & WILLIAMS K.J. (1989). Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature* 341, 142 - 144 (14 September 1989); doi:10.1038/341142a0
- Moraes, M.I., (2008). "La pradera perdida". Montevideo. Ediciones Leonardi y Risso.
- Munich Re Group. (2009). World Map of Natural Hazards.
- Paolino C. (2010). El contexto económico, las prioridades de políticas públicas agropecuarias y el plan de trabajo de OPYPA. Anuario de OPYPA 2010. MGAP. UY.
- Paruelo J.M., Epstein, H.E., Lauenroth, W.K., & Burke, I.C. (1997). ANPP estimates from IVN for the central grasslands región of the U.S. *Ecology* 78: 953-958.
- Paruelo J.M. and Lauenroth W.K. (1998) Interannual variability of IVN and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands. *Journal of Biogeography*. 25, 721-733.
- Paruelo J.M., Garbulsky M.F., Guerschman J.P., Jobbaggy E. (2004). Two decades of Normalized Difference Vegetation Index changes in South America: identifying the imprint of global change. *Int. J. Remote Sensing*, 20 July 2004, VOL. 25, NO. 14, 2793–2806.
- Paruelo J.M., Jobbaggy, E.G., Oesterheld, M., Golluscio, R.A. & Aguiar, M.R. (2007). The grasslandas and steppes of Patagonia and the Rio de la Plata plains. In: Veblen, T., Young, K. & Orme, A. (eds.).*The physical geography of South America*, 232-248. Oxford University Press., Oxfor. UK.
- Paruelo J.M.,*et al.* (2010). Carbon stocks and fluxes in rangelands of the Río de la Plata basin. *Rangeland Ecol. Manage.*63:94-108.
- Panario D. (1988). Geomorfología del Uruguay. Facultad de Humanidades y Ciencias, Universidad de la República, Montevideo. UY.
- Piñeiro, G., Oesterheld M., y Paruelo J.M. (2006a) Seasonal Variation in Aboveground Production and Radiation-use Efficiency of Temperate rangelands Estimated through Remote Sensing. *Ecosystems* (2006) 9: 357–373.
- Piñeiro, G., Paruelo J. M. y Oesterheld M., (2006b). Potential long-term impacts of livestock introduction on carbon and nitrogen cycling in grasslands of Southern South America. *Global Change Biology* 12:1267–1284.

- Rusticucci M., Marengo J., Penalba O., & Renom M. (2010). An intercomparison of model-simulated in extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century. Part 1: mean values and variability. *Climatic Change*. 98: 493–508.
- Rusticucci M., Marengo J., Penalba O., & Renom M. (2010). An intercomparison of model-simulated in extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century. Part 2: historical trends. *Climatic Change*. 98: 509–529.
- Sala de Turón L., Rodríguez J.C., y de la Torre N. (1967). "Estructura económica y social de la Colonia". Montevideo. Ediciones Pueblos Unidos.
- Sala, O.E., Parton, W.J., Joyce, L.A. & Lauenroth, W.K. 1988. Primary production of the central grassland region of the United States: spatial pattern and major controls. *Ecology* 69: 40–45.
- Sellers P.J., Berry J.A., Collatz G.J., Field C.B., Hall F.G. (1992). Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sens of Environ* 42:187–216.
- Russo S. y Sterl A. (2011) Global changes in seasonal means and extremes of precipitation from daily climate model data. *Journal of Geophysical Research*. Draft.http://www.knmi.nl/publications/fulltexts/jgr_s_russo_sterl_2011_rev1.pdf.
- Simionato, C. Vera C.S., y Siegismund F. 2005. Surface wind variability and interannual scales. *Journal of Coastal Research*. 21(4), 770-783.
- Steenhuis, T.S. and W.H. Van der Molen. 1986. The Thornthwaite-Mather procedure as a simple engineering method to predict recharge. *J. Hydrol.* 84:221-229.
- Soca P., Docarmo, M., Claramunt M., (2007). Sistemas de cría vacuna en ganadería pastoril sobre campo nativo sin subsidios: propuesta tecnológica para estabilizar la producción de terneros con intervenciones de bajo costo y de fácil implementación. *Avances en Producción Animal* Vol. 32 (1-2): 3-28-
- Swemmer A., Knapp A., Snyman H. (2007). Intra-seasonal precipitation patterns and above-ground productivity in three perennial grasslands. *Journal of Ecology*. 95 780–788
- Texeira M., Paruelo J.M. y Jobaggy E. (2008). How do forage availability and climate control sheep reproductive performance? An analysis based on artificial neural networks and remotely sensed data. *Ecological Modeling* 217 (2008) 197-206.
- Thornthwaite, C. W., J. R. Mather (1955). "The water balance." *Publ. Climatol.* 8(1).
- Thornthwaite, C. W., J. R. Mather (1957). "Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance." *Publ. Climatol.* 10(3).
- Tucker, C. J. (1979), Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sens. Environ.*, 8, 127– 150.
- Vera C, Higgins W, Amador J, Ambrizzi T, Garreaud R, Gochis D, Gutzler D, Lettenmaier D, Marengo J, Mechoso C, Nogues-Paegle J, Silva Dias P, Zhang C. (2006). Toward a unified view of the American monsoon systems. *J. Clim.* 19: 4977–5000.
- Wiegand, T., Snyman, H.A., Kellner, K. & Paruelo, J.M. 2004. Do grasslands have a memory: modeling phytomass production of a semiarid South African grassland. *Ecosystems* 7: 243–258.
- Zheng, D., Prince, S. & Wright, R. (2003) Terrestrial net primary production estimates in 0.5 degree grid cells from field observations – a contribution to global biogeochemical modelling. *Global Change Biology*, 9, 46–64.