

POLITECNICO DI MILANO  
Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale,  
Infrastrutture viarie, e Rilevamento



**DINAMICA DELLA VEGETAZIONE IN  
ECOSISTEMI SEMIARIDI: CONDIZIONI  
ATTUALI E SCENARI FUTURI**

Relatore: Prof. Carlo DE MICHELE

Correlatore: Ing. Francesco ACCATINO

Correlatore: Ing. Davide DONZELLI

Correlatore: Ing. Renata VEZZOLI

Tesi di laurea di:  
Angelica RICCIETTI

Matr. 740103

Anno accademico 2010-2011



# Indice dei contenuti

<b>INDICE DEI CONTENUTI .....</b>	<b>III</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE .....</b>	<b>VIII</b>
<b>INDICE DELLE TABELLE.....</b>	<b>XIII</b>
<b>SINTESI .....</b>	<b>XVI</b>
<b>CAPITOLO 1 INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLO 2 UNO SGUARDO AL FUTURO .....</b>	<b>3</b>
2.1 IL PARERE DEGLI ESPERTI.....	3
2.1.1 <i>Report sul cambiamento climatico</i> .....	4
2.1.2 <i>Drivers di cambiamento climatico</i> .....	5
2.1.3 <i>Gli scenari di cambiamento climatico</i> .....	6
2.2 IL CASO DI SPECIE: IL SUDAFRICA .....	9
2.2.1 <i>Valutazioni sul futuro del Paese</i> .....	9
2.3 PRESENTAZIONE DEI BIOMI ANALIZZATI.....	11
2.3.1 <i>La savana</i> .....	11
2.3.2 <i>La prateria</i> .....	13
<b>CAPITOLO 3 FATTORI INFLUENTI SULLA COPERTURA VEGETALE .....</b>	<b>15</b>
3.1 INFLUENZA DEL CLIMA.....	15
3.2 IL DISTURBO "FUOCO" .....	17
3.3 IL DISTURBO "ERBIVORI" .....	20
<b>CAPITOLO 4 SITI IN ANALISI E RELATIVI REGIMI PLUVIOMETRICI .....</b>	<b>23</b>
4.1 SITI ANALIZZATI.....	23
4.1.1 <i>Skukuza</i> .....	24
4.1.2 <i>Lesotho</i> .....	28
4.2 PRECIPITAZIONE E CAMBIAMENTO CLIMATICO .....	29

4.2.1	<i>La precipitazione di scenario</i>	30
4.2.2	<i>Confronto con la serie storica</i>	31
<b>CAPITOLO 5 ANALISI CON IL COMMUNITY LAND MODEL (CLM)</b>		<b>34</b>
5.1	STORIA DEL MODELLO	34
5.2	DESCRIZIONE DEL MODELLO	37
5.2.1	<i>Dominio e organizzazione spaziale dei dati</i>	37
5.2.2	<i>Processi biofisici</i>	39
5.3	MODELLO BIOGEOCHIMICO CN	48
5.3.1	<i>Descrizione del modello</i>	48
5.3.2	<i>Variabili di stato della vegetazione</i>	48
5.3.3	<i>Respirazione autotrofa ed eterotrofa</i>	49
5.3.3	<i>Allocazione del carbonio e dell'azoto</i>	50
5.3.3	<i>Fenologia e struttura della vegetazione</i>	51
5.3.3	<i>Incendi e mortalità</i>	52
5.3.3	<i>Fonti di azoto e perdite</i>	53
5.4	MODELLO DINAMICO DI VEGETAZIONE	54
5.4.1	<i>Stabilimento e sopravvivenza</i>	55
5.4.2	<i>La competizione per la luce</i>	56
5.4.3	<i>Processi modificati del CN per l'accoppiamento con il CNDV</i>	56
5.5	IMPLEMENTAZIONE E CONFIGURAZIONE DEL MODELLO CLM	57
5.5.1	<i>Accoppiamento atmosferico</i>	57
5.5.2	<i>Inizializzazione</i>	59
5.5.3	<i>Dati superficiali</i>	60
5.5.4	<i>Configurazione del modello per i siti in analisi</i>	62
5.6	ANALISI	64
5.6.1	<i>Analisi in modalità Single Site per Skukuza</i>	64
5.6.2	<i>Analisi in modalità Single Site per Lesotho</i>	70
5.6.3	<i>Analisi in modalità Spazialmente Distribuita per il Sudafrica</i>	74
5.6	PREGI E DIFETTI DEL MODELLO SPAZIALMENTE DISTRIBUITO CLM	77
<b>CAPITOLO 6 MODELLI DI DINAMICA DI VEGETAZIONE NELLE SAVANE</b>		<b>79</b>
6.1	MODELLI BASATI SULLA COMPETIZIONE	80
6.1.1	<i>Modelli di separazione di nicchia delle radici</i>	80
6.1.2	<i>Modelli di separazione di nicchia fenologica</i>	81
6.1.3	<i>Modelli di competizione bilanciata</i>	81
6.1.4	<i>Modelli di competizione e colonizzazione forzati idrologicamente</i>	82
6.1.5	<i>Modelli esplicitamente spaziali</i>	83

6.2 MODELLI DEMOGRAFICI .....	83
2.7.1 Meccanismi ecologici buffer.....	84
<b>CAPITOLO 7 ANALISI CON MODELLO STG.....</b>	<b>85</b>
7.1 IL FENOMENO IN LUCE: INTERAZIONE UMIDITÀ DEL SUOLO E VEGETAZIONE.....	85
7.2 LA STRUTTURA DEL MODELLO: DESCRIZIONE DELLA DINAMICA DI VEGETAZIONE.....	86
7.2 IL MODELLO.....	88
7.3.1 La dinamica di vegetazione.....	89
7.3.2 La dinamica di umidità del suolo.....	89
7.3.3 Modello di dinamica in assenza di incendi.....	90
7.3.4 Valore dei parametri.....	91
7.3.5 Modello di dinamica con incendi.....	92
7.4 SIMULAZIONI DI SCENARIO .....	93
7.4.1 Simulazioni in assenza di incendi .....	93
7.4.2 Simulazioni con incendi.....	97
7.5 PREGI E DIFETTI DEL MODELLO STG .....	100
<b>CAPITOLO 8 ANALISI CON MODELLO STGD.....</b>	<b>101</b>
8.1 IL FENOMENO IN LUCE: FORMAZIONE E RUOLO DELLA BIOMASSA SECCA.....	101
8.2 LA STRUTTURA DEL MODELLO: INTERAZIONE ALBERI-ERBA-BIOMASSA-FUOCO .....	103
8.3 IL MODELLO.....	104
8.3.1 La dinamica di vegetazione.....	104
8.3.2 Valore dei parametri.....	105
8.3.3 Forzante fuoco e dinamica alberi-erba-biomassa .....	105
8.4 SIMULAZIONI DI SCENARIO .....	106
8.4.1 Simulazioni in assenza di incendi .....	107
8.4.2 Simulazioni con incendi.....	110
8.5 PREGI E DIFETTI DEL MODELLO STGD .....	116
<b>CAPITOLO 9 MODELLO MINIMALE DISCRETO.....</b>	<b>117</b>
9.1 IL FENOMENO IN LUCE: LA STAGIONALITÀ .....	117
9.2 IL MODELLO.....	119
9.2.1 Le equazioni del modello .....	119
9.2.2 Valore dei parametri.....	121
9.3 SIMULAZIONI.....	121
9.4 PREGI E DIFETTI DEL MODELLO DISCRETO.....	126
<b>CAPITOLO 10 MODELLO MINIMALE DISCRETO A CLASSI D'ETÀ.....</b>	<b>128</b>

10.1 IL FENOMENO IN LUCE: POPOLAZIONI STRUTTURATE IN CLASSI .....	128
10.2 LA STRUTTURA DEL MODELLO: COPERTURA ARBOREA STRUTTURATA IN CLASSI .....	129
10.2.1 <i>Modello discreto a classi d'età con frazione colonizzata costante</i> .....	130
10.2.2 <i>Modello discreto a classi d'età con frazione colonizzata dipendente dall'abbondanza di alberi maturi</i> .....	132
10.3 IL MODELLO .....	132
10.3.1 <i>Le equazioni del modello</i> .....	133
10.3.2 <i>Valore dei parametri</i> .....	135
10.4 SIMULAZIONI.....	136
10.4.1 <i>Simulazione con frazione colonizzata costante</i> .....	136
10.4.2 <i>Simulazione con frazione colonizzata dipendente dall'abbondanza di alberi maturi</i> .....	139
10.5 PREGI E DIFETTI DEL MODELLO DISCRETO A CLASSI D'ETÀ.....	140
<b>CAPITOLO 11 CONCLUSIONI .....</b>	<b>142</b>
<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....</b>	<b>145</b>
<b>APPENDICE A CONSTANTI FISICHE.....</b>	<b>155</b>
A.1 <b>CONSTANTI FISICHE CONDIVISE DA TUTTE LE COMPONENTI DEL MODELLO CLM</b> .....	<b>155</b>



# Indice delle figure

FIGURA 2.1 IMPATTO DI OGNI DRIVER SULLA BIODIVERSITÀ IN OGNI TIPO DI ECOSISTEMA SUI 50-100 ANNI PASSATI .	4
FIGURA 2.2 EMISSIONI ANNUALI A SCALA GLOBALE DI GAS SERRA ANTROPOGENICI DAL 1970 AL 2004 E SUDDIVISIONE DEI DIVERSI GAS SERRA DI ORIGINE ANTROPICA INFLUENTI SULLE EMISSIONI DEL 2004 IN TERMINI DI CO <sub>2</sub> -EQ.	6
FIGURA 2.3 EMISSIONI GLOBALI DI GAS SERRA IN ASSENZA DI POLITICHE CLIMATICHE ADDIZIONALI	7
FIGURA 2.4 DISTRIBUZIONE DELLE VARIE TIPOLOGIE DI BIOMA IN SUDAFRICA	10
FIGURA 2.5 VEGETAZIONE TIPICA DEL BIOMA SAVANA.	13
FIGURA 2.6 VEGETAZIONE TIPICA DEL BIOMA PRATERIA.	14
FIGURA 3.1 SCHEMA DI UNA SUCCESSIONE SUBTROPICALE SECONDO SHMIDA E BURGESS (1988)	16
FIGURA 3.2 SCHEMA DI UNA SUCCESSIONE MEDITERRANEA SECONDO SHMIDA E BURGESS (1988).	16
FIGURA 3.3 MODELLO TEORICO DEI FATTORI CHE INFLUENZANO LE AREE COLPITE DA INCENDIO	19
FIGURA 3.4 COMPOSIZIONE TEMPORALE DEGLI INCENDI RILEVATI IN SUDAFRICA DA MODIS-TERRA AL 2001.	20
FIGURA 4.1 LOCALIZZAZIONE DEL SITO SKUKUZA	24
FIGURA 4.2 COPERTURA IN PERCENTUALE DOVUTA ALL'ERBA OTTENUTA DALLE OSSERVAZIONI SATELLITARI MODIS ALL'ANNO 2003.	25
FIGURA 4.3 COPERTURA IN PERCENTUALE DOVUTA AGLI ALBERI OTTENUTA DALLE OSSERVAZIONI SATELLITARI MODIS ALL'ANNO 2003.	26
FIGURA 4.4 MEDIE MENSILI CUMULATE DI PRECIPITAZIONE PER L'ANNO 2003, OTTENUTE DAL DATASET DEL QUIAN PER SKUKUZA.	27
FIGURA 4.5 MEDIE MENSILI CUMULATE DI PRECIPITAZIONE PER L'ANNO 2003, OTTENUTA DALLA FLUX TOWER PER IL SITO DI SKUKUZA.	27
FIGURA 4.6 LOCALIZZAZIONE DEL SITO NELLA ZONA DEL LESOTHO (PRATERIA).	28
FIGURA 4.7 MEDIE MENSILI CUMULATE DI PRECIPITAZIONE PER L'ANNO 2003, OTTENUTE DAL DATASET DEL QUIAN PER LESOTHO.	29
FIGURA 4.8 PRECIPITAZIONE DI SCENARIO NEL SITO SKUKUZA.	30
FIGURA 4.9 PRECIPITAZIONE DI SCENARIO NEL SITO LESOTHO.	30
FIGURA 4.10 ANDAMENTO DELLE MEDIE MENSILI DELLE SERIE STORICHE E DI SCENARIO PER IL SITO SKUKUZA E ANDAMENTO DELLE MEDIE MENSILI DELLA SERIE DI SCENARIO PER LESOTHO.	32
FIGURA 5.1 CONFIGURAZIONE DI DEFAULT ATTUALE DELLA GERARCHIA DELLA SUBGRIGLIA DEL CLM.	37
FIGURA 5.2 BIOGEOFISICA DEL TERRITORIO E PROCESSI IDROLOGICI SIMULATI DAL CLM	40

FIGURA 5.3 MODIFICA DELLA PRECIPITAZIONE DA PARTE DELLA VEGETAZIONE..	43
FIGURA 5.4 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CONTENUTO VOLUMETRICO D'ACQUA NEL SUOLO CON IL MODELLO CN PER SKUKUZA.....	65
FIGURA 5.5 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CONTENUTO VOLUMETRICO D'ACQUA NEL SUOLO CON IL MODELLO CNDV PER SKUKUZA.....	66
FIGURA 5.6 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'EVAPORAZIONE E DELLA TRASPIRAZIONE DELLA CHIOMA E DELL'EVAPORAZIONE DEL TERRENO CON IL MODELLO CN PER SKUKUZA.....	67
FIGURA 5.7 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'EVAPORAZIONE E DELLA TRASPIRAZIONE DELLA CHIOMA E DELL'EVAPORAZIONE DEL TERRENO CON IL MODELLO CNDV PER SKUKUZA.....	67
FIGURA 5.8 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO PERSI NEGLI INCENDI AL LIVELLO DEI PFT CON IL MODELLO CN PER SKUKUZA.....	69
FIGURA 5.9 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CONTENUTO VOLUMETRICO D'ACQUA NEL SUOLO CON IL MODELLO CN PER LESOTHO.....	70
FIGURA 5.10 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CONTENUTO VOLUMETRICO D'ACQUA NEL SUOLO CON IL MODELLO CNDV PER LESOTHO.....	71
FIGURA 5.11 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'EVAPORAZIONE E DELLA TRASPIRAZIONE DELLA CHIOMA E DELL'EVAPORAZIONE DEL TERRENO CON IL MODELLO CN PER LESOTHO.....	71
FIGURA 5.12 ANDAMENTO STAGIONALE DELL'EVAPORAZIONE E DELLA TRASPIRAZIONE DELLA CHIOMA E DELL'EVAPORAZIONE DEL TERRENO CON IL MODELLO CNDV PER LESOTHO.....	72
FIGURA 5.13 ANDAMENTO STAGIONALE DEL CARBONIO E DELL'AZOTO PERSI NEGLI INCENDI AL LIVELLO DEI PFT CON IL MODELLO CN PER LESOTHO.....	73
FIGURA 5.14 ANDAMENTO STAGIONALE DI UMIDITÀ DEL SUOLO IN CONDIZIONI DI STATO STAZIONARIO DOPO LO SPINUP DEL MODELLO PER IL SUDAFRICA.....	75
FIGURA 5.15 ANDAMENTO STAGIONALE DELLA PRODUZIONE PRIMARIA NETTA DELLA VEGETAZIONE IN CONDIZIONI DI STATO STAZIONARIO DOPO LO SPINUP DEL MODELLO PER IL SUDAFRICA.....	76
FIGURA 5.16 MEDIA DEI VALORI DI PRODUZIONE PRIMARIA NETTA DELLA VEGETAZIONE IN CONDIZIONI DI STATO STAZIONARIO DOPO LO SPINUP DEL MODELLO PER IL SUDAFRICA.....	76
FIGURA 5.17 DISTRIBUZIONE DEI PFT A SEGUITO DELLO SPINUP DEL MODELLO PER IL SUDAFRICA.....	77
FIGURA 7.1 MODELLO MINIMALE ECO-IDROLOGICO PER INTERAZIONE ALBERI-ERBA E UMIDITÀ DEL SUOLO.....	87
FIGURA 7.2 SCHEMA DEI FLUSSI D'ACQUA IN UN GENERICO VOLUME DI CONTROLLO IN PRESENZA DI CLIMI ARIDI E SEMI ARIDI.....	87
FIGURA 7.3 VARIABILITÀ DELLA COPERTURA ARBOREA CON LA PRECIPITAZIONE.....	91
FIGURA 7.4 ANDAMENTO UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA CON PRECIPITAZIONE CICLICA STAGIONALE REPLICATA PER 101 ANNI IN ASSENZA DI INCENDI NEL SITO DI SKUKUZA. MODELLO STG.....	95

FIGURA 7.5 ANDAMENTO UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA CON PRECIPITAZIONE CICLICA STAGIONALE REPLICATA PER 101 ANNI IN ASSENZA DI INCENDI NEL SITO DI LESOTHO. MODELLO STG.....	95
FIGURA 7.6 ANDAMENTO UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA CON PRECIPITAZIONE DI SCENARIO NEL SITO DI SKUKUZA PER I PRIMI 40 ANNI DI PREVISIONE IN ASSENZA DI INCENDI FUOCO. MODELLO STG.....	96
FIGURA 7.7 ANDAMENTO UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA CON PRECIPITAZIONE DI SCENARIO NEL SITO DI LESOTHO PER I PRIMI 40 ANNI DI PREVISIONE IN ASSENZA DI INCENDI FUOCO. MODELLO STG.....	96
FIGURA 7.8 ANDAMENTO UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA CON PRECIPITAZIONE CICLICA CON INCENDI NEL SITO DI SKUKUZA. MODELLO STG.....	98
FIGURA 7.9 ANDAMENTO UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA CON PRECIPITAZIONE CICLICA CON INCENDI NEL SITO DI LESOTHO. MODELLO STG.....	98
FIGURA 7.10 ANDAMENTO UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA CON PRECIPITAZIONE DI SCENARIO CON INCENDI NEL SITO DI SKUKUZA PER I PRIMI 40 ANNI DI PREVISIONE. MODELLO STG.....	99
FIGURA 7.11 ANDAMENTO DI UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA CON PRECIPITAZIONE DI SCENARIO CON INCENDI NEL SITO DI SKUKUZA PER I PRIMI 40 ANNI DI PREVISIONE. MODELLO STG.....	99
FIGURA 8.1 ANDAMENTO DELLA PROBABILITÀ DI FUOCO ALL'INTERNO DEL MODELLO MINIMALE STGD.....	106
FIGURA 8.2 ANDAMENTO DI UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA-BIOMASSA CON PRECIPITAZIONE CICLICA NEL SITO DI SKUKUZA CON MODELLO STGD. ZOOM DA 0 A 40 ANNI DI SIMULAZIONE.....	108
FIGURA 8.3 ANDAMENTO DI UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA-BIOMASSA CON PRECIPITAZIONE CICLICA NEL SITO DI LESOTHO CON MODELLO STGD. ZOOM DA 0 A 40 ANNI DI SIMULAZIONE.....	108
FIGURA 8.4 ANDAMENTO DI UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA-BIOMASSA CON PRECIPITAZIONE REALE DI SCENARIO NEL SITO DI SKUKUZA CON MODELLO STGD. ZOOM DA 0 A 40 ANNI DI SIMULAZIONE.....	109
FIGURA 8.5 ANDAMENTO DI UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA-BIOMASSA CON PRECIPITAZIONE REALE DI SCENARIO NEL SITO DI LESOTHO CON MODELLO STGD. ZOOM DA 0 A 40 ANNI DI SIMULAZIONE.....	109
FIGURA 8.6 ANDAMENTO DI UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA-BIOMASSA CON PRECIPITAZIONE CICLICA NEL SITO DI SKUKUZA CON MODELLO STGD. $P_F$ È ASSUNTA NULLA FINO A CHE LA BIOMASSA NON RAGGIUNGE IL 40% DI COPERTURA.....	111
FIGURA 8.7 ANDAMENTO DI UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA-BIOMASSA CON PRECIPITAZIONE CICLICA NEL SITO DI LESOTHO CON MODELLO STGD. $P_F$ È ASSUNTA NULLA FINO A CHE LA BIOMASSA NON RAGGIUNGE IL 40% DI COPERTURA.....	111
FIGURA 8.8 ANDAMENTO DI UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA-BIOMASSA CON PRECIPITAZIONE REALE DI SCENARIO NEL SITO DI SKUKUZA CON MODELLO STGD. $P_F$ È ASSUNTA NULLA FINO A CHE LA BIOMASSA NON RAGGIUNGE IL 40% DI COPERTURA.....	112
FIGURA 8.9 ANDAMENTO DI UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA-BIOMASSA CON PRECIPITAZIONE REALE DI SCENARIO NEL SITO DI LESOTHO CON MODELLO STGD. $P_F$ È ASSUNTA NULLA FINO A CHE LA BIOMASSA NON RAGGIUNGE IL 40% DI COPERTURA.....	112

FIGURA 8.10 ANDAMENTO DI UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA-BIOMASSA CON PRECIPITAZIONE REALE DI SCENARIO NEL SITO DI SKUKUZA CON MODELLO STGD. $P_F$ È ASSUNTA NULLA FINO A CHE LA BIOMASSA NON RAGGIUNGE IL 20% DI COPERTURA .....	114
FIGURA 8.11 ANDAMENTO DI UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA-BIOMASSA CON PRECIPITAZIONE REALE DI SCENARIO NEL SITO DI LESOTHO CON MODELLO STGD. $P_F$ È ASSUNTA NULLA FINO A CHE LA BIOMASSA NON RAGGIUNGE IL 20% DI COPERTURA .....	114
FIGURA 8.12 ANDAMENTO DI UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA-BIOMASSA CON PRECIPITAZIONE REALE DI SCENARIO NEL SITO DI SKUKUZA CON MODELLO STGD. $P_F$ È ASSUNTA NULLA FINO A CHE LA BIOMASSA NON RAGGIUNGE IL 20% DI COPERTURA .....	115
FIGURA 8.13 ANDAMENTO DI UMIDITÀ DEL SUOLO-ALBERI-ERBA-BIOMASSA CON PRECIPITAZIONE REALE DI SCENARIO NEL SITO DI LESOTHO CON MODELLO STGD. $P_F$ È ASSUNTA NULLA FINO A CHE LA BIOMASSA NON RAGGIUNGE IL 20% DI COPERTURA .....	115
FIGURA 9.1 SCHEMA DEL MODELLO DISCRETO. A TITOLO ESEMPLIFICATIVO È MOSTRATA LA DINAMICA DI ALBERI ED ERBA PER 2 ANNI .....	118
FIGURA 9.2 ANDAMENTO DELLE DIFFERENTI $P_F$ UTILIZZATE NELLE SIMULAZIONI I .....	121
FIGURA 9.3 ANDAMENTO DELLA DINAMICA ALBERI-ERBA IN PRESENZA DI INCENDI CON PROBABILITÀ DESCRITTA DALLA FUNZIONE $P_{F1}$ RAPPRESENTATA IN FIG.9.2. MODELLO DISCRETO. CONDIZIONI INIZIALI: T=0.2 E G=0.66 .....	122
FIGURA 9.4 ANDAMENTO DELLA DINAMICA ALBERI-ERBA IN PRESENZA DI INCENDIO CON PROBABILITÀ DESCRITTA DALLA FUNZIONE $P_{F1}$ RAPPRESENTATA IN FIG.9.2. MODELLO DISCRETO. CONDIZIONI INIZIALI: T=0.09 E G=0.7 .....	122
FIGURA 9.5 ANDAMENTO DELLA DINAMICA ALBERI-ERBA IN PRESENZA DI INCENDIO CON PROBABILITÀ DESCRITTA DALLA FUNZIONE $P_{F2}$ RAPPRESENTATA IN FIG.9.2. MODELLO DISCRETO. CONDIZIONI INIZIALI: T=0.2 E G=0.66. ....	123
FIGURA 9.6 ANDAMENTO DELLA DINAMICA ALBERI-ERBA IN PRESENZA DI INCENDIO CON PROBABILITÀ DESCRITTA DALLA FUNZIONE $P_{F2}$ RAPPRESENTATA IN FIG.9.2. MODELLO DISCRETO .CONDIZIONI INIZIALI: T=0.09 E G=0.7 .....	123
FIGURA 9.7 ANDAMENTO DELLA DINAMICA ALBERI-ERBA IN PRESENZA DI INCENDIO CON PROBABILITÀ DESCRITTA DALLA FUNZIONE $P_{F3}$ RAPPRESENTATA IN FIG.9.2. MODELLO DISCRETO .CONDIZIONI INIZIALI: T=0.2 E G=0.66 .....	124
FIGURA 9.8 ANDAMENTO DELLA DINAMICA ALBERI-ERBA IN PRESENZA DI INCENDIO CON PROBABILITÀ DESCRITTA DALLA FUNZIONE $P_{F3}$ RAPPRESENTATA IN FIG.9.2. MODELLO DISCRETO .CONDIZIONI INIZIALI: T=0.09 E G=0.7 .....	124
FIGURA 9.9 ANDAMENTO DELLA DINAMICA ALBERI-ERBA IN PRESENZA DI INCENDIO CON PROBABILITÀ DESCRITTA DALLA FUNZIONE $P_{F4}$ RAPPRESENTATA IN FIG.9.2. MODELLO DISCRETO .CONDIZIONI INIZIALI: T=0.2 E G=0.66 .....	125
FIGURA 9.10 ANDAMENTO DELLA DINAMICA ALBERI-ERBA IN PRESENZA DI INCENDIO CON PROBABILITÀ DESCRITTA DALLA FUNZIONE $P_{F4}$ RAPPRESENTATA IN FIG.9.2. MODELLO DISCRETO .CONDIZIONI INIZIALI: T=0.09 E G=0.7 .....	125
FIGURA 10.1 MODELLO DISCRETO A CLASSI DI ETÀ: GRAFO DELLE POSSIBILI TRANSIZIONI DA UNA CLASSE D'ETÀ ALL'ALTRA NELLA STAGIONE UMIDA E SOTTO L'IPOTESI DI $P_0$ COSTANTE .....	130
FIGURA 10.2 MODELLO DISCRETO A CLASSI DI ETÀ: GRAFO DELLE POSSIBILI TRANSIZIONI DA UNA CLASSE D'ETÀ ALL'ALTRA NELLA STAGIONE SECCA IN ASSENZA DI INCENDI .....	131

FIGURA 10.3 MODELLO DISCRETO A CLASSI DI ETÀ: GRAFO DELLE POSSIBILI TRANSIZIONI DA UNA CLASSE D'ETÀ ALL'ALTRA NELLA STAGIONE SECCA IN PRESENZA DI INCENDI .....	131
FIGURA 10.4 MODELLO DISCRETO A CLASSI DI ETÀ: GRAFO DELLE POSSIBILI TRANSIZIONI DA UNA CLASSE D'ETÀ ALL'ALTRA NELLA STAGIONE UMIDA SOTTO L'IPOTESI DI $p_0$ FUNZIONE DI T2 E T3 .....	132
FIGURA 10.5 SIMULAZIONE DEL MODELLO DISCRETO A CLASSI D'ETÀ PER GLI ALBERI CON SET DI PARAMETRI DI TABELLA 10.2 .....	137
FIGURA 10.6 SIMULAZIONE DEL MODELLO DISCRETO A CLASSI D'ETÀ PER GLI ALBERI CON SET DI PARAMETRI DI TABELLA 10.3 .....	138
FIGURA 10.7 INGRANDIMENTO DALL'ANNO 350 ALL'ANNO 450 DELLA SIMULAZIONE DEL MODELLO DISCRETO A CLASSI D'ETÀ PER GLI ALBERI CON SET DI PARAMETRI DI TABELLA 10.4 .....	139

# Indice delle tabelle

TABELLA 4.1. CONFRONTO DI VALORI MEDI DI PRECIPITAZIONE MENSILE PER SERIE STORICA E SERIE DI SCENARIO NEL SITO SKUKUZA.....	32
TABELLA 5.1. TIPI FUNZIONALI DI PIANTE (PFT).....	41
TABELLA 5.2. ALTEZZE DEI TIPI FUNZIONALI DI PIANTE (PFT). ....	42
TABELLA 5.3. BIOGEOGRAFIA DEI TIPI FUNZIONALI DI PIANTE (PFT) RISPETTO AL CLIMA.....	55
TABELLA 5.4. INPUT ATMOSFERICO AL MODELLO CLM.....	58
TABELLA 5.5. OUTPUT DEL CLM AL MODELLO ATMOSFERICO.....	58
TABELLA 5.6. DATI SUPERFICIALI RICHIESTI PER IL CLM, LORO RISOLUZIONE SPAZIALE DI BASE E METODO DI AGGREGAZIONE ALLA GRIGLIA DEL MODELLO.....	61
TABELLA 5.7. TEMPI DI SPIN-UP DEL CLM IN MODALITÀ SINGLE SITE NECESSARI PER IL RAGGIUNGIMENTO DI UNO STATO DI EQUILIBRIO CON IL CLIMA.....	63
TABELLA 5.8. TEMPI DI SPIN-UP DEL CLM IN MODALITÀ SPAZIALMENTE DISTRIBUITA NECESSARI PER IL RAGGIUNGIMENTO DI UNO STATO DI EQUILIBRIO CON IL CLIMA.....	63
TABELLA 5.9. VALORI ANNUALI DELLE VARIABILI IDROLOGICHE OTTENUTI CON IL MODELLO CLM PER SKUKUZA. NELL'ULTIMA COLONNA È INDICATO IL VALORE DI RIFERIMENTO IN LETTERATURA.....	68
TABELLA 5.10. VALORI ANNUALI DELLE VARIABILI RELATIVE ALLA PRODUTTIVITÀ OTTENUTI CON IL MODELLO CLM PER LA SIMULAZIONE EFFETTUATA A SKUKUZA. NELLE ULTIME DUE COLONNE SONO RIPORTATI I VALORI DI RIFERIMENTO IN LETTERATURA.....	69
TABELLA 5.11. VALORI ANNUALI DELLE VARIABILI IDROLOGICHE OTTENUTI CON IL MODELLO CLM PER LA SIMULAZIONE EFFETTUATA A LESOTHO.....	72
TABELLA 5.12. VALORI ANNUALI DELLE VARIABILI RELATIVE ALLA PRODUTTIVITÀ OTTENUTI CON IL MODELLO CLM PER LA SIMULAZIONE EFFETTUATA A LESOTHO. NELL'ULTIMA COLONNA SONO RIPORTATI I VALORI DI RIFERIMENTO IN LETTERATURA.....	73
TABELLA 7.1. PARAMETRI TARATI MODELLO MINIMALE STG.....	92
TABELLA 7.2. PARAMETRI UTILIZZATI NELLA SIMULAZIONE DEL MODELLO MINIMALE STG.....	94
TABELLA 8.1. PARAMETRI UTILIZZATI NELLA SIMULAZIONE DEL MODELLO MINIMALE STGD.....	107
TABELLA 9.1. VALORI DEI PARAMETRI UTILIZZATI NEL MODELLO DISCRETO.....	121

TABELLA 10.1. PARAMETRI FISSI UTILIZZATI NELLA SIMULAZIONE DEL MODELLO DISCRETO IN CLASSI D'ETÀ PER GLI ALBERI .	135
TABELLA 10.2. PARAMETRI UTILIZZATI NELLA SIMULAZIONE DI FIG. 10.5 DEL MODELLO DISCRETO IN CLASSI D'ETÀ PER GLI ALBERI .	137
TABELLA 10.3. PARAMETRI UTILIZZATI NELLA SIMULAZIONE DI FIG. 10.6 DEL MODELLO DISCRETO IN CLASSI D'ETÀ PER GLI ALBERI .	137
TABELLA 10.4. PARAMETRI UTILIZZATI NELLA SIMULAZIONE DI FIG. 10.7 DEL MODELLO DISCRETO IN CLASSI D'ETÀ PER GLI ALBERI .	139
TABELLA A.1. COSTANTI FISICHE.	155



# Sintesi

La predizione delle dinamiche di un ecosistema sotto condizioni di cambiamento climatico, è uno dei principali obiettivi dell' ecologia moderna. Tale problematica è di particolare interesse negli ecosistemi aridi e semi-aridi, i quali, con il passare degli anni, possono subire trasformazioni quasi irreversibili: in tale ottica si inserisce il Sud Africa, dove circa il 60% del territorio è semi-arido e a rischio di desertificazione.

Al fine di comprendere quali siano i fattori che maggiormente possano condurre a tale problematica, è utile studiare l'andamento delle dinamiche della vegetazione ed i fattori influenti su di esse. Nel presente lavoro di tesi, dunque, dopo una breve introduzione di inquadramento sul cambiamento climatico, si proporrà un approccio all'analisi degli impatti sugli ecosistemi del tutto alternativo: verranno effettuate simulazioni di scenario con modelli minimali e verranno mostrate le potenzialità di modelli discreti per eventuali sviluppi futuri nell'analisi.

Si metteranno in luce, inoltre, il ruolo che assumono i 'disturbi' (intendendo con tale termine, precipitazione, incendi ed erbivori) sull'ecosistema.

Verrà presentato e utilizzato per alcune simulazioni anche il Community Land Model (CLM), modello spazialmente distribuito completamente diverso da quelli minimali. Ciò al fine di mostrare come le due filosofie su cui si basano le due diverse tipologie di modelli siano allo stesso tempo opposte ma complementari: il CLM, complesso nella struttura e nell'implementazione e dispendioso in termini di tempo per le simulazioni, offre in uscita valori di moltissime variabili, utili per effettuare stime numeriche, viceversa i modelli minimali, semplici nella formulazione analitica e veloci nella simulazione, carpiscono l'andamento generale dei fenomeni evidenziando i trend di poche variabili scelte. Come sarà mostrato nella tesi, si tratta di due filosofie e approcci molto diversi che però, se utilizzati in modo oculato e ciascuno per finalità appropriate, possono essere utili per lo studio degli ecosistemi.





# CAPITOLO 1

## INTRODUZIONE

Predire le dinamiche di un ecosistema sotto condizioni di cambiamento climatico, è uno dei maggiori obiettivi dell'ecologia moderna. Ciò è reso più difficile dalla dinamica complessa che caratterizza gli ecosistemi stessi e dalla natura stocastica delle forzanti chiave.

Le forzanti ambientali (tra cui clima, nutrienti, incendi ed erbivori) cambiano nel tempo e nello spazio, talvolta gradualmente (Vitousek et al., 1997, Tilman, 2001), talvolta, invece, meno gradualmente, se non addirittura in modo brusco. Le risposte degli ecosistemi a tali cambiamenti possono essere continue e regolari, oppure repentine, con la conseguente manifestazione di brusche variazioni in copertura vegetale sia nel tempo che nello spazio (Scheffer et al., 2001).

Tale problematica è di particolare interesse negli ecosistemi aridi e semi-aridi, i quali possono passare, talvolta persino in modo irreversibile, in stati poco desiderabili (si pensi ad esempio al fenomeno della desertificazione). Secondo il Millenium Ecosystem Assessment (MEA 2005) cambiamenti potrebbero portare ad un'estensione della desertificazione che andrebbe ad inficiare sui beni di sussistenza appartenenti a più del 25% della popolazione mondiale.

In tale ottica si inserisce il Sud Africa: circa il 60% del Sud Africa è semi-arido e a rischio di desertificazione, fenomeno che cambia il volto del territorio trasformando aree produttive in aree non-produttive.

Al fine di comprendere quali siano i fattori maggiormente in grado di condurre a tale problematica, è utile analizzare a fondo le dinamiche della vegetazione che caratterizzano tali aree ed i fattori influenti su di esse.

Per questo motivo, lo scopo del presente elaborato di tesi si configura nell'approcciare il problema del cambiamento climatico in Sudafrica: ci si propone di effettuare simulazioni con vari modelli su scenari di cambiamento climatico al fine di carpire l'andamento generale dei

fenomeni di dinamica della vegetazione e le interazione con i fattori di disturbo (precipitazione, incendi ed erbivori).

Si sviluppa una serie di modelli *minimali* che modellizzano le dinamiche della vegetazione con un sistema di equazioni differenziali o discrete. Questo tipo di modelli sembra costituire il giusto compromesso tra la semplicità analitica della struttura e l'aderenza ai processi che si verificano nella realtà. In particolare, nel presente elaborato, vengono mostrate tutte le tappe di progressivo avvicinamento del modello puntuale ai fenomeni reali : dal modello *Soil moisture-Tree-Grass* (STG) costituito da tre equazioni differenziali, si passa al *Soil Moisture-Tree-Grass-Dead grass* (STGD) che prevede l'introduzione di un'importante variabile di interazione con gli incendi (l'erba secca), per passare a modelli discretizzati stagionalmente che permettono di cogliere al meglio l'andamento stagionale dei fenomeni.

Al fine di sottolineare i pregi dei modelli minimali, verrà usato per alcune simulazioni un modello filosoficamente opposto: il Community Land Model (CLM), un modello spazialmente distribuito in grado di effettuare simulazioni a scala anche globale con l'impiego di un elevatissimo numero di variabili. Alla semplicità analitica e velocità di simulazione dei modelli minimali, si contrappone quindi un modello complesso nella struttura e nell'implementazione e dispendioso in termini di tempo per le simulazioni. Tuttavia, nonostante il CLM si voglia configurare come complicata ed esaustiva riproduzione del mondo reale, esso non si mostra sufficientemente in grado di restituire risultati del tutto verosimili. Per questo motivo, si ritiene che il suo utilizzo in simulazioni di scenario potrebbe condurre ad alcune difficoltà.

Il presente elaborato è strutturato nel modo seguente: nel capitolo 2 viene inquadrato il problema del cambiamento climatico, facendo riferimento anche a valutazioni scientifiche in merito a tale problematica e vengono descritti i biomi sudafricani scelti come "laboratorio" di analisi; nel capitolo 3 vengono introdotti i fenomeni che principalmente influiscono sulle dinamiche degli ecosistemi; nel capitolo 4 vengono introdotti i siti di studio (Skukuza e Lesotho) appartenenti ai biomi identificati nel capitolo 2 e per ognuno di essi viene presentata la precipitazione di scenario utilizzata per le analisi successive; nel capitolo 5 viene introdotto il modello spazialmente distribuito CLM e vengono mostrate alcune simulazioni svolte per i siti identificati; nel capitolo 6 viene proposta una panoramica per la modellazione della dinamica di vegetazione caratterizzante biomi aridi o semi aridi; nel capitolo 7 verrà introdotto il modello minimale *Soil moisture-Tree-Grass* (STG) con le rispettive simulazioni per i siti di interesse; analogamente sarà fatto nel capitolo 8 per il modello minimale *Soil moisture-Tree-Gras-Dead Grass* (STGD). Nei capitoli 9 e 10 verranno introdotti modelli discreti utili al fine di un'analisi condotta con un approccio un po' diverso rispetto a quello solitamente adottato; infine nel capitolo 11 verranno presentate le conclusioni e saranno prospettati i possibili sviluppi futuri del lavoro svolto finora.

# **CAPITOLO 2**

## **UNO SGUARDO AL FUTURO**

Un ecosistema è generalmente definito come l'insieme di relazioni che si stabiliscono tra organismi e l'ambiente in cui essi vivono. Esso è un'unità aperta e funzionale derivante dall'interazione di componenti abiotici (terreno, acqua, luce, nutrienti inorganici e clima) e biotici (piante, animali e microorganismi che sono categorizzati sia come produttori che consumatori). Il clima è parte integrante dell'ecosistema e gli organismi si sono adattati al loro clima specifico lungo il tempo. Per questo motivo il cambiamento climatico è un fattore che ha la potenzialità di alterare gli ecosistemi e le molte risorse e servizi che essi forniscono all'intera società.

In questo Capitolo verranno introdotte alcune valutazioni sul cambiamento climatico addotte da IPCC e dal Millenium Ecosystem Assesment, verrà data una breve descrizione degli scenari di emissione e infine saranno illustrati i biomi studiati nel presente lavoro di tesi.

### **2.1 Il parere degli esperti**

Attualmente molti campi di ricerca si stanno confrontando con le influenze del cambiamento climatico sugli ecosistemi al fine di garantire il benessere della società e identificare solide basi scientifiche sulle quali fondare politiche e strategie volte alla conservazione e alla sostenibilità degli ecosistemi stessi e delle loro interazioni con l'uomo. Si riportano dunque, nel resto del capitolo, alcune linee di ricerca adottate da enti che studiano il ruolo del cambiamento climatico negli ecosistemi, nonché il sunto di alcuni report redatti in merito a tale questione.

### 2.1.1 Report sul cambiamento climatico

La predizione dell'evoluzione degli ecosistemi in condizioni di cambiamento climatico è uno dei temi più scottanti per l'ecologia, ed è reso sempre più attuale ed importante alla luce dei molto profondi cambiamenti che stanno avvenendo nell'intero globo nell'era attuale. Tuttavia, rimane una scienza ancora ai primi stadi di sviluppo. Recenti valutazioni scientifiche hanno sottolineato i rischi conseguenti a improvvisi e irreversibili cambiamenti negli ecosistemi e per questo hanno indirizzato la ricerca verso questi temi (MEA 2005, IPCC 2007a, b, CCSP 2009).

Il *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA 2005) ha sintetizzato le tracce di cambiamento negli ecosistemi basandosi su letteratura scientifica e su modelli e datasets di pari importanza. La fig. 2.1 mostra i risultati per lo spettro di territori aridi ed ecosistemi forestali d'interesse a questo proposito. Le celle colorate indicano l'impatto di ogni driver mentre le frecce indicano il trend nel driver. Le frecce orizzontali indicano una continuazione nel livello corrente di impatto; le frecce diagonali verso l'alto indicano una crescita del corrente livello di impatto; quelle verticali indicano un progressivo e sempre più evidente aumento dell'impatto. Quindi, per esempio, se un ecosistema ha sperimentato un impatto molto alto di un particolare driver nel secolo scorso (come ad esempio l'impatto di specie invasive sulle isole), la freccia orizzontale indica che questo impatto continuerà con la stessa intensità. Il report mostra che gli ecosistemi aridi saranno particolarmente vulnerabili ai cambiamenti nei prossimi 50 anni: proprio per questo motivo si è scelto il Sudafrica come area di analisi nel presente elaborato. Si evidenzia inoltre che c'è un'indicazione chiara ma parzialmente incompleta del fatto che la probabilità di cambiamenti non lineari negli ecosistemi sta crescendo, indicando in questo modo la concentrazione di maggiore sforzo verso tale linea di ricerca.

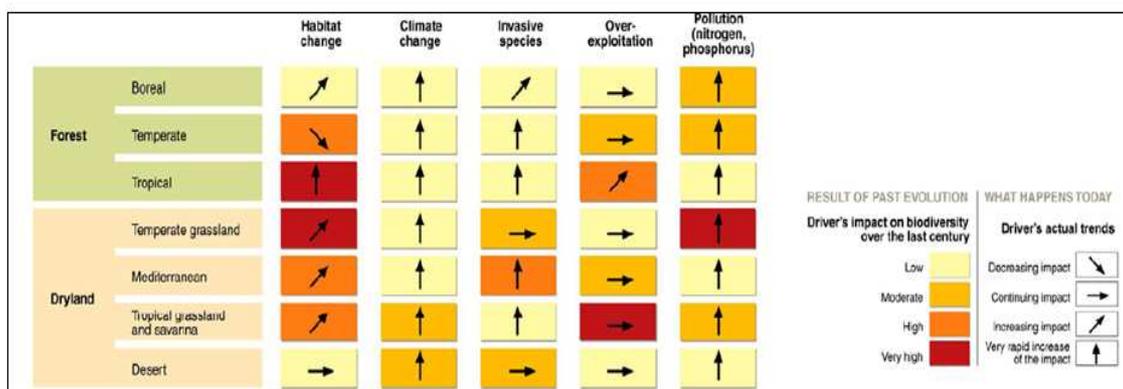


Figure 2.1. Impatto di ogni driver sulla biodiversità in ogni tipo di ecosistema sui 50-100 anni passati (MEA 2005)

---

L'*Intergovernmental Panel on Climate Change* report (IPCC 2007) si focalizza sugli impatti del cambiamento climatico sugli ecosistemi. Esso presenta le seguenti osservazioni chiave:

- La resilienza di molti ecosistemi sarà probabilmente abbattuta da una combinazione di cambiamenti climatici e disturbi associati senza precedenti (ad esempio alluvioni, siccità, incendi, insetti) e altri drivers di cambiamento globale (ad esempio il cambiamento di uso del suolo, i nutrienti, la frammentazione dei sistemi naturali, il sovra sfruttamento delle risorse).
- Nel corso di questo secolo, l'assorbimento netto di carbonio da parte di ecosistemi toccherà un picco prima di metà secolo per poi abbassarsi amplificando in questo modo il cambiamento globale.
- Approssimativamente dal 20 al 30% di specie di piante e animali sono con grande probabilità a rischio estinzione se la temperatura media mondiale eccede da 1.5 a 2.5°C.
- Per crescite in temperatura globale eccedenti da 1.5 a 2.5°C contemporaneamente all'incremento delle concentrazioni atmosferiche di CO<sub>2</sub>, sono stati proiettati gli scenari di cambiamento climatico maggiore nella struttura e nella funzione degli ecosistemi, nelle interazioni ecologiche e spostamenti nella geografia, prevalentemente con conseguenze negative per biodiversità e beni e servizi degli ecosistemi.

L'U.S. *Climate Change Science Program* report (CCSP 2009) presenta lo stato della consapevolezza scientifica circa i potenziali cambiamenti improvvisi o gli spostamenti delle dinamiche regime negli ecosistemi in risposta al cambiamento climatico. Il report riconosce l'importanza delle soglie ecologiche. Un esempio dell'improvviso cambiamento ecologico che rientra nell'attuale definizione qualitativa di soglia ecologica è il riscaldamento della tundra Artica. Nel report viene appunto analizzato tale aspetto ed in particolare è stata analizzata, tra i molti effetti rilevati in conseguenza all'aumento della temperatura, la riduzione della durata temporale di copertura nevosa che porta ad una riduzione della riflettività della superficie.

### **2.1.2 Drivers del cambiamento climatico**

Secondo l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* report (IPCC 2007), le cause del cambiamento climatico sono sia di origine naturali che antropica. Un tema molto importante a questo proposito è quello riguardante le emissioni di gas serra, dai quali dipende l'andamento della forzante "radiazione". Secondo l'IPCC le emissioni di gas serra dovute ad attività umane sono cresciute dall'età pre-industriale, con un aumento del 70% dal 1970 al 2004 (Fig.2.2).

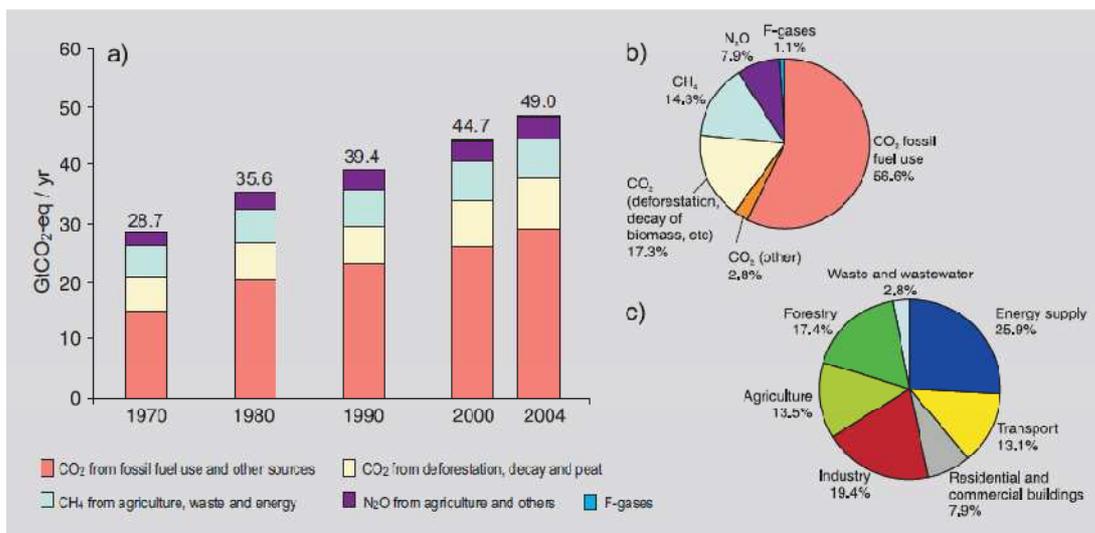


Figura 2.2 (a) Emissioni annuali a scala globale di gas serra antropogenici dal 1970 al 2004. (b) Suddivisione dei diversi gas serra di origine antropica influenti sulle emissioni del 2004 in termini di CO<sub>2</sub>-eq.

L'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) è il più importante gas serra di origine antropica. Le sue emissioni annuali sono cresciute tra il 1970 al 2004 di circa l'80%, dal 21 a 38 gigatonnellate (Gt), e ha rappresentato il 77% delle emissioni totali di gas serra di origine antropica nel 2004 (Fig.2.2). Il tasso di crescita delle emissioni di CO<sub>2</sub>-eq fu molto più alto durante i 10 anni dal 1995 al 2004 (0.92 Gt CO<sub>2</sub>-eq per anno) che durante il periodo precedente dal 1970 al 1994 (0.43 Gt CO<sub>2</sub>-eq per anno). I maggior aumento in termini di emissioni di gas serra tra il 1970 al 2004 è derivato dalla richiesta di energia, dai trasporti e industrie, mentre le emissioni dovuti a edifici residenziali e commerciali, alla silvicoltura (intendendo con essa la deforestazione) e ai settori agricoli, hanno avuto un tasso di crescita più basso.

L'effetto della decrescita nell'impatto energetico (-33%) sulle emissioni globali durante il periodo dal 1970 al 2004, è stato più piccolo dell'effetto combinato della crescita del reddito globale (77%) e della crescita della popolazione stessa (69%); entrambi si configurano essere drivers delle crescenti emissioni CO<sub>2</sub> legate all'energia.

### 2.1.3 Gli scenari di cambiamento climatico

E' ormai chiaro che, nonostante le politiche di mitigazione per l'attuale cambiamento globale e le prassi di sviluppo sostenibile ad esse collegate, le emissioni globali di gas serra continueranno a crescere nelle prossime decadi. La linea base degli scenari di emissione pubblicati dall'*IPCC Special Report on Emission Scenarios* (SRES, 2000) sono confrontabili nell'intervallo di valori con quelli presentati in Figura 2.3.

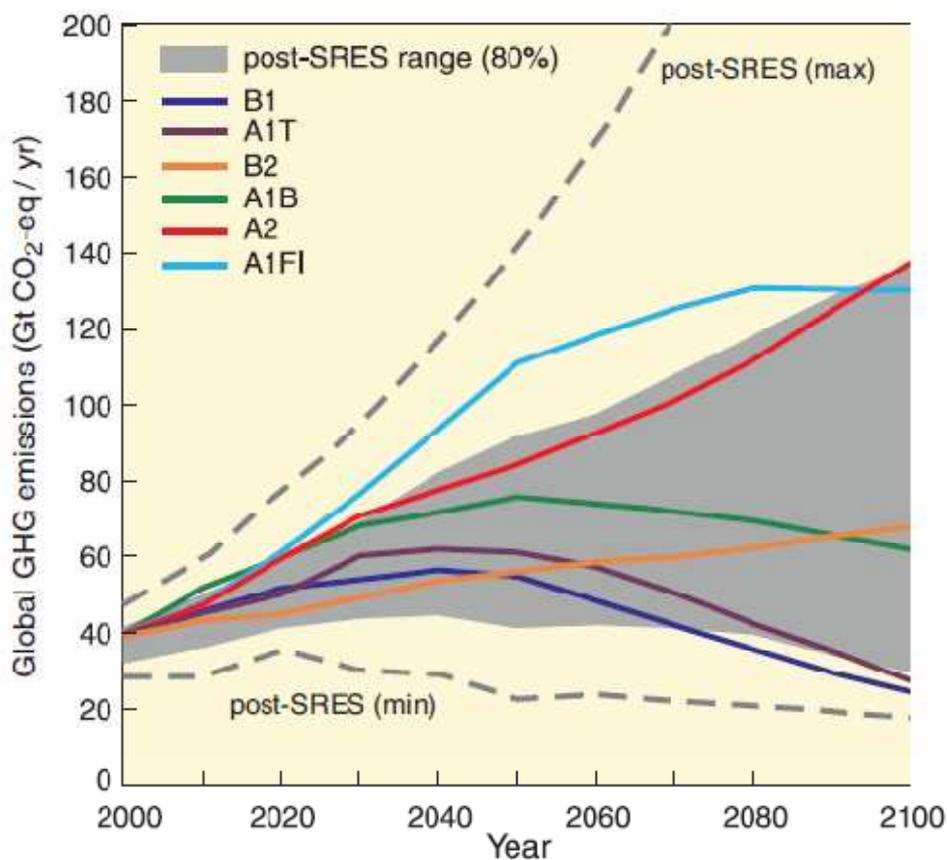


Figura 2.3 Emissioni globali di gas serra (in GtCO<sub>2</sub> per anno) in assenza di politiche climatiche aggiuntive: sei linee di differenti colori rappresentano gli SRES e l'intervallo relative all' 80-esimo percentile degli scenari (post-SRES) (area colorata in grigio). Le linee tratteggiate mostrano l'intero intervallo degli scenari post-SRES. Le emissioni includono CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e gas composti da F.

Gli scenari SRES prevedono un incremento delle emissioni globali di gas serra in un range da 9.7 a 36.7 GtCO<sub>2</sub>-eq (25 a 90%) tra il 2000 al 2030. In questi scenari, i combustibili fossili manterranno una posizione dominante nel mix energetico globale fino al 2030 e oltre. Quindi le emissioni di CO<sub>2</sub> per cause energetiche tra il 2000 e il 2030 è previsto crescere dal 40 fino al 110% .

Gli studi pubblicati dal SRES in avanti (ad esempio gli scenari post-SRES) hanno utilizzato dei valori più bassi per alcuni drivers di emissioni e specialmente più bassi per le proiezioni di popolazione. Tuttavia, in risposta a questi studi che comprendono questi nuovi tipi di proiezione demografica, i cambiamenti nei drivers, così come la crescita economica, si sono avuti piccoli cambiamenti nei livelli totali di emissione. Le proiezioni di crescita economica per Africa, America Latina e Medio Oriente al 2030 negli scenari post-SRES sono più basse che negli scenari SRES, ma hanno un'influenza minore sulla crescita globale economica e sulla totalità delle emissioni.

Gli scenari SRES sono raggruppati in quattro famiglie (A1, A2, B1 and B2), le quali analizzano i diversi percorsi di sviluppo, coprendo una vasta gamma di forzanti demografiche, economiche e tecnologiche e le conseguenti emissioni di gas serra. Gli scenari SRES non includono politiche climatiche aggiuntive oltre quelli adottati attualmente. Le proiezioni di emissioni sono ampiamente utilizzate nelle valutazioni dei cambiamenti climatici futuri e le assunzioni circa i cambiamenti socio-economici, demografici e tecnologici, sulle quali si basano, sono utilizzati come input per molte valutazioni recenti sulla vulnerabilità al cambiamento climatico e sull'impatto su di esso.

Lo scenario A1 assume:

- un mondo in rapida crescita economica
- una popolazione globale che ha un picco a metà secolo
- una rapida introduzione di nuove e più efficienti tecnologie.

A1 è diviso in 3 gruppi che descrivono direzioni alternative del cambiamento tecnologico: sfruttamento intensivo del combustibile fossile (A1FI), sfruttamento di risorse energetiche alternative (A1T) e sfruttamento bilanciato tra tutte le tipologie di risorse (A1B).

Lo scenario B1 assume:

- Una rapida crescita economica
- Popolazione crescente fino a 9 miliardi nel 2050 e poi una decrescita
- Riduzione dell'impatto dei materiali e l'introduzione di tecnologie efficienti e pulite.
- Viene infine data evidenza alle soluzioni globali per la stabilità economica, sociale ed ambientale.

Lo scenario B2 assume:

- un mondo caratterizzato da una crescita economica e demografica intermedia tra A1 e B1
- attenzione particolare per soluzioni locali per la sostenibilità economica, sociale e ambientale

Lo scenario A2 assume:

- un mondo eterogeneo con elevata crescita demografica
- lento sviluppo economico
- lento cambiamento tecnologico.

Nel presente lavoro di tesi viene scelto lo scenario B1 come linea base per il calcolo della precipitazione utilizzata in ingresso ai modelli di dinamica di vegetazione descritti nei Capitoli 7 e 8. Nei seguenti paragrafi verrà descritta a grandi linee la procedura con cui la precipitazione è stata ottenuta nonché se ne confronteranno i valori con quelli caratterizzanti le serie storiche.

---

## 2.2 Il caso di specie: il Sudafrica

Nelle valutazioni sul cambiamento climatico presentate nei paragrafi precedenti, viene messo in luce come il cambiamento climatico avrà un forte impatto nelle aree aride e semi aride. Per tale motivo nel presente elaborato si è scelto di studiare il Sudafrica: infatti circa il 60% del Paese è semi-arido e a rischio di desertificazione.

Nel presente capitolo verranno descritte le caratteristiche principali del Sudafrica evidenziandone in particolar modo le criticità. Verranno presentati inoltre due biomi caratteristici del Paese: la savana e la prateria.

### 2.2.1 Valutazioni sul futuro del Paese

Il Sud Africa è caratterizzato da cinque biomi dominanti spazialmente, chiamati Fynbos, Succulent Karoo, Nama Karoo, Grassland (Prateria) e Savana, con due biomi di piccola estensione geografica, il Deserto e la Foresta. Alcuni di questi biomi sono unici al mondo e sono caratterizzati da livelli straordinari di abbondanza ed endemismo come Fynbos e Succulent Karoo. Il bioma Grassland contiene molte specie endemiche, nonostante non sia tradizionalmente riconosciuto come un centro di endemismo. Il Nama Karoo si trova in Sud Africa, in Namibia e in Botswana, ha un basso livello di biodiversità vegetale e di endemismo. La Savana è il bioma più diffuso dell'Africa.

I biomi sono influenzati dal clima di una regione e in particolare dalla quantità di precipitazione annua e dalla sua partizione durante l'anno (la quantità durante la stagione secca e la quantità durante la stagione umida). Il Deserto è caratterizzato da una precipitazione annua media di 10 *mm* ad ovest, 70 o 80 *mm* nel margine nelle zone interne. Il Succulent Karoo è caratterizzato da una precipitazione compresa tra 20 e 290 *mm* all'anno. Il Fynbos tende ad occorrere dove la precipitazione è tra i 250 e i 600 *mm* l'anno. Il Nama Karoo ha una precipitazione che varia tra i 100 e i 520 *mm* per anno. Nella Savana la precipitazione oscilla tra i 235 e i 1000 *mm*. La Foresta è caratterizzata da più di 525 *mm* nella regione di precipitazione invernale e da più di 725 *mm* nella regione di precipitazione estiva. Per una visualizzazione dei biomi che caratterizzano il Sudafrica si faccia riferimento alla Figura 2.4.

Come detto nell'introduzione, il 60% del Paese è semi-arido e a rischio di desertificazione; la desertificazione è un fenomeno che cambia il volto del territorio trasformando aree produttive in aree non-produttive, a causa, soprattutto, delle attività umane e delle variazioni climatiche. In Sud Africa il 60% del paese riceve meno che 600 *mm* di pioggia l'anno (il minimo per un raccolto che abbia successo in un suolo secco), il 30% meno di 300 *mm* l'anno e il 21% meno di 200 *mm* all'anno.

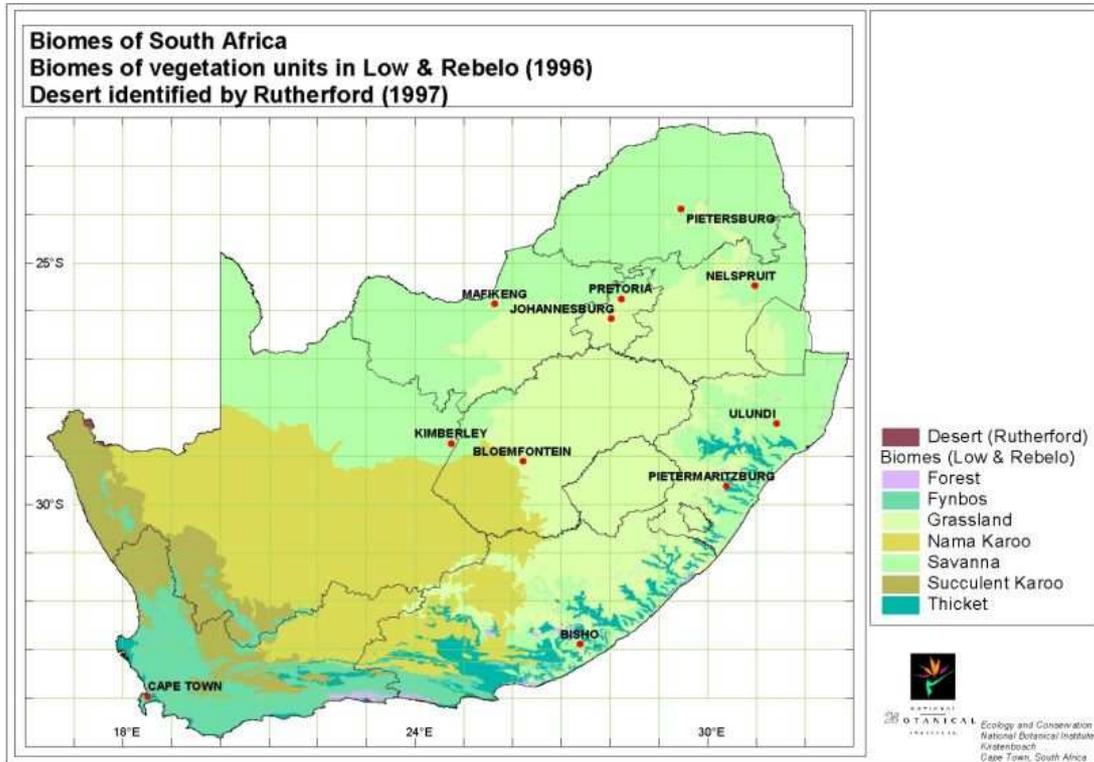


Figura 2.4 Distribuzione delle varie tipologie di bioma in Sudafrica

Secondo le stime dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* report nei prossimi decenni l'Africa sarà caratterizzata dai seguenti aspetti:

- Entro il 2020, tra 75 e 250 milioni di persone si prevede siano esposte a crescente stress idrico dovuto al cambiamento climatico.
- Entro il 2020, in alcune aree, le rese da colture pluviali potrebbero essere ridotte per più del 50%. La produzione agricola, includendo con essa la possibilità di accedere alle risorse nutritive, in gran parte dell'Africa risulterà seriamente compromessa. Ciò potrebbe incidere negativamente sulla sicurezza di risorse alimentari e esasperare la malnutrizione.
- Verso la fine del XXI secolo, l'innalzamento del livello del mare previsto invaderà le aree costiere basse caratterizzate da un'alta densità di popolazione. I costi per un ipotetico adattamento potrebbe ammontare da 5 al 10% del GDP.
- Entro il 2080, è previsto un incremento dal 5 all'8% di terreni aridi o semi aridi.

In particolare, secondo l'IPCC, nel Sudafrica, come nel Sahel, nel Mediterraneo e in zone a sud dell'Asia le precipitazioni sono destinate a decrescere e dunque tutte queste aree saranno soggette a siccità, fenomeno sempre più in crescita dal 1970.

---

Se il Sud Africa diverrà più caldo e più arido sotto l'influenza dei cambiamenti climatici globali, probabilmente i suoi ecosistemi aumenteranno la loro propensione alla invasioni da parte di specie tropicali non autoctone. Eventi climatici estremi, come le alluvioni, inaspriranno il problema, permettendo alle piante invasive di spostarsi verso le aree fluviali. La trasformazione e la frammentazione dell'ecosistema dovuta all'intervento umano tenderanno, inoltre, a promuovere l'ingresso e ad intensificare la diffusione di specie invasive, con impatti negativi molto gravi sulla biodiversità e sull'economia del Sud Africa e impatti concentrati su disponibilità idrica, frequenza e distribuzione territoriale degli incendi ed erosione del suolo.

L'effetto del cambiamento climatico sulla biodiversità e sulla desertificazione è complesso ed ancora non sufficientemente compreso (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Il cambiamento climatico, infatti, da un lato può influire in modo avverso sulla biodiversità e inasprire la desertificazione, a causa dell'aumento dell'evapotraspirazione e di una probabile diminuzione della precipitazione nei suoli aridi. Dall'altro lato però, poiché l'anidride carbonica è anche una delle maggiori risorse per la produzione della pianta, l'efficienza nell'utilizzo dell'acqua migliorerà significativamente per alcune specie di suolo arido, le quali potranno rispondere positivamente a questo aumento. Queste risposte contrastanti tra differenti specie vegetali potrebbero portare a dei cambiamenti nella composizione e nell'abbondanza delle specie con modalità difficili da prevedere, e che richiedono l'uso di modelli e approcci teorici appropriati al fine di fornire valutazioni robuste e affidabili alle autorità che sono chiamate alla gestione delle risorse naturali in Sud Africa.

## **2.3 Presentazione dei biomi analizzati**

Il seguente studio si focalizza su due biomi di grande importanza per il Sudafrica, soprattutto alla luce delle rilevanti conseguenze che potrebbe avere il cambiamento climatico su di esse, ovvero il bioma savana e il bioma prateria.

Nei due paragrafi verrà data una descrizione per ciascuno dei due, mettendone in rilievo, in particolar modo, le criticità in vista di possibili cambiamenti climatici.

### **2.3.1 La savana**

Le savane occupano circa il 20% della superficie terrestre mondiale e circa il 40% di quella dell'Africa. Esse in termini del loro contributo alla produzione primaria netta sono seconde soltanto alle foreste tropicali. Rappresentano un sostanziale serbatoio di carbonio organico

terrestre che nei decenni futuri potrebbe funzionare sia da fonte netta che da riserva di CO<sub>2</sub>. Le savane del mondo si trovano tutte in regioni calde caratterizzate da una marcata distribuzione stagionale della precipitazione. Nel corso dell'anno si possono distinguere una stagione secca calda (oppure due, nei climi monsonici) della durata dai tre agli otto mesi e una stagione umida calda per il resto dell'anno.

Il contenuto di materia organica dei suoli (spesso di natura sabbiosa) della savana è generalmente basso a conferma dell'elevato tasso di decomposizione della materia organica. Una vasta parte delle savane in Africa si trovano a quote maggiori dei 1000 m.

Molti studi hanno confermato che tale bioma è caratterizzato da coesistenza omogenea di alberi ed erba (Fig. 2.5): questo ha attratto l'attenzione di molti ecologi, portando alla formulazione della cosiddetta "Savanna Question" ovvero la domanda circa i fattori che permettano la coesistenza stabile ed omogenea di forme di vegetazione così contrastanti tra loro. Vari studi sono stati fatti in merito e sono emersi diversi fattori che potrebbero essere influenti nel determinare tale tipo di coesistenza, tra cui il regime pluviometrico, la temperatura, il tipo di suolo, gli incendi e gli erbivori. Per la trattazione di tali fattori si rimanda al Capitolo 3. Sono, inoltre, sorte varie scuole di pensiero volte a rispondere alla "Savanna Question": la principale distinzione tra i diversi approcci in Letteratura vede da una parte l'assunzione di esistenza di un equilibrio tra erba e alberi; dall'altra parte invece si assume che tale equilibrio non esista e che i disturbi giochino un ruolo fondamentale nell'impedire la completa esclusione di una delle due forme di vita. A questo "dibattito" viene dedicato l'intero capitolo 6 del presente elaborato.

Le savane possono essere classificate sia in base alla densità di vegetazione arborea, sia in base al regime pluviometrico annuale. Nel primo caso una brusca distinzione può essere fatta tra *open savanna* (bassa densità di alberi) e *closed savanna* (alta densità di alberi). Nella seconda classificazione viene distinta la *dry savanna*, nella quale il livello di pioggia annuale è approssimativamente tra i 200 mm yr<sup>-1</sup> e i 600 mm yr<sup>-1</sup>, dalla *moist* o *wet savanna* dove il livello di pioggia annuale eccede i 650 mm yr<sup>-1</sup>.

Una costante climatica caratteristica delle savane tropicali è la stagionalità: si constata una marcata alternanza tra stagione secca e stagione umida. Essa è più evidente nella *moist savanna* che nella *wet savanna*. Una diminuzione ingente del livello di precipitazione che caratterizza il suddetto bioma o uno sfasamento nella stagionalità del regime pluviometrico dovuto a cambiamenti climatici potrebbe seriamente compromettere il già precario equilibrio degli habitat presenti in questo importante bioma.



Figura 2.5. Vegetazione tipica del bioma savana.

### **2.3.2 La prateria**

La prateria si stende in quei luoghi in cui l'andamento delle precipitazioni, il forte vento, l'alto livello della falda idrica, il fuoco o particolari caratteristiche del suolo, precludono lo sviluppo della vegetazione arborea.

La quantità delle piante, e quindi la produttività, varia in funzione del regime delle piogge ed è massima per la prateria umida, minima per il subdeserto. Anche le praterie, come le savane, si possono distinguere in *umide* e *secche*.

Le *praterie umide* si intercalano ai boschi temperati nella parte centrale del Nordamerica, in Eurasia, in Argentina, mentre in Columbia e Venezuela i llanos sono situati a sud del Tropico del Cancro. Vi vegetano graminacee, leguminose e composite; hanno ruolo subalterno altre piante erbacee che cambiano da luogo a luogo. Grazie alla forte produttività la fauna di queste formazioni è abbondante e di grossa taglia.

Verso sud le praterie umide trapassano gradatamente nelle *praterie aride*. La più vasta e storicamente più importante è quella che dall'Anatolia centrale si stende in Mesopotamia, in Siria, Palestina fino alla valle dell'Indo. Anche nel continente africano sono presenti praterie secche. La produttività della prateria secca è piuttosto alta e a ciò fa riscontro il denso popolamento di grandi mammiferi e uccelli.

La prateria arida è molto vulnerabile: una modesta fluttuazione climatica, o una cattiva gestione da parte dell'uomo, ne causa la rapida degradazione a sub deserto e a deserto. Di ciò si hanno molte testimonianze storiche: lo sterile deserto della Sirtica, situato tra

Tripolitania e Cirenaica, duemila anni fa era molto fertile tanto che i Romani ne parlavano come del granaio d'Italia.

Proprio per questo motivo tale bioma è preso in analisi nella presente tesi.

Per quanto riguarda il Sud Africa, il suddetto bioma occupa principalmente l'alta pianura centrale del Paese le aree interne di KwaZuluNatal e di Eastern Cape. La topografia è soprattutto piana e l'altitudine varia fino a 2850 *m* sul livello del mare. Le praterie (Figura 2.6) sono dominate da un singolo strato erboso. Il grado di copertura dipende dalla precipitazione e dal pascolo. Gli alberi sono assenti eccetto in pochi habitat localizzati. Il gelo, gli incendi e il pascolo conservano il dominio delle specie erbose prevenendo lo stabilimento di alberi.



Figura 2.6. Vegetazione tipica del bioma prateria.

---

# **CAPITOLO 3**

## **FATTORI INFLUENTI SULLA COPERTURA VEGETALE**

L'effetto del cambiamento climatico sulla biodiversità, come detto nel capitolo precedente, è complesso ed ancora non sufficientemente compreso. Infatti se il clima gioca un ruolo importante all'interno degli ecosistemi, esistono altri fattori che ne influenzano le dinamiche. Le savane ad esempio si presentano sotto una vasta gamma di condizioni climatiche ed edafiche (ad esempio la precipitazione, la temperatura e la composizione del suolo). Dunque al fine di comprendere appieno le complesse dinamiche delle specie vegetali che si intrecciano all'interno di un ecosistema, vanno considerati anche altri fattori intrinseci all'ecosistema stesso.

In questo capitolo verranno presi in considerazione tutti i più importanti fattori influenti sulle dinamiche della vegetazione: il clima, gli incendi e gli erbivori.

### **3.1 Influenza del clima**

Una caratteristica dei climi tropicali è la stagionalità: essa si manifesta come una marcata alternanza di stagioni umide e stagioni secche. Le stagioni secche generalmente durano dai tre ai nove mesi. A conseguenza di ciò, si può affermare che i fattori climatici, in primis temperatura e regime pluviometrico, sono i principali responsabili per la distribuzione della vegetazione. Secondo Shmida e Burgess (1988), se ci si muove lungo un gradiente spaziale di precipitazione, si nota un passaggio da comunità vegetali in cui predomina la competizione per l'umidità del suolo a comunità in cui prevale la competizione per la luce. Dunque, l'effetto della pioggia è particolarmente importante in ambienti aridi e semi-aridi dove l'acqua è la principale risorsa limitante per la produzione primaria.

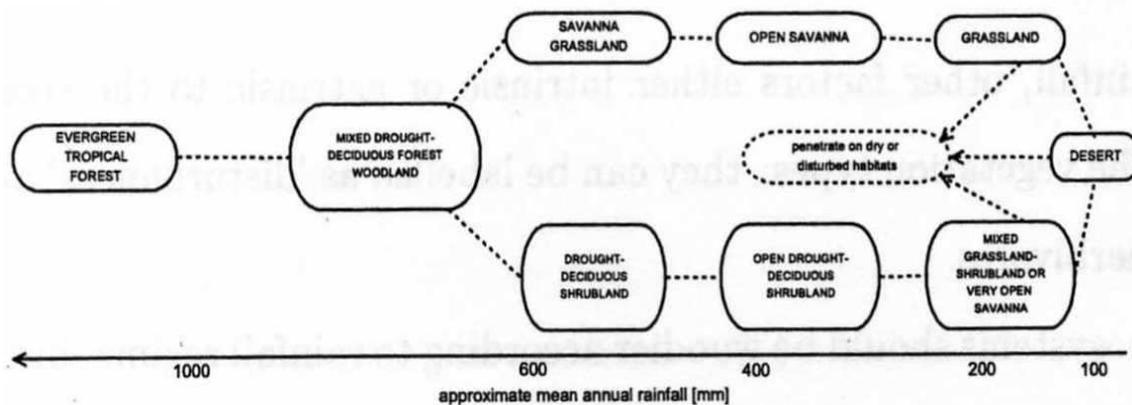


Figura 3.1. Schema di una Successione Subtropicale secondo Shmida e Burgess (1988)

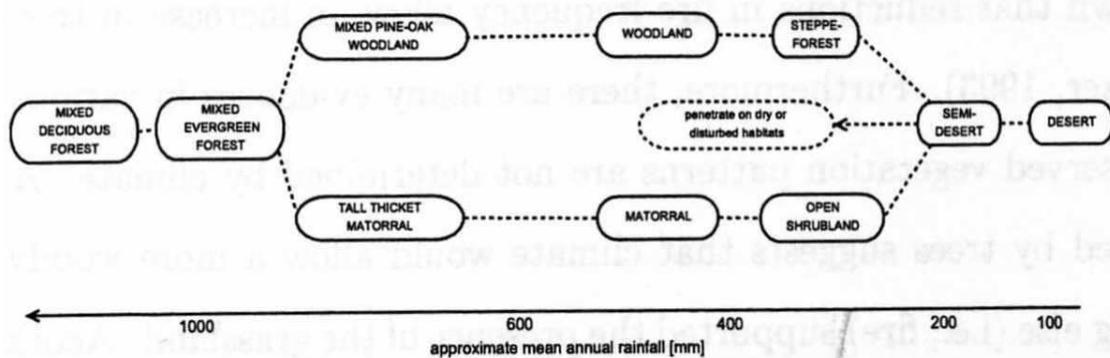


Figura 3.2. Schema di una Successione Mediterranea secondo Shmida e Burgess (1988)

La successione di copertura vegetale lungo il gradiente procede da quello che viene chiamato “contracted desert”, ovvero un bioma nel quale sono presenti piante perenni solo in particolari aree che ricevono acqua da precipitazioni aggiuntive che colpiscono aree circostanti, alla foresta. Tra i due estremi, il tipo di vegetazione può variare per le specie che la caratterizzano secondo fattori geo-climatici. Un incremento in densità di specie arboree si presenta in concomitanza della crescita della precipitazione media annuale. Le Figure 3.1 e 3.2 mostrano differenti tipi di successione di vegetazione lungo un gradiente di pioggia che dipendono da diverse condizioni climatiche locali (Shmida e Burgess, 1988). In particolare la Figura 3.1 si riferisce a climi subtropicali, mentre la Figura 3.2 a quelli mediterranei. Sebbene queste successioni siano differenti, esse sono entrambe caratterizzate da un incremento nella densità delle specie arboree procedendo dal deserto al bioma foresta. L’incremento di copertura arborea lungo i gradienti di pioggia è non necessariamente lineare: in alcuni casi si manifestano bruschi incrementi di copertura arborea in corrispondenza di alcune soglie di precipitazione (Sankaran et al., 2005).

---

## 3.2 Il disturbo “fuoco”

Oltre alla precipitazione, anche altri fattori estrinseci ed intrinseci all'ecosistema possono avere un'influenza fondamentale sui tipi di vegetazione: citato spesso con il termine di “disturbo”, il fuoco ha sicuramente un ruolo fondamentale per la dinamica della vegetazione. Molti ecosistemi che, infatti, potrebbero essere potenzialmente dominati da alberi, non vengono classificati come tali a causa della presenza di incendi e di disturbi di altra natura. Secondo Sankaran et al. (2005) la copertura arborea del continente africano sarebbe molto più elevata se non fosse per incendi così frequenti.

Alcuni studi hanno mostrato che le riduzioni in termini di frequenza di incendi permettono una crescita nella densità degli alberi (Scholes e Walker, 1993).

Inoltre ci sono molti elementi che mostrano come, in alcuni paesaggi, l'andamento della vegetazione osservato non è determinato dal clima: una prateria contornata da alberi indica chiaramente che il clima permetterebbe la formazione di vegetazione arborea, ma qualcos'altro (ad esempio gli incendi) permettono la sopravvivenza dell'erba e dunque consentono la presenza della prateria. Acocks (1953) definì come “false” queste praterie la cui permanenza è data dall'incendio, perché in tali aree la media annuale della precipitazione avrebbe favorito il bioma savana o foresta.

Tutte queste teorie sono confermate da risultati di modelli fisicamente basati: ad esempio Bond et al. (2003) hanno utilizzato lo Sheffield Dynamic Global Vegetation Model (DGVM) al fine di simulare la crescita di vegetazione in Sudafrica in presenza e in assenza di fuoco. I risultati delle simulazioni in assenza di incendi mostrano una più ampia copertura arborea rispetto a quella fatta in presenza di incendi.

Tutte queste considerazioni supportano la “Green World Hypothesis” di Polis (1999) secondo la quale la vegetazione è determinata a scala globale dal clima e a scala locale viene modificata da fattori quali bassa percentuale di nutrienti nel suolo, dagli incendi e dagli erbivori.

In alcuni casi i disturbi riducono solo il limite superiore della copertura arborea imposta dalle condizioni climatiche.

Questa dicotomia richiama quella formalizzata da Bond et al. (2003) tra gli ecosistemi *climate dependent* e quelli *fire dependent*. I primi sono determinati dalle condizioni climatiche, mentre i secondi dai disturbi (primo tra tutti il fuoco). Il fuoco in un ecosistema *climate dependent* provoca solo l'effetto di ridurre la copertura arborea che è determinata dalla pioggia. Viceversa, negli ecosistemi *fire dependent* gli incendi evitano che si formi la chiusura delle chiome dovuta alla troppa densità degli alberi, permettendo la presenza di ecosistemi completamente differenti da quelli che potrebbero essere determinati dalla sola pioggia.

In particolare, il bioma savana, avendo marcata stagionalità nel regime pluviometrico, durante la stagione umida è caratterizzato da un'abbondante crescita di erba, e, conseguentemente, un grosso accumulo di biomassa morta nella stagione secca. Durante la stagione secca le savane sono influenzate fortemente dagli incendi, dato che la biomassa costituisce il principale combustibile per alimentare un incendio. Questo indica che il fuoco è una componente fondamentale per riuscire a studiare la dinamica di tale bioma.

Gli incendi sono prevalentemente innescati da fulmini, ma sono certamente influenzati anche dalla composizione della vegetazione. Molte piante della savana possono agire come "ecosystem engine" influenzando la frequenza degli incendi: ci sono piante adattate al fuoco che hanno sviluppato caratteristiche per proteggersi dalle fiamme ma anche piante che facilitano la propagazione degli incendi (Beckage et al., 2009). Molti studi (Sakaran et al., 2004, 2005; Scholes e Walker, 1993; Scholes e Archer, 1997) hanno mostrato che la riduzione nella frequenza degli incendi in aree spesso soggette a tali eventi, porta ad un aumento della densità degli alberi. Nelle savane umide gli incendi sono necessari per impedire la chiusura delle chiome che deriverebbe dall'abbondante disponibilità di acqua nel terreno; questo spiega perché gli incendi siano più frequenti nelle savane umide rispetto a quelle aride.

Mentre c'è una correlazione negativa tra la densità degli alberi e la frequenza degli incendi, secondo Scholes e Walker (1993) la biomassa erbosa, nonostante sia il combustibile per l'innescare di un incendio, è debolmente correlato con il regime degli incendi: è difficile distinguere tra variabilità annuale dell'erba e riduzione dell'erba dovuta agli incendi. Questa è principalmente dovuta all'abilità dell'erba nel colonizzare velocemente i siti che sono stati precedentemente bruciati.

Una volta che la savana, dopo anni senza incendi, abbia incrementato la densità della copertura arborea, la probabilità dell'innescare di un incendio decresce, rendendo molto difficile il ritorno dell'ecosistema a savana.

Gli incendi sono frequenti nel Sudafrica, eccetto nelle aree aride situate a ovest e sud-ovest dell'entroterra Africano dove la presenza di biomassa-combustibile (ovvero la parte di biomassa che normalmente brucia, per esempio legno morto, l'erba, gli arbusti e la lettiera) è spesso insufficiente.

Nelle regioni aride, affinché si accumuli sufficiente combustibile tale da far sì che si propaghi l'incendio, è necessario del tempo o, alternativamente, una stagione eccezionalmente umida che preceda quella secca. La disponibilità del combustibile è primariamente regolata dalla precipitazione annuale e dalla fertilità del suolo, ed è ridotta dalla presenza di erbivori (ad esempio erbivori e cavallette) e dalla popolazione (basti pensare al legname raccolto ai fini di produzione di energia domestica). Ad esempio, aree caratterizzate da alta densità di popolazione sono state spesso associate ad un incremento del numero di incendi (Keeley et al., 1999), ma la crescita in densità della popolazione potrebbe significare anche uso più

intensivo del suolo, riduzione della biomassa secca e frammentazione del paesaggio, che blocca la propagazione dell'incendio. Analogamente, sebbene la biomassa secca sia incrementata dalla presenza di precipitazione abbondante durante la stagione umida, la precipitazione regola altresì fattori che hanno un effetto negativo sugli incendi come ad esempio l'umidità della biomassa stessa. Dunque è l'importanza relativa di ciascuna influenza contrastante agente sotto differenti circostanze che determina le caratteristiche del regime di incendi di una particolare regione.

Lo schema in Figura 3.3 mostra come ciascun fattore descritto precedentemente, influenzi la presenza di incendi in una data area.

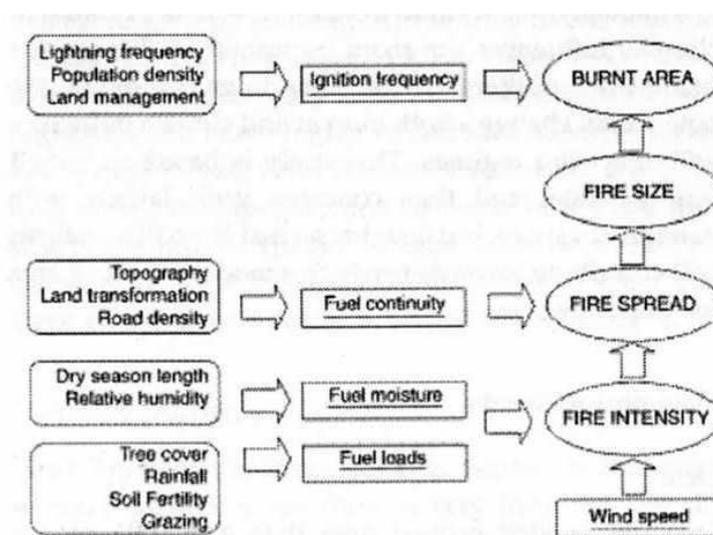


Figura 3.3 Modello teorico dei fattori che influenzano le aree colpite da incendio.

In Figura 3.3 le componenti cerchiata a destra, sono le caratteristiche di regime di un incendio, gli elementi sottolineati i drivers diretti di un incendio, mentre i restanti elementi (la lista di elementi a sinistra) costituiscono i drivers indiretti di un incendio, i quali possono essere misurati. Molte componenti interagiscono tra loro: la pioggia influenza la copertura arborea, la densità di popolazione è correlata con la densità degli erbivori, ecc.

Al fine di una valutazione quantitativa accurata, sono importanti anche i dati da satellite.

In Figura 3.4, sono mostrate le posizioni di incendi attivi a risoluzione di 1 km rilevati dal passaggio durante giorno e notte di MODIS (Justice et al., 2002) per l'anno 2001.

Gli incendi rilevati da Marzo a Luglio (escludendo il 4 e il 10 Luglio giorni in cui MODIS non era funzionante) e quelli rilevati in Agosto, Settembre, Ottobre e Novembre 2001 sono mostrati rispettivamente in rosso, giallo, verde, blu, e magenta.

E' stata esplicitata anche la percentuale di osservazioni etichettate come "nuvolose" durante questi 9 mesi. Purtroppo, tra l'11% e il 20% delle zone ad Est del Sud Africa sono osservazioni

con presenza di copertura nuvolosa. Gli incendi attivi e le aree bruciate hanno meno probabilità di essere rilevate in presenza di copertura nuvolosa.

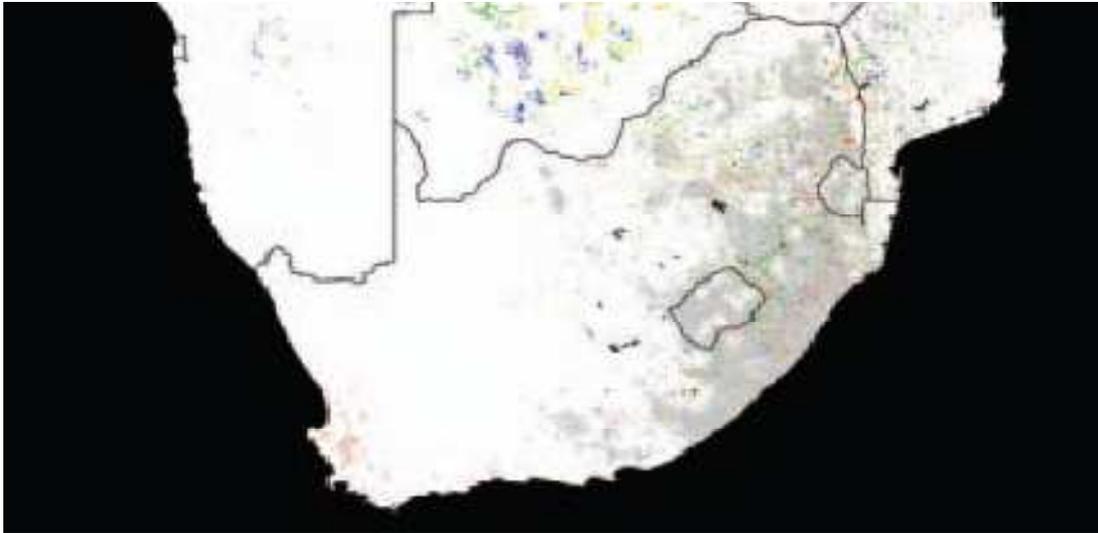


Figura 3.4. Composizione temporale degli incendi rilevati in Sudafrica da MODIS-Terra a risoluzione di 1Km, attivo giorno e notte dall'1 Marzo al 30 Novembre dell'anno 2001 (escludendo il periodo dal 10 Giugno al 3 Luglio). Gli incendi rilevati da Marzo alla fine di Luglio sono indicati in rosso, quelli in Agosto in giallo, quelli in Settembre di verde, in Ottobre di blu ed infine quelli rilevati in Novembre color magenta. Il nero indica i corpi d'acqua. Il bianco e le ombre grigie mostrano i siti dove non sono stati rilevati incendi e mostrano la percentuale di giorni e notti etichettate come nuvolose da MODIS.

### 3.3 Il disturbo “erbivori”

Oltre al fuoco, ci sono altri fattori utili a prevenire la chiusura delle chiome a causa dell'alta densità degli alberi. Elefanti, giraffe e altri erbivori contribuiscono a mantenere le chiome degli alberi distanti l'una dall'altra e la potenzialità di incendi molto alta.

Gli erbivori possono essere divisi in due tipologie: i *browsers* e i *grazers*. I primi sono erbivori che si nutrono di foglie degli alberi presenti ad altezze diverse e talvolta della corteccia. Viceversa, i secondi si nutrono di erba.

Tra i *grazers* si annoverano gli gnu (*Connochaetes taurinus*), le zebre (*Equus burchelli*) ed i bufali (*Syncerus caffer*). Particolarmente collegati all'attività umana sono i bovini, i quali, brucando, provocano un consumo eccessivo della copertura erbosa.

Appartengono ai *browsers* gli elefanti (*Loxodonta africana*), le giraffe (*Giraffa camaleopardis*) ed i dikdik (*Madoqua kirkii*).

---

A metà tra *browsers* e *grazers* si annoverano le antilopi (*Taurotragus oryx*) e gli impala (*Aepyceros melampus*).

All'interno di ogni tipologia di erbivori, inoltre, è possibile individuare un'ulteriore suddivisione di nicchia: ad esempio i *browsers* si nutrono di foglie poste a diverse altezze.

Generalmente l'erba si trova in condizioni svantaggiate perché viene calpestata continuamente da tutti gli animali; gli alberi nelle prime fasi di sviluppo possono essere danneggiati oltre che dai *browsers* anche dai *grazers* che li consumano assieme all'erba (Scholes e Archer, 1997).

Ci sono molti meccanismi di adattamento delle specie di vegetazioni alla presenza degli erbivori: secondo Skarpe et al. (2004) le specie di vegetazione possono rispondere alla pressione dovuta agli erbivori in due modi differenti: secondo le teorie evuzionistiche, le specie vegetali possono o crescere velocemente oppure difendersi dai consumatori.

Il "grazing" ed il "browsing" non sono fenomeni mutuamente esclusivi, ma al contrario essi possono collaborare vicendevolmente. Per esempio, in siti caratterizzati da elevate densità di alberi, le giraffe possono contribuire a ridurre lo spessore delle chiome: questo fa sì che i *grazers* possano accedere a tali siti e consumarne anche l'erba (Pellew, 1983).

Per quanto riguarda l'interazione tra *grazing*, *browsing* e fuoco, secondo Scholes e Archer (1997) e van Langevelde et al. (2003) si generano due distinti effetti di retroazione, il primo dei quali riguarda i *grazers*: il pascolo intensivo riduce infatti la biomassa accumulata, causando la perdita di continuità per la propagazione degli incendi (Scholes e Archer 1997, van Langevelde et al., 2003, Archibald et al., 2005). Tuttavia, questo provoca una riduzione nell'intensità degli incendi e conseguentemente un danneggiamento in misura minore della copertura arborea; dunque gli alberi possono crescere più facilmente riducendo lo spazio disponibile per l'erba (Walter, 1971, Walker and Noy-Meir, 1982) e sono in grado di disperdere in modo più uniforme i propri semi (Brown and Archer, 1999). Come conseguenza, si ha un ulteriore decremento nella frequenza degli incendi.

Il secondo effetto di retroazione riguarda l'attività dei *browsers*: un aumento del livello di *browsing* riduce, infatti, la densità degli alberi; questo porta alla diffusione dell'erba e conseguentemente ad un incremento del combustibile di biomassa secca che può provocare incendi più intensi causando danni gravi per gli alberi. Inoltre i *browsers* come le giraffe, contribuiscono a mantenere gli alberi abbastanza bassi così da essere completamente investiti dalle fiamme (Scholes e Archer, 1997).

I due effetti di retroazione sopra descritti possono essere combinati: una copertura arborea molto densa può attrarre *browsers* che conseguentemente ne riducono l'altezza; quando l'altezza degli alberi è sufficientemente bassa i *browsers* migrano altrove e vengono sostituiti dai *grazers* che consentono nuovamente la crescita di un'alta copertura arborea.

Secondo Staver et al. (2009) l'influenza degli erbivori sulla crescita degli alberi è bassa e quasi risibile se si considerano le singole specie, mentre diventa significativa nel momento in

cui si riuniscono le specie di alberi in gruppi funzionali. Infine la pressione degli erbivori è più sentita dagli alberi caratterizzati da foglie sottili rispetto alle specie latifoglie. In particolare si sono rilevate particolarmente sensibili alla pressione degli erbivori le specie *Acacia nilotica* e *Dichrostachys cinerea* se considerata ciascuna come singola specie, mentre l'influenza è molto piuttosto debole se raggruppate in gruppi funzionali.

Infine non è da trascurare la componente umana: è molto facile che i territori in prossimità di villaggi abitati siano bruciati per promuovere la ricrescita di erba nei pascoli e per la caccia. Oltre che per la gestione del territorio e dei pascoli, la popolazione dei villaggi è solita appiccare incendi appena comincia la stagione secca in modo da prevenire i molti potenziali incendi innescati dai fulmini e la loro conseguente propagazione (Frost, 1987). I potenziali incendi che si innescherebbero in tarda stagione secca, infatti, sarebbero sicuramente caratterizzati da una propagazione più violenta e da una maggiore intensità rispetto a quelli innescati per opera dell'uomo, perché ci sarebbe maggior biomassa secca disponibile e perché spesso il vento e il clima caldo permettono la propagazione veloce delle fiamme rendendone difficile il controllo.

Infine la frammentazione del paesaggio dovuta a costruzioni di strade, ponti e barriere fa sì che le aree soggette alle fiamme abbiano estensione minore e quindi più controllabili.

---

# **CAPITOLO 4**

## **I SITI IN ANALISI ED I RELATIVI REGIMI PLUVIOMETRICI**

L' IPCC Fourth Assessment Report (IPCC, 2007) mostra inequivocabilmente che le temperature globali sono aumentate nel corso dell'ultimo secolo e che ci sono state forti variazioni degli andamenti delle precipitazioni nel mondo nello stesso lasso di tempo. Inoltre è stato rilevato che in gran parte del Sud Africa le aree sono sempre più caratterizzate da siccità sin dal 1970. Studi fatti sulla frequenza degli incendi nelle savane e praterie mostrano che alte temperature, bassa umidità, alta velocità del vento e pesanti carichi di materiale combustibile secco favoriscono lo stabilimento di condizioni ideali per la propagazione di un incendio. Pressioni crescenti, intendendo con questo termine il cambiamento climatico, gli incendi e la presenza degli erbivori, potrebbero portare ad un'estensione della desertificazione che va ad inficiare sui beni di sussistenza della popolazione locale. Per questo motivo, nel presente capitolo, verranno scelti due siti rappresentativi di due biomi fondamentali per il Sudafrica, le dinamiche e le caratteristiche dei quali verranno analizzati con l'utilizzo di modelli nei successivi capitoli. Verrà infine introdotta la precipitazione di scenario scelta per le simulazioni svolte con i modelli minimali.

### **4.1 I siti analizzati**

Per ognuno dei due biomi descritti nel Capitolo 2 è stato scelto un sito rappresentativo secondo tre criteri:

- sufficiente rappresentatività del bioma

- posizione del sito distante dagli oceani, dagli specchi d'acqua e dalle aree urbanizzate
- influenze rilevanti riscontrate a seguito del cambiamento climatico

I siti scelti sono Skukuza per il bioma savana e Lesotho per il bioma prateria. Nei capitoli 6 e 7 verranno effettuate delle simulazioni con precipitazioni di scenario relative proprio a suddetti siti.

#### 4.1.1 Skukuza

Skukuza (25.02 S, 31.50 E) (Fig.4.1) è il sito scelto per rappresentare il bioma savana.

E' la sede della direzione amministrativa del Parco Kruger in Sud Africa. Si trova, infatti, nella parte meridionale del parco ed è facilmente raggiungibile, passando dal Kruger Gate, l'ingresso principale del parco.



Figura 4.1 Localizzazione del sito Skukuza.

La temperatura media che caratterizza il sito va dai 30°C in Gennaio (estate) ai 23°C in Luglio (inverno). La variazione delle condizioni climatiche influisce sul tipo di vegetazione presente nell'ecosistema che può fiorire e sopravvivere solo dove le condizioni sono idonee per la crescita della specie stessa.

Skukuza è prevalentemente una savana di arbusti (shrub) semi-arida, la copertura dei quali raggiunge circa il 66% della totalità dell'area (informazione ricavata da dati da satellite MODIS al 2003 rappresentati in Figura 4.2).

All'interno della popolazione arborea, che copre circa il 20% dell'area (Fig. 4.3), molto frequente è la *Colophospermum mopane*, nota anche come albero farfalla, un albero perenne della famiglia delle leguminose la cui caratteristica principale è la foglia a forma di farfalla (da cui una delle sue denominazioni comuni), di colore verde intenso in primavera

---

ed estate e multicolore in autunno. La corteccia è grigio-chiara o grigio-scura, e caratterizzata da fessurazioni longitudinali molto evidenti. Su terreni adatti (per esempio quelli alluvionali), può raggiungere un'altezza di 25 m; in circostanze meno favorevoli, rimane in forma arbustiva.

Il sapore gradevole dell'erba, inoltre costituisce un pascolo eccellente per una gran quantità di erbivori: sono presenti, infatti, gli gnu (*Connochaetes taurinus*), le zebre (*Equus burchelli*), i bufali (*Syncerus caffer*), gli elefanti (*Loxodonta africana*), le giraffe (*Giraffa camaleopardis*) e gli impala (*Aepyceros melampus*).

Infine, si noti che il bioma è scarsamente influenzato da vicinanza di specchi marini in quanto la distanza di Skukuza dall'Oceano Indiano è pari all'incirca a 300 km.

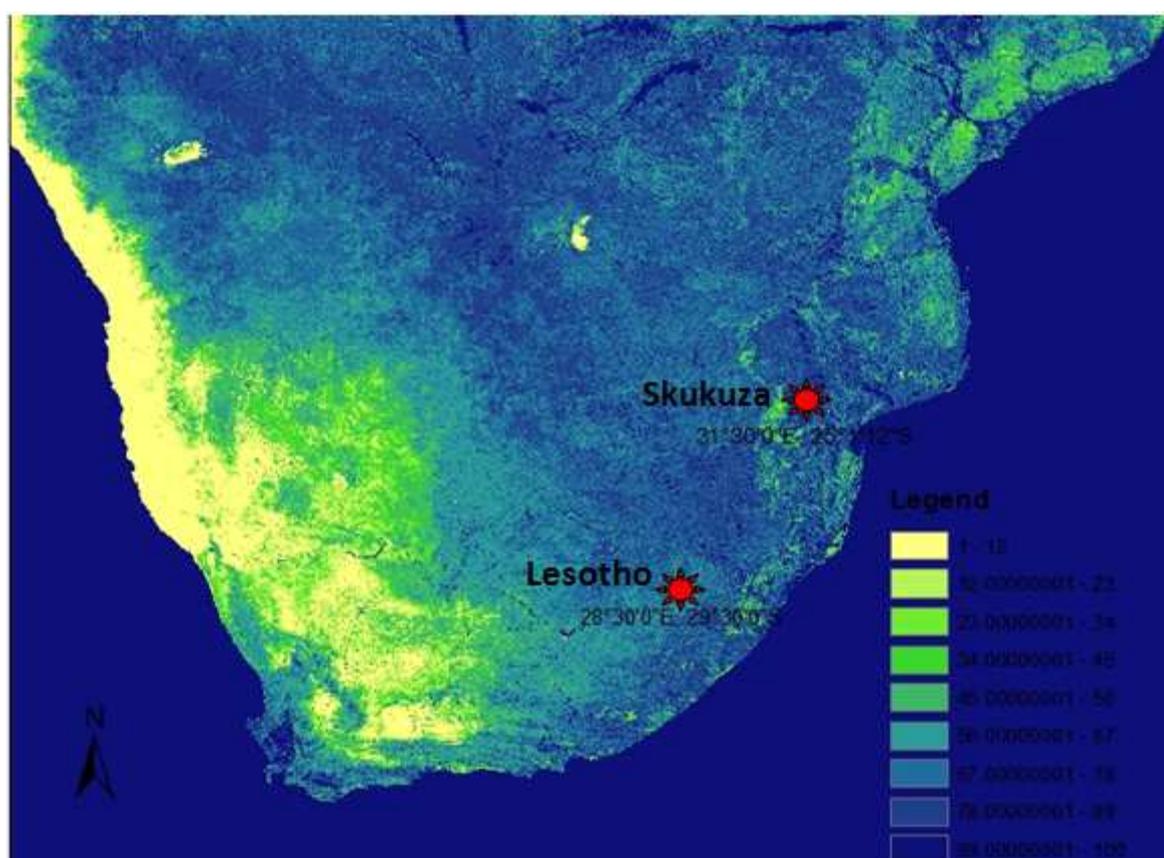


Figura 4.2. Copertura in percentuale dovuta all'erba ottenuta dalle osservazioni satellitari MODIS all'anno 2003

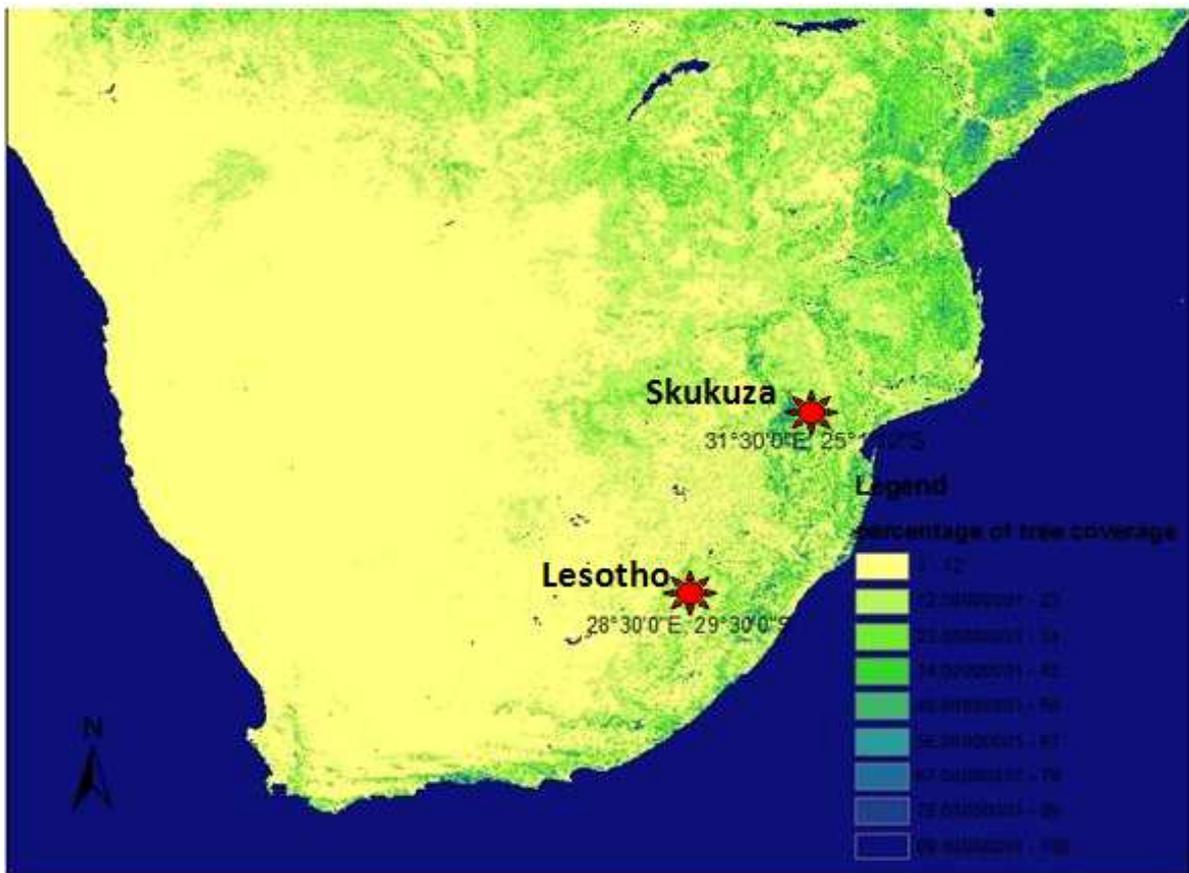


Figura 4.3 Copertura in percentuale dovuta agli alberi ottenuta dalle osservazioni satellitari MODIS all'anno 2003

Per quanto riguarda il regime pluviometrico, si mostrano gli andamenti delle medie mensili cumulate ottenute dal dataset QIAN riferita all'anno 2003 (Figura 4.4), utilizzato per default in ingresso al modello spazialmente distribuito che verrà introdotto nel capitolo 5, confrontate con quelle ottenute dai dati giornalieri di precipitazione misurata dalla Flux Tower in prossimità del sito in analisi (Figura 4.5). Come si può notare in entrambi casi è evidente una marcata stagionalità delle precipitazioni, caratterizzata dai valori di picco a Febbraio e a Novembre e dai valori minimi a Maggio, Luglio e Agosto. Il livello annuale di precipitazione è pari a  $419,6 \text{ mm yr}^{-1}$ .

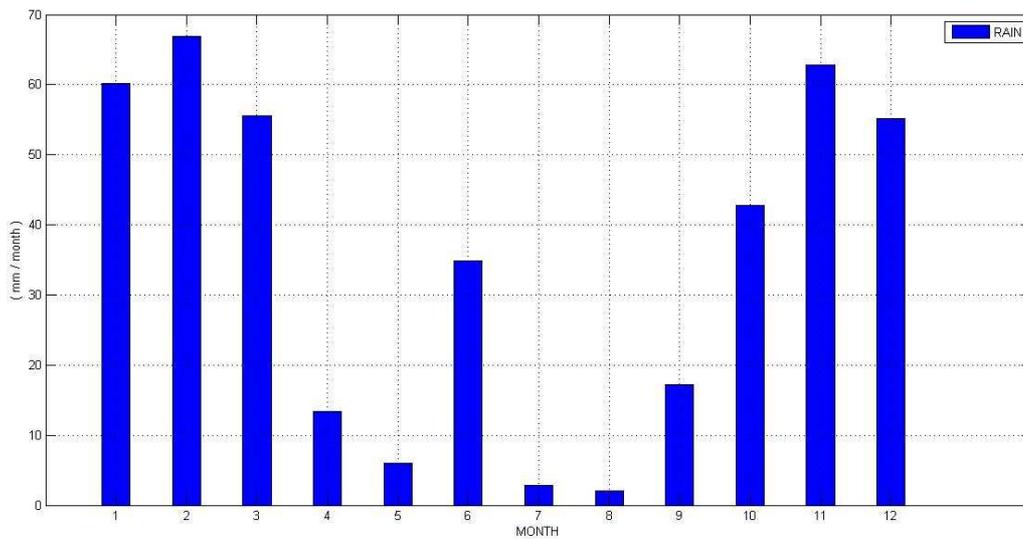


Figura 4.4. Medie mensili cumulate di precipitazione per l'anno 2003, ottenute dal dataset del QUIAN, usata come input per le simulazioni con il modello CN e con il modello CNDV nel sito Skukuza.

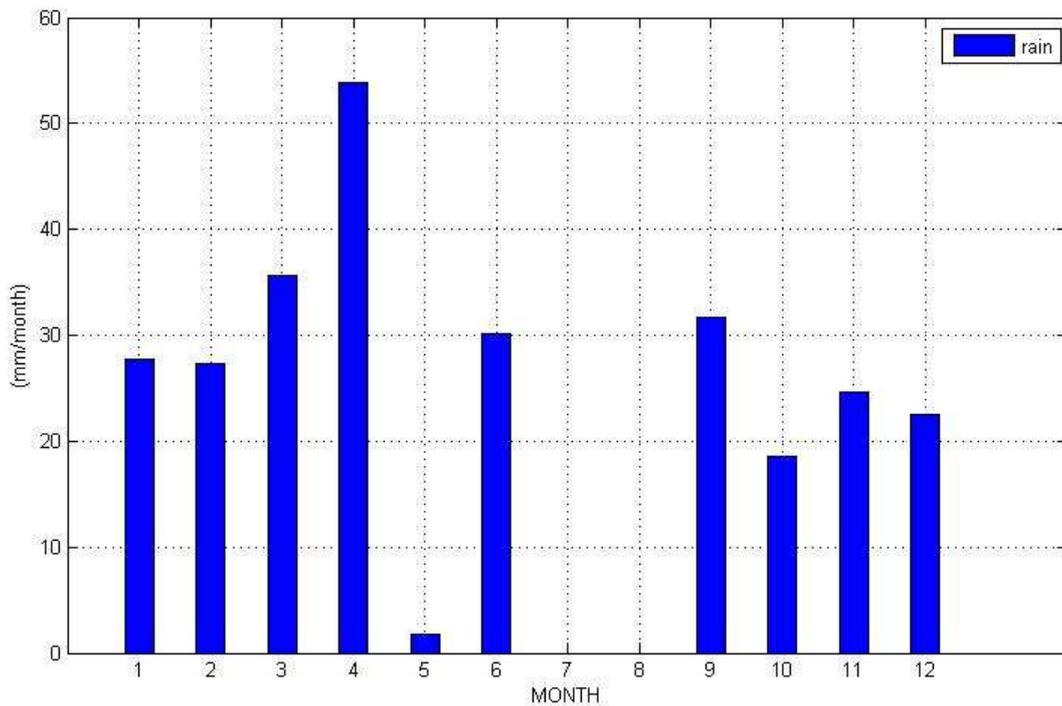


Figura 4.5. Medie mensili cumulate di precipitazione per l'anno 2003, ottenuta dalla Flux Tower per il sito di Skukuza.

Si può notare come il dataset del QUIAN sovrastimi i valori della suddetta forzante.

### 4.1.2 Lesotho

Lesotho (29.50 S, 28.50 E) (Fig.4.6), distante circa 270 km dall'Oceano Indiano, è il sito scelto per rappresentare il bioma prateria.



Figura 4.6. Localizzazione del sito nella zona del Lesotho (prateria).

Gran parte dello stato del Lesotho si trova ad una quota non inferiore ai 1800 m sul livello del mare.

Proprio a causa dell'altitudine, la temperatura rimane più bassa per gran parte dell'anno rispetto alle altre città poste alla stessa latitudine. La maggior parte della pioggia si verifica in estate attraverso temporali.

La precipitazione, per le simulazioni effettuate con il modello distribuito nel Capitolo 5 nell'area del Lesotho, è ancora quella dell'anno 2003 del dataset QIAN (Fig.4.7) ed è pari a circa 535,44 mm yr<sup>-1</sup>.

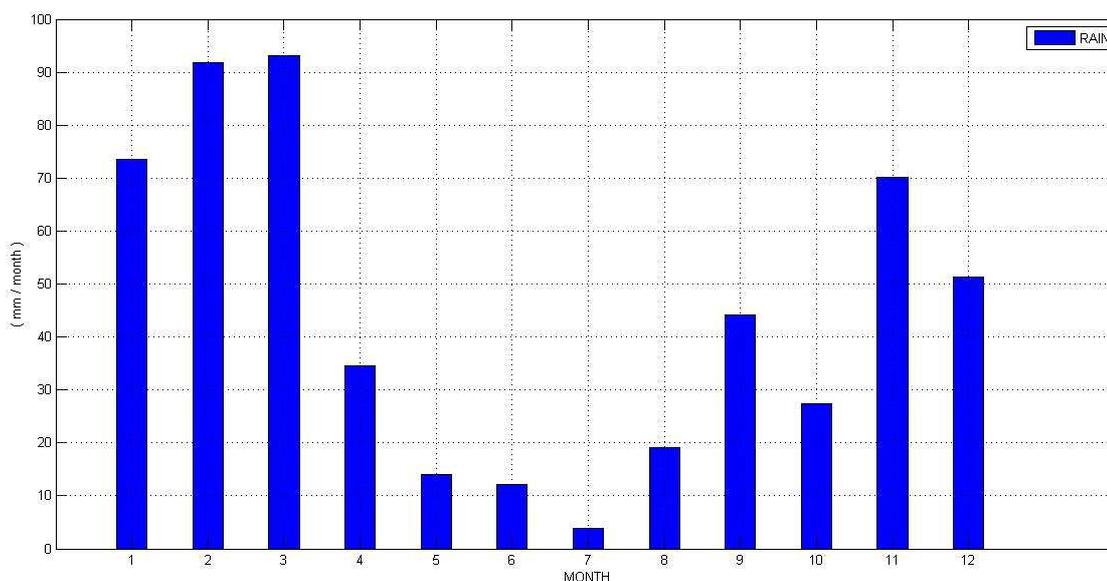


Figura 4.7. Medie mensili cumulate di precipitazione per l'anno 2003, ottenute dal dataset del QUIAN, usata come input per le simulazioni con il modello CN e con il modello CNDV nel sito Lesotho.

La temperatura spesso arriva ai 30°C in estate. In inverno rimane più bassa e spesso va sotto i -7°C e in alta quota può arrivare addirittura ai -18°C. La neve è frequente solo in alta quota tra Maggio e Settembre.

Da dati da satellite (Fig.4.2 e 4.3) si può conoscere la copertura erbosa e arborea che caratterizzano il luogo, che sono rispettivamente il 70% e il 9%.

Una particolare specie vegetale del Lesotho è l'*Aloe Ferox* una pianta grassa dai vistosi fiori rossi a candelabro che si trova in ampie distese di terreno, una pianta indigene, protette e usata anche in campo medicinale e cosmetico.

Infine si fa notare che il Lesotho ha un alta vulnerabilità agli incendi. Il territorio viene inoltre bruciato intenzionalmente per aumentarne la potenzialità di pascolo nella stagione successiva.

## 4.2 Precipitazione e cambiamento climatico

Poiché, come detto in introduzione al capitolo 2, il cambiamento climatico può influire in modo avverso sulla biodiversità inasprando il fenomeno della desertificazione, dovuta all'aumento dell'evapotraspirazione e ad una probabile diminuzione della precipitazione nei suoli aridi, si ritiene opportuno analizzare nel seguente paragrafo, gli scenari di precipitazione previsti per i prossimi 100 anni. Verranno dunque presentate le serie di scenario utilizzate in ingresso ai modelli minimali nei Capitoli 7 e 8, ne verranno messe in

luce le principali caratteristiche e infine, avendo a disposizione la serie storica di precipitazione dal 1960 al 2004 per il sito di Skukuza, verrà effettuato un confronto tra tale serie storica e quella di scenario.

### 4.2.1 La precipitazione di scenario

Come accennato precedentemente, i biomi sono influenzati dal clima di una regione e in particolare dalla quantità di precipitazione annua e dalla sua partizione durante l'anno (livello di precipitazione durante la stagione secca e livello di precipitazione durante la stagione umida). Per questo motivo, grande importanza ha la precipitazione di scenario scelta come ingresso ai modelli finalizzati a simulare le dinamiche di vegetazione all'interno dei biomi analizzati. In questo elaborato di tesi, si è scelta la precipitazione derivante dallo scenario di emissione B1, le caratteristiche del quale sono descritte nel paragrafo 2.1.3. Le Figure 4.8 e 4.9 mostrano l'andamento di tali serie di precipitazioni di scenario selezionate dal 2000 al 2100, rispettivamente nel sito di Skukuza e Lesotho.

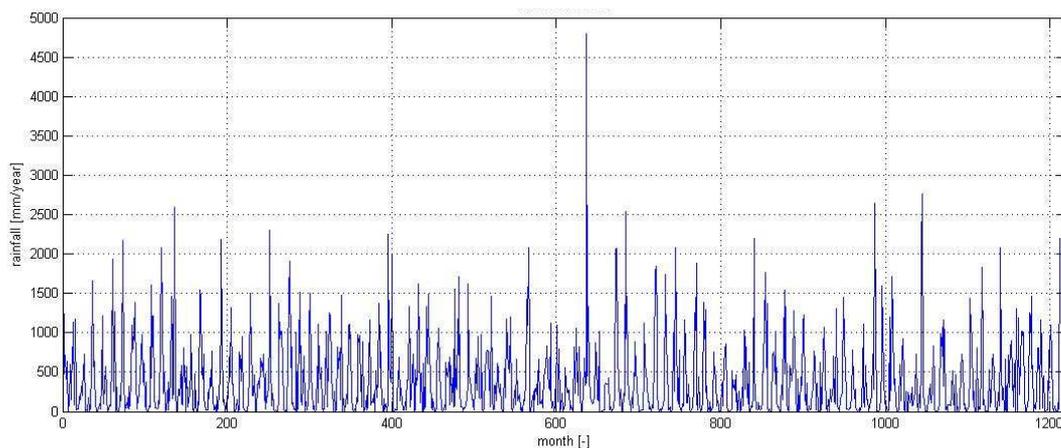


Figura 4.8. Precipitazione di scenario nel sito Skukuza.

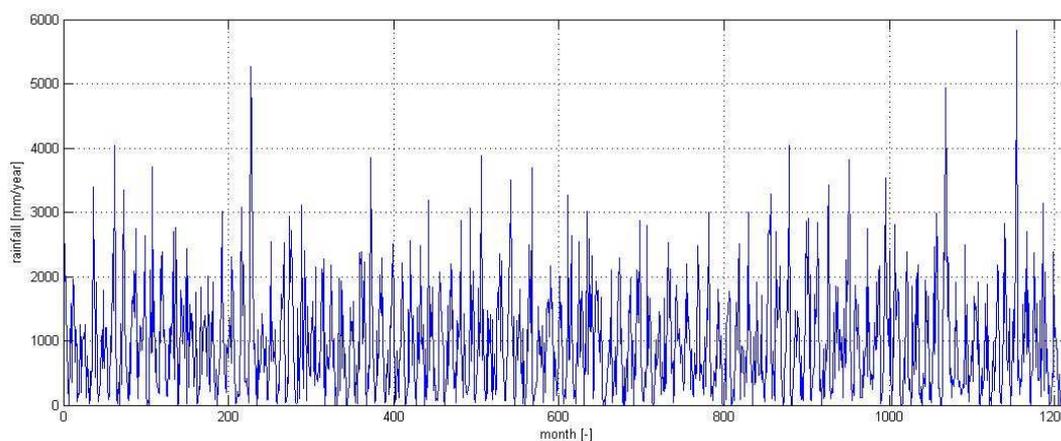


Figura 4.9. Precipitazione di scenario nel sito Lesotho

---

Le serie di precipitazioni sono sostanzialmente medie mensili di pioggia in mm/yr caratterizzate da un valore medio su tutti i 101 anni di simulazione pari a 375 mm/yr per Skukuza e 956.33 mm/yr per Lesotho.

Le serie qui riportate, messe a disposizione nel database del World Data Center for Climate (WDCC) (<http://www.mad.zmaw.de/wdc-for-climate/cera-data-model/>) sono state ottenute utilizzando modelli di Circolazione Generale Atmosfera-Oceano (AOGCMs), basati su principi fisici ben consolidati e che hanno dimostrato di saper riprodurre sia le caratteristiche osservate nel clima degli ultimi anni, sia i cambiamenti climatici del passato. Essi consentono di avere stime quantitative credibili per il futuro cambiamento climatico, in particolar modo a scala continentale e a più larga scala. Il livello di confidenza per tali stime è più alta per alcune variabili climatiche (ad esempio la temperatura) e più bassa per altre (ad esempio la precipitazione). La simulazione per ottenere lo scenario di precipitazione è stata fatta girare su griglia di copertura globale con celle caratterizzate da 3.75° di longitudine e 2.64° di latitudine. La proiezione di scenario è simulata dal 2000 al 2230, ma nella suddetta analisi si è ritenuto sufficiente analizzare solo i primi 101 anni della serie, simulando quindi fino al 2100.

#### **4.2.2 Confronto con la serie storica**

Data la fondamentale importanza dell'andamento stagionale della precipitazione nei biomi tropicali e sub-tropicali, si è deciso di analizzare l'andamento delle medie dei mesi omologhi appartenenti alla serie di scenario sui 101 anni di proiezione e confrontarne l'andamento con i corrispondenti valori medi di ciascun mese appartenenti alle serie storica di precipitazione (dal 1960 al 2004). Il confronto è stato possibile solo per il sito di Skukuza, in prossimità del quale si trova una Torre di Flusso capace di monitorare la zona circostante. Per il Lesotho, invece, non avendo a disposizione alcuna serie storica per il confronto, si potuto solamente costruire la sequenza stagionale di valori medi mensili appartenenti alla precipitazione di scenario. In Figura 4.10 si riportano gli andamenti di precipitazione sopra descritti.

Come si può notare, innanzitutto la serie di Lesotho è caratterizzata da valori nettamente superiori di quelle di Skukuza; questo dimostra in modo chiaro, come nell'analisi si trattino due biomi del tutto differenti: Skukuza è savana, dunque caratterizzata solitamente da precipitazione con valori annuali tra i 235 e i 1000 mm, mentre Lesotho è prateria, dunque caratterizzata da valori annuali di precipitazione che superano anche i 1500 mm.

Una seconda osservazione molto importante riguarda invece il confronto tra la serie di medie mensili "storiche" e quelle "di scenario" nel sito Skukuza: in generale si nota subito un decremento netto della precipitazione. Essendo 584.1844 mm/yr il valore medio per la

serie storica e 374.96 mm/yr quello relativo alla serie di scenario, il decremento si quantifica pari a circa 36% in termini di medie annuali.

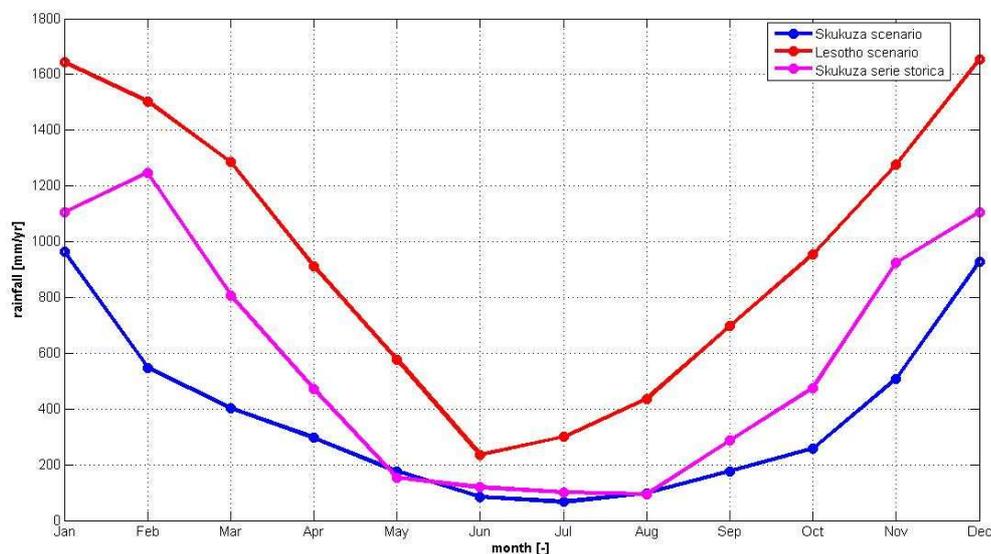


Figura 4.10. Andamento delle medie mensili delle serie storiche e di scenario per il sito Skukuza e andamento delle medie mensili della serie di scenario per Lesotho.

Per quanto riguarda, invece, il decremento percentuale nel “futuro simulato” dei singoli valori mensili di precipitazione (sempre in termini di media), si sintetizzano i valori in Tabella 4.1.

Tabella 4.1. Confronto di valori medi di precipitazione mensile per serie storica e serie di scenario nel sito Skukuza.

<i>MESI</i>	<i>Precipitazione serie storica [mm/yr]</i>	<i>Precipitazione serie di scenario [mm/yr]</i>	<i>DIMINUZIONE (AUMENTO) [%]</i>
<b>Gennaio</b>	1105.1	962.68	-12.8838
<b>Febbraio</b>	1247.0	548.27	-56.0338
<b>Marzo</b>	807.8	403.08	-50.0982
<b>Aprile</b>	471.7	296.06	-37.2322
<b>Maggio</b>	154.1	174.78	+13.4508
<b>Giugno</b>	118.3	84.18	-28.8713
<b>Luglio</b>	100.8	66.67	-33.8744
<b>Agosto</b>	94.0	96.91	+3.1177

---

<b>Settembre</b>	286.7	174.33	-39.1846
<b>Ottobre</b>	474.2	257.08	-45.7844
<b>Novembre</b>	923.8	508.43	-44.9632
<b>Dicembre</b>	1106.6	926.97	-16.2297

Come si può notare anche dalla Tabella sopra riportata, si constata un netto decremento di precipitazione in tutti i mesi, eccetto per Maggio e Agosto. Il decremento è percentualmente più elevato nella stagione umida rispetto alla stagione secca.

Dunque, in conclusione, il confronto tra serie storica e serie di scenario ha messo in luce la veridicità del fatto che qualcosa sta cambiando e questo cambiamento si intensificherà soprattutto nel futuro.

Si può prevedere che le dinamiche di vegetazione, strettamente correlate all'andamento stagionale della precipitazione, subiscano anch'esse dei cambiamenti lungo il tempo di simulazione.

Tale constatazione è stata adottata al fine di giustificare la scelta dei biomi sottoposti ad analisi e, in generale, la tematica trattata in questo elaborato di tesi.

Per le simulazioni effettuate utilizzando la serie di scenario sopra descritta, si rimanda ai Capitoli 7 e 8.

# CAPITOLO 5

## ANALISI CON IL COMMUNITY LAND MODEL (CLM)

Prima di procedere alla previsione delle dinamiche vegetali caratterizzanti i siti di studio nei 101 anni di scenario, si è ritenuto opportuno analizzare alcuni aspetti idrologici propri degli ecosistemi savana (Skukuza) e prateria (Lesotho) nonché la situazione generale, idrologica e vegetativa, dell'intero Sudafrica al 2003. Ciò è stato fatto al fine di offrire una chiara panoramica delle variabili di interesse, per lo studio in oggetto, nel recente passato da confrontare eventualmente con quelle previste dallo scenario di simulazione futuro.

Per lo studio delle variabili al 2003, è stato utilizzato il Community Land Model in modalità *single site* per i siti di Skukuza e Lesotho e in modalità *spazialmente distribuita* per lo studio dell'intero Sudafrica.

In questo capitolo viene introdotto il modello CLM, il quale verrà poi utilizzato per un'analisi dello stato attuale dei biomi studiati e in seguito verranno mostrate le analisi effettuate con il modello stesso.

### 5.1 Storia del modello

Il "Community Earth System Model" (CESM) designa un modello climatico globale, appartenente alla categoria dei *General Circulation Model*, che permette simulazioni di scenari climatici passati, presenti e futuri della Terra. E' costituito da quattro modelli separati che simulano contemporaneamente l'atmosfera, l'oceano, la superficie terrestre e i ghiacciai della Terra, e da una componente centrale (detta *coupler*) che permette di

---

accoppiare i diversi moduli. Si tratta, ad oggi, dell'ultimo "prototipo" della ricerca sui modelli climatici del *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), centro di ricerca che, nel 1983, rese disponibile per l'utilizzo da parte della vasta comunità scientifica, il *Community Climate model* (CCM), archetipo del suddetto CESM.

IL CCM si configurava come un modello atmosferico globale, la cui formulazione fu costantemente migliorata nel corso degli ultimi due decenni. Lo sviluppo tecnologico degli ultimi anni che ha portato ad una graduale velocizzazione computazionale e ad un ingente aumento della potenza dei calcolatori tale da permettere il funzionamento del modello, ha consentito un utilizzo diffuso del modello nella comunità universitaria e in alcuni laboratori statunitensi ed internazionali. Una limitazione del CCM originale, similmente ad altri GCM nelle prime formulazioni, era la mancanza di una modellazione esplicita del comportamento degli oceani e della criosfera. Nel 1994, perciò, gli scienziati del NCAR elaborarono un progetto per lo sviluppo del *Climate System Model* (CSM), comprendente una parametrizzazione che doveva includere i modelli dell'atmosfera, della superficie terrestre, degli oceani e della criosfera. In aggiunta, fu adottata una peculiare struttura di gestione e sviluppo del progetto basata sul modello dell'*open-source*, ovvero consentendo alla comunità scientifica interessata di avere l'opportunità di partecipare a tutti i passaggi dello sviluppo del CSM. Nel maggio del 1996, si tenne a Breckenridge, in Colorado, il primo Workshop del CSM, in cui furono presentate le componenti del CSM, i primi risultati di simulazioni climatiche, nonché la natura della futura gestione "aperta" nello sviluppo delle successive generazioni del modello. Il periodo successivo è stato caratterizzato da un sostanziale progresso nell'organizzazione e nello sviluppo sotto la guida di una commissione scientifica costituita a tale scopo, che ha portato al rilascio di versioni sempre più complete, anche grazie all'interesse di noti enti di ricerca americani quali il *Department of Energy* (DOE) e il *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), modello che allo stato attuale (25 Giugno 2010) è divenuto CESM 1.0.

Il *Community Land Model* (CLM) è il modello della componente terrestre utilizzato dal CESM e dal *Community Atmosphere Model* (CAM). Si tratta di un progetto di collaborazione tra gli scienziati del *Terrestrial Sciences Section* (TSS) e del *Climate and Global Dynamics Division* (CGD) al NCAR e del CESM Land Model Working Group.

Il primo sviluppo del Community Land Model può essere visto come la fusione del modello di superficie terrestre focalizzato sulla biogeofisica e nello stesso tempo lo sforzo al NCAR di implementare nel modello stesso il ciclo del carbonio e la dinamica della vegetazione. Il concetto della componente terrestre "community-developed" del Community Climate System Model (CCSM) fu inizialmente proposta al meeting CCSM Land Model Working Group (LMWG) nel Febbraio 1996. Le specifiche iniziali del software e il suo sviluppo puntavano a migliorare le caratteristiche di tre modelli di suolo già esistenti:

1. NCAR LSM (Bonan 1996, 1998) usato nel Community Climate Model (CCM3) e prima versione del CCSM;
2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences land model (IAP94) (Dai and Zeng, 1997);
3. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) (Dickinson et al., 1993) usato con il CCM2.

In seguito le specifiche per il nuovo modello, designato come Common Land Model, furono discusse e approvate nel giugno 1998 CCSM Workshop durante il meeting LMWG.

Un primo codice fu sviluppato da Y. Dai e esaminato nel Marzo 1999 da Mike Bosilovich, P. Dirmeyer, e P. Houser. Successivamente il codice fu testato; i dati utilizzati per la validazione includevano siti adottati dal Progetto "Intercomparison of Land-surface Parameterization Schemes". L'avanzamento della ricerca nel campo del ciclo del carbonio e di quello idrologico, l'approfondimento della conoscenza nel settore della dinamica della vegetazione e soprattutto il miglioramento delle tecnologie computazionali consentirono il perfezionamento sempre più dettagliato del modello, che fu di volta in volta aggiornato giungendo alla versione attuale di CLM 4. Dall'attuale versione del modello si evince un netto miglioramento nella comprensione e rappresentazione dei processi che interessano la superficie terrestre (ad esempio l'idrologia del suolo e i processi che interessano la neve), un notevole miglioramento nelle capacità del modello (ad esempio la possibilità di una rappresentazione accurata del ciclo carbonio-azoto, l'inserimento di suolo organico e un aggiornamento continuo delle componenti volatili e organiche) ed infine un avanzamento nei datasets di forzanti superficiali e atmosferiche (ad esempio il raffinamento dei PFT globali, il miglioramento delle proprietà ottiche per grassland e cropland ed infine una più dettagliata descrizione del ciclo diurno e della distribuzione spettrale della radiazione solare incidente che costituisce dato di input per il modello in modalità offline).

A livello di contenuti, il modello CLM formalizza e quantifica i concetti di climatologia ecologica. La climatologia ecologica è un framework interdisciplinare per comprendere come i cambiamenti naturali e antropici nella vegetazione influenzino il clima. Il modello esamina i processi fisici, chimici e biologici per mezzo dei quali gli ecosistemi terrestri influenzano e sono influenzati dal clima, attraverso una varietà di scale spaziali e temporali. Il tema centrale è che gli ecosistemi terrestri, per mezzo dei loro cicli di energia, acqua, elementi chimici e gas, sono importanti determinanti del clima. Le componenti del modello consistono in: biogeofisica, ciclo idrologico, biogeochimica e dinamica della vegetazione. La superficie terrestre è rappresentata per mezzo di cinque tipi primari di coperture del suolo (ghiacciai, laghi, paludi, urbanizzato e vegetato) in ogni cella della griglia. La porzione vegetata di ogni cella è ulteriormente suddivisa in aree caratterizzate da differenti PFT (plant functional types), ognuno dei quali ha il proprio indice di area fogliare e stomatale e la propria altezza.

---

Ogni sottogriglia caratterizzata da tipi di copertura e PFT differenti costituiscono colonne separate per il calcolo di bilanci di energia e idrologici.

## 5.2 Descrizione del modello

Nel presente capitolo viene presentata una descrizione generale del CLM presentando dapprima il dominio spaziale su cui lavora e la strutturazione dei dati su griglie, in seguito mostrando una panoramica sintetica dei processi biofisici implementati nel modello stesso. Per una descrizione più dettagliata delle parametrizzazioni fisiche e dell'implementazione numerica si rimanda alla guida tecnica “ *Technical Description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM)* ” dell' NCAR (Oleson et al., 2010).

### 5.2.1 Dominio e organizzazione spaziale dei dati

Nel CLM l'organizzazione spaziale della superficie del terrestre è strutturata per mezzo di una griglia, nella quale le celle della griglia sono composte da diverse unità di territorio, da strati di terreno/neve e da *PFT (Plant Functional Type* o tipi funzionali di pianta) (Figura 5.1).

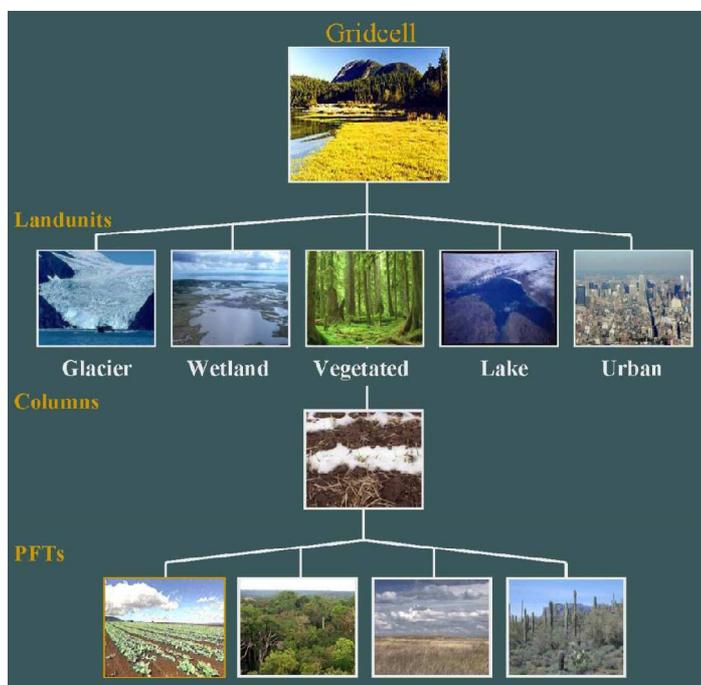


Figura 5.1. Configurazione di default attuale della gerarchia della subgriglia del CLM, che evidenzia l'unità di territorio vegetato.

Ogni cella della griglia può avere un differente numero di unità di territorio, ciascuna unità di territorio può avere un numero diverso di strati, e ogni strato può avere molteplici PFT. Il primo livello della sotto-griglia, l'unità di territorio, ha lo scopo di cogliere i modelli spaziali più ampi che caratterizzano l'eterogeneità del territorio. Le unità comprendono ghiacciai, laghi, paludi, aree urbanizzate e vegetate.

Il secondo livello della sotto-griglia, lo strato, intende cogliere la variabilità potenziale nelle variabili di stato del suolo e della neve all'interno di una singola unità di territorio. Ad esempio, l'unità di territorio vegetato potrebbe contenere diversi strati, aventi profili verticali di contenuto d'acqua nel suolo e della temperatura che evolvono indipendentemente. Seguendo l'esempio utilizzato prima, l'unità di territorio della vegetazione artificiale potrebbe essere divisa in due colonne, irrigata e non-irrigata.

Lo strato di terreno/neve è rappresentato da quindici livelli per il terreno più cinque livelli per la neve, a seconda della profondità della neve. La caratteristica fondamentale del livello strato della sotto-griglia, è di definire le variabili di stato per l'acqua, l'energia nel suolo e nella neve, come pure i flussi di queste componenti all'interno del terreno e della neve.

Indipendentemente dal numero e dal tipo di PFT che occupano lo spazio sullo strato, la fisica dello strato funziona con un singolo set di flussi sui contorni superiori, come pure un singolo set di flussi per la traspirazione, provenienti da diversi livelli del terreno. Questi flussi di contorno sono pesati come medie su tutti i PFT. Attualmente nel modello CLM è assegnato un singolo strato ad ogni unità di territorio, per il ghiaccio, il lago, la palude, l'urbanizzato e la vegetazione.

Il terzo livello della sotto-griglia è riferito come il livello dei PFT, ed include anche il trattamento per il suolo nudo. Questo livello intende cogliere le differenze biofisiche e biochimiche tra le vaste categorie di piante in termini delle loro caratteristiche funzionali. Su un singolo strato possono coesistere fino a 16 PFT che differiscono nella fisiologia e nella struttura. Tutti i flussi diretti e provenienti dalla superficie sono definiti al livello PFT, come sono le variabili di stato della vegetazione (ad esempio la temperatura della vegetazione e l'immagazzinamento d'acqua della chioma). In aggiunta alle strutture dati delle variabili di stato e di flusso per le componenti conservative, ogni livello della sotto-griglia ha anche una struttura dati di stato fisico, per tenere in conto delle quantità che non sono coinvolte nei controlli della conservazione (variabili diagnostiche). Ad esempio, l'umidità è definita attraverso una variabile di stato fisico al livello dell'unità di territorio, il numero di strati di neve è definito come variabile di stato fisico al livello dello strato, e l'indice dell'area fogliare e della frazione della chioma che è bagnata, sono definite come variabili di stato fisiche al livello PFT. E' da notare come i processi biogeofisici legati al terreno e alla neve richiedano che le proprietà del livello PFT siano aggregate al livello di strato. Ad esempio, il flusso netto di calore nel suolo è richiesto come condizione al contorno per la soluzione delle temperature del terreno/neve. Questa proprietà del livello di strato deve essere determinata aggregando il

---

flusso netto di calore proveniente da tutti i PFT che condividono lo strato, e le proprietà corrispondenti sono calcolate attraverso una somma pesata della quantità desiderata su tutti i PFT, il cui peso dipende dall'area relativa occupata da ciascun tipo funzionale.

### 5.2.2 Processi biogeofisici

I processi biogeofisici sono simulati per ogni unità di territorio, per ogni strato e per ogni PFT della sotto-griglia indipendentemente, ed ogni unità mantiene le sue variabili prognostiche. La stessa forzante atmosferica è usata per tutte le unità all'interno di una cella. Le variabili della superficie e i flussi richiesti dall'atmosfera, sono ottenuti mediando le quantità della sotto-griglia, pesate rispetto alle relative aree frazionali occupate. I processi simulati includono (Figura 5.2):

- Composizione, struttura e fenologia della vegetazione;
- Assorbimento, riflessione e trasmissione della radiazione solare;
- Assorbimento ed emissione della radiazione a onda lunga;
- Flussi di quantità di moto, di calore sensibile (suolo e chioma) e di calore latente (evaporazione del suolo, evaporazione della chioma, traspirazione);
- Trasferimento di calore nel suolo e nella neve, incluso il cambiamento di fase;
- Idrologia della chioma (intercettazione, *throughfall* e gocciolamento);
- Idrologia della neve (accumulo e scioglimento della neve, compattazione, trasferimento di acqua tra gli strati);
- Idrologia del suolo (ruscellamento superficiale, infiltrazione, redistribuzione dell'acqua all'interno dello strato, drenaggio, interscambio con la falda profonda);
- Fisiologia stomatale e fotosintesi;
- Temperature e flussi dei laghi;
- Deposizione e flussi delle polveri;
- Composti volatili organici;
- Bilancio dell'energia urbana e clima;
- Ciclo del carbonio-azoto;
- Dinamica del cambiamento della copertura del suolo;
- Dinamica della vegetazione.

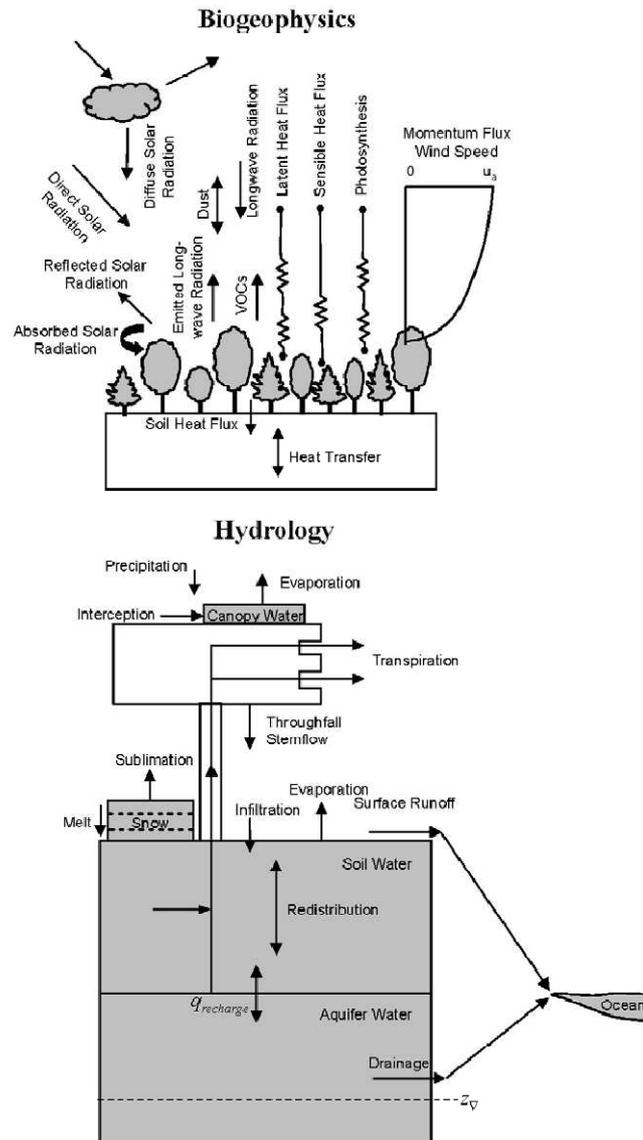


Figura 5.2 Biogeofisica del territorio e processi idrologici simulati dal CLM.

La profondità della tavola d'acqua è  $z_v$  e il tasso di ricarica dell'acquifero è  $q_{recharge}$ .

Nel proseguo si descriveranno solo alcuni dei processi biofisici:

- Composizione e struttura dell'ecosistema

Le superfici vegetate comprendono fino a 15 possibili PFT più il suolo nudo (Tabella 5.1). Questi tipi di piante differiscono nelle proprietà ottiche delle foglie e dei gambi che determinano la riflessione, la trasmissione e l'assorbimento della radiazione solare, nei parametri della distribuzione delle radici, che controllano il prelievo di acqua dal terreno, nei parametri aerodinamici, che determinano la resistenza al trasferimento di calore, di

---

umidità e di quantità di moto e nei parametri fotosintetici, che determinano la resistenza stomatica, la fotosintesi e la traspirazione. La composizione e l'abbondanza dei PFT all'interno di una cella della griglia, possono essere invariati oppure evolvere nel tempo, e in questo caso tale evoluzione può essere prescritta o calcolata prognosticamente tramite il modello di dinamica della vegetazione.

La struttura della vegetazione è definita per mezzo degli indici di area fogliare e di gambo ( $L$ ,  $S$ ) e per mezzo delle altezze del tetto dalla chioma e dal fondo ( $Z_{top}$  e  $Z_{bot}$ ) (Tabella 5.2).

Per ogni PFT sono prescritti differenti indici  $L$  ed  $S$  e differenti altezze, ottenuti tramite interpolazione spaziale e temporale di osservazioni satellitari a cadenza mensile (Bonan et al., 2002).

Gli indici di area fogliare LAI e di area del gambo SAI [ $m^2 / m^2$ ] sono aggiornati giornalmente per mezzo di una interpolazione lineare tra i valori mensili. I valori mensili dell'indice di area fogliare dei PFT sono stati sviluppati dai dati mensili alla risoluzione di 1 km derivati da MODIS, eseguendo la media dell'indice LAI sulla cella della griglia (Myneni et al., 2002), così come descritto da (Lawrence e Chase, 2007) . L'indice di area del gambo SAI è calcolato a partire dall'indice mensile LAI dei PFT utilizzando i metodi di (Zeng et al., 2002).

Tabella 5.1 Tipi funzionali di piante (PFT).

---

Needleleaf evergreen tree-temperate	NET Temperate
Needleleaf evergreen tree-boreal	NET Boreal
Needleleaf deciduous tree-boreal	NDT Boreal
Broadleaf evergreen tree-tropical	BET Tropical
Broadleaf evergreen tree-temperate	BET Temperate
Broadleaf deciduos tree-tropical	BDT Tropical
Broadleaf deciduos tree-temperate	BDT Temperate
Broadleaf deciduos tree-boreal	BDT Boreal
Broadleaf evergreen shrub-temperate	BES Temperate
Broadleaf deciduos shrub-temperate	BDS Temperate
Broadleaf evergreen shrub-boreal	BDS Boreal
C <sub>3</sub> arctic grass	-
C <sub>3</sub> grass	-
C <sub>4</sub> grass	-
Crop	-

---

Tabella 5.2. Altezze dei tipi funzionali di piante (PFT).

<i>PFT</i>	$z_{top} (m)$	$z_{bot} (m)$
NET temperate	17	8.5
NET boreal	17	8.5
NDT boreal	14	7
BET tropical	35	1
BET temperate	35	1
BDT tropical	18	10
BDT temperate	20	11.5
BDT boreal	20	11.5
BES temperate	0.5	0.1
BDS temperate	0.5	0.1
BDS boreal	0.5	0.1
C3 arctic grass	0.5	0.01
C3 grass	0.5	0.01
C4 grass	0.5	0.01
Crop	0.5	0.01

- Idrologia

Il modello parametrizza l'intercettazione, il throughfall, il gocciolamento dalla chioma (canopy drip), l'accumulo e lo scioglimento della neve, il trasferimento dell'acqua tra gli strati di neve, l'infiltrazione, l'evaporazione, il ruscellamento superficiale, il drenaggio subsuperficiale, la redistribuzione all'interno dello strato di terreno, la portata e la ricarica sotterranea per simulare i cambiamenti nell'acqua della chioma  $\Delta W_{can}$ , nell'acqua della neve  $\Delta W_a$ , nell'acqua del terreno  $\Delta W_{liq,i}$  e nel ghiaccio del terreno  $\Delta W_{ice,i}$  ed infine l'acqua nell'acquifero non confinato. Tutte queste grandezze sono espresse in  $kg\ m^{-2}$  oppure in mm di  $H_2O$ .

Il bilancio d'acqua totale del sistema è dato da

$$\Delta W_{can} + \Delta W_{sno} + \sum_{i=1}^{N_{levs}} (\Delta W_{liq,i} + \Delta W_{ice,i}) + \Delta W_a = \begin{pmatrix} q_{rain} + q_{sno} - E_v - E_g - q_{over} \\ -q_{drai} - q_{rgwl} - q_{snwcp,ice} \end{pmatrix} \Delta t \quad (5.1)$$

dove  $q_{rain}$  è la parte liquida della precipitazione,  $q_{snow}$  è la parte solida della precipitazione,  $E_v$  è l'evaporazione da parte della vegetazione ed  $E_g$  è l'evaporazione del terreno,  $q_{over}$  è il

ruscellamento superficiale,  $q_{drai}$  è il drenaggio subsuperficiale,  $q_{rgwl}$  e  $q_{snowcp,ice}$  sono il ruscellamento liquido e solido proveniente dai ghiacciai, dalle paludi e dai laghi (tutti in  $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $N_{levsoi}$  è il numero dei livelli idrologicamente attivi di terreno,  $\Delta t$  è l'intervallo temporale.

I calcoli idrologici sono effettuati soltanto sui livelli di terreno che vanno da 1 a  $N_{levsoi}$ . I livelli di terreno che vanno da  $N_{levsoi+1}$  a  $N_{levgrnd}$  sono considerati idrologicamente inattivi.

La precipitazione o è intercettata dalla chioma, cade direttamente verso la superficie del/della terreno/neve (*throughfall*), oppure gocciola dalla vegetazione (*canopy drip*).

Nella Figura 5.3 le frecce gialle rappresentano il *throughfall*, le frecce rosse lo *stemflow* (ovvero il processo che dirige la precipitazione giù dai rami della pianta e dal gambo), e le frecce in viola indicano il *canopy drip*.

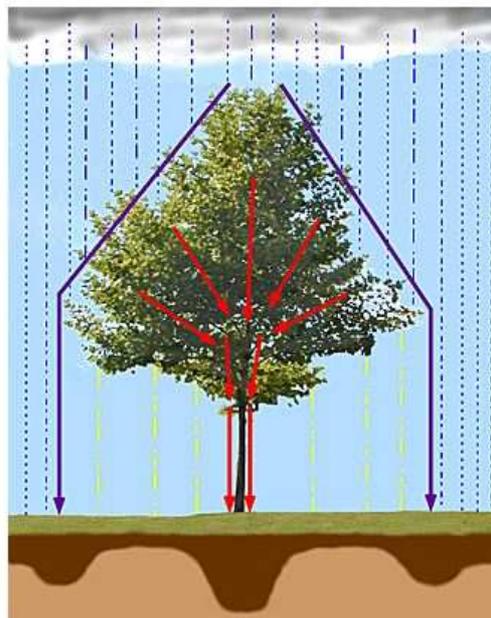


Figura 5.3. Modifica della precipitazione da parte della vegetazione.

L'intercettazione ad opera della vegetazione,  $q_{intr}$  [ $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ], non distingue tra le fasi liquida e solida

$$q_{intr} = \alpha(q_{rain} + q_{snow})\{1 - \exp[-0.5(L + S)]\} \quad (5.2)$$

dove L ed S sono rispettivamente gli indici LAI e SAI, mentre  $\alpha=0.25$  scala l'intercettazione dal punto alla cella della griglia.

Il *throughfall* [ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ], tuttavia, è diviso nelle fasi liquida e solida, che raggiungono il suolo (o la neve) come

$$q_{thru,liq} = q_{rain}[1 - \alpha\{1 - \exp[-0.5(L + S)]\}] \quad (5.3)$$

$$q_{thru,ice} = q_{sonw}[1 - \alpha\{1 - \exp[-0.5(L + S)]\}] \quad (5.4)$$

Allo stesso modo il canopy drip è

$$q_{drip,liq} = \frac{W_{can}^{intr} - W_{can,max}}{\Delta t} \frac{q_{rain}}{q_{rain} + q_{sno}} \geq 0 \quad (5.5)$$

$$q_{drip,ice} = \frac{W_{can}^{intr} - W_{can,max}}{\Delta t} \frac{q_{sno}}{q_{rain} + q_{sno}} \geq 0 \quad (5.6)$$

dove

$$W_{can}^{intr} = W_{can}^n + q_{intr}\Delta t \geq 0 \quad (5.7)$$

rappresenta l'acqua della chioma dopo aver considerato l'intercettazione.

Si è indicato con  $W_{can}^n$  l'acqua della chioma proveniente dal passo temporale precedente, e con  $W_{can,max}$  [ $\text{kg m}^{-2}$ ] la massima quantità d'acqua che la chioma può trattenere

$$W_{can,max} = p(L + S) \quad (5.8)$$

con  $p = 0.1$  [ $\text{kg m}^{-2}$ ]. Il massimo immagazzinamento dell'acqua solida è assunto essere lo stesso dell'acqua liquida.

L'acqua della chioma è aggiornata come

$$W_{can}^{n+1} = W_{can}^n + q_{intr} \Delta t - (q_{drip,liq} + q_{drip,ice})\Delta t - E_v^w \Delta t \geq 0 \quad (5.9)$$

dove  $E_v^w$  è il flusso di vapore acqueo proveniente dalle superfici del gambo e della foglia.

Il tasso totale della precipitazione liquida e solida che raggiunge il suolo è quindi

$$q_{grnd,liq} = q_{thru,liq} + q_{drip,liq} \quad (5.10)$$

$$q_{grnd,ice} = q_{thru,ice} + q_{drip,ice} \quad (5.11)$$

---

La precipitazione solida,  $q_{grnd,ice}\Delta t$ , che giunge al suolo o alla superficie della neve, è aggiunta subito allo strato di neve. La parte liquida,  $q_{grnd,liq}\Delta t$ , è aggiunta dopo che sono stati determinati i flussi superficiali e le temperature del terreno (o della neve se presente). La frazione bagnata della chioma (gambi più foglie), che è richiesta per l'albedo superficiale e per i calcoli del flusso superficiale, è

$$f_{wet} = \left\{ \begin{array}{ll} \left[ \frac{W_{can}}{p(L+S)} \right]^{2/3} \leq 1 & L + S > 0 \\ 0 & L + S = 0 \end{array} \right\} \quad (5.12)$$

mentre la frazione della chioma che è secca e che traspira è data dalla seguente formula.

$$f_{dry} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{(1-f_{wet})L}{L+S} & L + S > 0 \\ 0 & L + S = 0 \end{array} \right\} \quad (5.13)$$

Per parametrizzare il *ruscellamento*, è implementato il semplice modello di ruscellamento (SIMTOP) descritto da (Niu et al., 2005) basato sul TOPMODEL (Beven e Kirkby, 1979). Un concetto chiave per comprendere questo approccio è quello della frazione di area satura/impermeabile  $f_{sat}$  che è determinata dalle caratteristiche topografiche e dallo stato di umidità del terreno di una cella della griglia. Il ruscellamento superficiale consiste in un flusso sul terreno dovuto ai meccanismi di eccesso di saturazione (ruscellamento di Dunne), e all'infiltrazione in eccesso (ruscellamento Hortoniano)

$$q_{over} = f_{sat}q_{liq,0} + (1 - f_{sat})\max(0, q_{liq,0} - q_{infl,max}) \quad (5.14)$$

dove  $q_{liq,0}$  è la precipitazione liquida che giunge al suolo più eventuale acqua proveniente dallo scioglimento della neve [ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ], e  $q_{infl,max}$  è una capacità massima di infiltrazione del terreno [ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ].

L'acqua del suolo è predetta a partire da un modello multi-strato, nel quale il trasporto verticale dell'umidità del suolo è governato dall'infiltrazione, dal ruscellamento superficiale e subsuperficiale, dalla diffusione del gradiente, dalla gravità, dalla traspirazione della chioma per mezzo dell'estrazione della radice e dalle interazioni con l'acqua sotterranea.

Per un flusso verticale monodimensionale nei terreni, la conservazione della massa è data come

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} - Q \quad (5.15)$$

dove  $\theta$  è il contenuto volumetrico di acqua nel suolo ( $\text{mm}^3$  di acqua  $\text{mm}^{-3}$  di suolo),  $t$  è il tempo (s),  $z$  è l'altezza (positiva verso l'alto) sopra qualche dato nello strato di terreno (mm),  $q$  è il flusso d'acqua del terreno ( $[\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}]$  oppure  $[\text{mm s}^{-1}]$ ), positivo verso l'alto, ed infine  $Q$  un termine di perdita per l'umidità del suolo ( $\text{mm di acqua mm}^{-1}$  di suolo  $\text{s}^{-1}$ ).

Questa equazione è risolta numericamente dividendo lo strato di terreno in diversi livelli verticali, ed integrando verso il basso su ciascun livello. Si considera  $q_{infl}$  come condizione al contorno superiore, per il flusso di infiltrazione all'interno del livello di terreno in cima. Come condizione al contorno inferiore viene specificato un flusso nullo.

Il flusso d'acqua nel terreno dell'equazione (5.16) può essere descritto per mezzo della legge di Darcy

$$q = -k \frac{\partial \Psi_h}{\partial z} \quad (5.16)$$

dove con  $k$  si è indicata la conduttività idraulica [ $\text{mm s}^{-1}$ ], e con  $\Psi_h$  il potenziale idraulico [mm]. La conduttività idraulica  $k_i$  [ $\text{mm s}^{-1}$ ] e il potenziale della matrice del suolo  $\Psi_i$  [mm] per un livello  $i$ , varia con il contenuto volumetrico di acqua del terreno  $\theta_i$  e con la tessitura del suolo. Come per le proprietà termiche del suolo, anche le proprietà idrauliche del suolo si assume che siano una combinazione pesata delle proprietà minerali, le quali sono determinate in accordo con i contenuti di sabbia e di argilla.

Il *drenaggio* o il ruscellamento subsuperficiale è basato sullo schema SIMTOP (Niu et al., 2005) con una modifica per tenere in considerazione il drenaggio ridotto nei terreni ghiacciati.

$$q_{drai} = (1 - f_{imp}) q_{drai,max} \exp(-f_{drai} z_v) \quad (5.17)$$

Nella (5.17) compare il termine moltiplicativo  $(1 - f_{imp})$  che invece non è presente nella formulazione originale.  $f_{imp}$  è la frazione di area impermeabile determinata dal contenuto di ghiaccio nei livelli del terreno che interagiscono con la tavola d'acqua. La determinazione della tavola d'acqua  $z_v$  (espressa qui in m), si basa sul lavoro di (Niu et al., 2007). In questo approccio, è aggiunta una componente sotterranea sotto forma di un acquifero non confinato, che giace al di sotto dello strato di terreno.

---

- Fenologia e struttura della vegetazione

Il periodo stagionale della crescita della nuova vegetazione e della caduta sulla lettiera è prognostico, in risposta alla temperatura del terreno e dell'aria, alla disponibilità di acqua nel suolo e alla lunghezza del giorno. Questo è vero in vari gradi che dipendono dal tipo di fenologia specifica per ciascun PFT. Sono considerati tre tipi di fenologie: sempreverde, decidua stagionale e decidua in stato di stress. L'attuale trattamento della fenologia sempreverde è abbastanza semplice, con la caduta sulla lettiera che avviene ad un tasso costante durante l'anno, dipendendo dalla specifica longevità della foglia. Con l'allocazione alla nuova crescita questo processo dipende anche dalla fotosintesi attuale, che controlla il ciclo stagionale della crescita e dello sviluppo della chioma.

L'algoritmo della fenologia decidua stagionale consente una singola nascita della foglia e un singolo periodo di caduta sulla lettiera all'anno. Questo algoritmo è applicato agli alberi decidui temperati e boreali, i quali tipicamente presentano una singola stagione di crescita annuale, per cui la caduta sulla lettiera è fortemente controllata dalla lunghezza del giorno autunnale. L'inizio della nascita della foglia è governato da una somma dei gradi giorno critici, e la caduta della foglia sulla lettiera comincia quando la lunghezza del giorno è più corta di un valore critico (fototipo caratteristico). Il periodo per il trasferimento della nuova crescita dall'immagazzinamento e il periodo per la completa caduta della foglia sulla lettiera sono entrambi di 15 giorni.

L'algoritmo della fenologia decidua in condizioni di stress consente diverse stagioni della crescita nell'arco dell'anno, a seconda delle condizioni favorevoli di umidità del suolo e di temperatura, ed è applicato agli alberi decidui tropicali, a tutti i tipi di arbusti ed ai PFT erbacei. Se durante un periodo inattivo il numero dei giorni con la temperatura sotto lo zero supera un valore critico (impostato qui a 15 giorni) l'inizio della nuova crescita dall'immagazzinamento dipende dai gradi giorno accumulati e dai giorni accumulati (pari a 15) con il potenziale di acqua nel terreno sopra una soglia critica (impostata a -2.0 MPa) per il terzo strato di terreno del modello (a circa 4.5 cm sotto la superficie del suolo). L'inizio della caduta della foglia sulla lettiera è innescato dallo stress idrico accumulato del terreno, definito come più di 15 giorni in cui il potenziale di acqua del suolo nel terzo strato è inferiore a -2.0 MPa. Oppure è innescato dallo stress da freddo, definito come più di 15 giorni in cui la temperatura del terreno nel terzo strato è inferiore allo zero. Sia per l'innescamento della caduta sulla lettiera per lo stress idrico che per lo stress da freddo, i periodi con il potenziale di acqua nel suolo o con la temperatura del suolo sopra la soglia critica, diminuiscono le quantità accumulate, cosicché è richiesto un periodo continuo, o di stress da freddo o di stress idrico, per innescare l'avvio della caduta sulla lettiera. Ad ogni passo temporale, il serbatoio di carbonio della foglia prognostico è "traslato" a un indice di area fogliare proiettato alla scala della chioma, basandosi sull'ipotesi di un gradiente verticale nell'area specifica della foglia che è lineare con l'aumentare del LAI. Il modello biofisico richiede una

stima dell'altezza della vegetazione ( $z_{top}$ ) ottenuta per la vegetazione legnosa a partire dal carbonio del gambo ( $C_{stem}$ ), mentre i tipi di vegetazione non legnosa è funzione del LAI totale della chioma.

## 5.3 Modello biogeochimico CN

In questo capitolo viene proposta una descrizione generale di come il modello CLM possa trattare i cicli di carbonio e azoto. Verranno presi in considerazione alcuni processi biofisici importanti correlati ai suddetti cicli: respirazione autotrofa ed eterotrofa, l'allocazione del carbonio e dell'azoto, la fenologia e struttura della vegetazione, gli incendi ed i processi di assorbimento e perdite di azoto.

### 5.3.1 Descrizione del modello

Il CLM include un trattamento pienamente prognostico dei cicli terrestri del carbonio e dell'azoto, a cui ci si riferisce comunemente come *CN*, includendo le interazioni tra questi cicli come mediate da parte dei meccanismi biologici delle piante e degli eterotrofi del terreno. Questo modello biogeochimico del territorio è stato inizialmente sviluppato dall'unione del framework del Community Land Model (CLM 3.0) (Oleson et al., 2004; Bonan e Levis, 2006; Dickinson et al., 2006) con la dinamica del carbonio e dell'azoto pienamente prognostica del modello biogeochimico terrestre *Biome-BGC* (versione 4.1.2) (Thornton et al., 2002; Thornton e Rosenbloom, 2005). Il modello risultante è pienamente prognostico rispetto a tutte le variabili di stato del carbonio e dell'azoto nella vegetazione, nella lettiera e nella materia organica del suolo. Considera tutte le quantità prognostiche per l'acqua e l'energia nello strato di vegetazione-neve-terreno. Il periodo stagionale della crescita della nuova vegetazione e della caduta sulla lettiera è anche prognostico, rispondendo alla temperatura del terreno e dell'aria, alla disponibilità di acqua nel terreno, e alla lunghezza del giorno, in gradi differenti che dipendono dal tipo di fenologia specifico di ciascun PFT.

Il LAI, il SAI e le altezze della vegetazione sono utilizzate dal modello biofisico.

### 5.3.2 Variabili di stato della vegetazione

Il modello include un trattamento prognostico per le variabili di stato del carbonio e dell'azoto, in diversi tipi di tessuto della vegetazione. Sono tracciate variabili di stato separate per il carbonio e per l'azoto per quanto riguarda i serbatoi della foglia, del gambo vivente, del

---

gambo non vivente, delle radici spesse viventi, delle radici spesse non viventi e delle radici sottili.

Ciascuno di questi serbatoi possiede due serbatoi di immagazzinamento che rappresentano, rispettivamente, l'immagazzinamento di breve-termine e di lungo-termine dei carboidrati non-strutturali e dell'azoto labile. Sono presenti inoltre due serbatoi aggiuntivi, uno per l'immagazzinamento delle riserve della respirazione che servono alla crescita, e l'altro usato per incontrare la domanda in eccesso (utile per il mantenimento della respirazione durante i periodi caratterizzati da bassa fotosintesi). Un serbatoio aggiuntivo di azoto traccia l'azoto che si trasferisce, mobilizzato prima dal tessuto della foglia verso l'escissione e la lettiera.

Nell'insieme ci sono 20 variabili di stato per il carbonio della vegetazione, e 19 per l'azoto della vegetazione. L'integrazione e la fotosintesi della chioma sono gli stessi del modello biofisico.

La fotosintesi al livello della chioma (oppure la produzione primaria netta, *GPP*) è ottenuta sommando i tassi della foglia esposta al sole e all'ombra, scalati dagli indici di area fogliare soleggiata ed ombreggiata, con delle riduzioni potenziali dovute alla disponibilità dell'azoto minerale.

### **5.3.3 Respirazione autotrofa ed eterotrofa**

Il modello tratta separatamente i processi di mantenimento e di crescita della respirazione.

Per la biomassa vivente il mantenimento della respirazione (*MR*) è una funzione della temperatura e della concentrazione di azoto nel tessuto (ad esclusione dei serbatoi per il gambo non-vivente e per le radici spesse). I tassi per i serbatoi sul terreno si basano sulla temperatura dell'aria a 2 metri di altezza, mentre quelli per i serbatoi sotto il terreno dipendono dalla distribuzione frazionale delle radici al variare della profondità e dalle temperature del terreno prognostiche associate. La respirazione per la crescita è calcolata come un fattore di 0.3 volte il carbonio totale destinato alla nuova crescita a un dato passo temporale, basato sui costi di costruzione dei tessuti legnosi e non-legnosi.

Il modello include gli stati del carbonio e dell'azoto per i tre serbatoi relativi alla lettiera, per quelli relativi alla materia organica del suolo e per un serbatoio di detriti legnosi, strutturati in cascata. Le fasi nel processo di decomposizione, che conducono alla mineralizzazione dell'azoto, procedono ai loro tassi potenziali (limitati dall'acqua e dalla temperatura), mentre quelle che conducono all'immobilizzazione dell'azoto minerale possono essere limitate dalla sua disponibilità. La richiesta totale eterotrofa per l'azoto minerale è espressa come somma dell'immobilizzazione potenziale (calcolata per ogni fase nella cascata). Per ogni passo temporale, questa richiesta eterotrofa è in competizione con la domanda totale di azoto della pianta, proveniente da tutti i PFT che condividono lo spazio su un singolo strato di terreno. Una volta terminata questa competizione, l'immobilizzazione attuale è calcolata come una

parte dell'immobilizzazione potenziale. Quest'ultima è applicata nella stessa misura durante tutti i passi dell'immobilizzazione.

### 5.3.4 Allocazione del carbonio e dell'azoto

Ad ogni passo temporale del modello e per ogni PFT che condivide lo spazio su uno strato di terreno, il carbonio disponibile per l'allocazione alla nuova crescita ( $C_{AVAIL}$ ) è calcolato come

$$C_{AVAIL} = GPP - MR \quad (5.18)$$

Se  $MR \geq GPP$ , ad esempio di notte o sotto condizioni di luce bassa o di stress per siccità, allora tutto il prodotto della fotosintesi attuale è diretto verso il soddisfacimento di MR, e  $C_{AVAIL} = 0$ . Qualsiasi richiesta di MR che rimane è soddisfatta aggiungendo un serbatoio di immagazzinamento speciale ( $MR_{POOL}$ ), rappresentante la riserva disponibile.

Diversamente ( $C_{AVAIL} > 0$ ) la prima priorità per la nuova allocazione è di ridurre qualsiasi deficit che potrebbe essersi accumulato in  $MR_{POOL}$  nei precedenti passi temporali (ad un tasso che potrebbe eliminare il deficit corrente in 30 giorni). Il rimanente carbonio è disponibile per l'allocazione utile alla crescita di nuove piante.

La richiesta totale di azoto della pianta al passo temporale è calcolata dall'allometria del carbonio e dalle concentrazioni di azoto per ciascun tipo di tessuto (specificato dal PFT). Le concentrazioni di azoto al livello del tessuto (ad esempio la concentrazione di azoto nella foglia) sono specificate come costanti che variano tra i PFT. Questa richiesta è compensata dalla distribuzione dell'azoto, trasferito dalle foglie senescenti verso un serbatoio di immagazzinamento, nei passi temporali precedenti. La distribuzione da questo serbatoio avviene ad un tasso proporzionale alla dimensione del serbatoio e alla domanda attuale di azoto. Per calcolare la competizione, basata sulla domanda, tra il prelievo della pianta e l'immobilizzazione microbica, la restante richiesta di azoto è sommata su tutti i PFT. Questo avviene per una risorsa di azoto minerale del suolo potenzialmente limitante al livello dello strato. La richiesta di azoto non soddisfatta da parte della pianta è convertita in un deficit di carbonio eliminato attraverso la riduzione della GPP. In tal modo viene rappresentata la regolazione del tasso fotosintetico in caso di limitazione dell'azoto.

L'effetto indiretto di limitazione dell'azoto sulla cattura della luce per la riduzione dell'allocazione alla nuova crescita, rappresenta un altro significativo meccanismo di regolazione nel modello. Quest'ultimo opera su lunghe scale temporali e ha una forte influenza sugli stati e sui flussi del sistema pianta-terreno a scala globale. Una frazione del carbonio e dell'azoto allocata ad ogni passo temporale è immagazzinata ed esposta come nuova crescita nell'anno successivo. Tale frazione è specificata come un singolo valore per

---

ciascun PFT e il tempo di esposizione del carbonio e dell'azoto immagazzinato è controllato dagli algoritmi della fenologia. Il trasferimento del carbonio e dell'azoto precedentemente allocati dall'immagazzinamento all'esposizione per la nuova crescita, rappresenta il meccanismo per cui la vegetazione sempre decidua è in grado di avviare in anticipo la crescita. Tutti i PFT decidui hanno una crescita di immagazzinamento impostata al 50%. Il meccanismo è meno critico per la vegetazione sempreverde, e qui il valore della crescita di immagazzinamento è impostato a 0% per tutti i PFT che condividono questa strategia.

Il modello non impone nessun vincolo fisso per quanto riguarda gli accumuli massimi o minimi di carbonio e azoto nelle foglie o negli altri tessuti. Le dimensioni del serbatoio di carbonio e di azoto della vegetazione ad uno stato stabile sono determinati dall'equilibrio dinamico tra la nuova crescita, la caduta sulla lettiera, la mortalità e le perdite dovute agli incendi. Nei casi dove la combinazione del clima e la parametrizzazione ecofisiologica della pianta non consentano una crescita netta, i serbatoi di carbonio e azoto della vegetazione sono trasferiti completamente alla lettiera. Per combinazioni di clima e di PFT con un potenziale di crescita molto forte, l'accumulo del carbonio della foglia conduce a un indice di area fogliare che limita la penetrazione della luce e il tasso medio fotosintetico nella frazione della chioma ombrosa. In tal modo ne rallenta la crescita e pone un limite superiore meccanicistico a quella nuova.

### **5.3.5 Fenologia e struttura della vegetazione**

Il periodo stagionale della crescita della nuova vegetazione e della caduta sulla lettiera è prognostico, in risposta alla temperatura del terreno e dell'aria, alla disponibilità di acqua nel suolo e alla lunghezza del giorno. Questo è vero in vari gradi che dipendono dal tipo di fenologia specifica per ciascun PFT. Sono considerati tre tipi di fenologie: sempreverde, decidua stagionale e decidua in stato i stress. L'attuale trattamento della fenologia sempreverde è abbastanza semplice, con la caduta sulla lettiera che avviene ad un tasso costante durante l'anno, dipendendo dalla specifica longevità della foglia. Con l'allocazione alla nuova crescita questo processo dipende anche dalla fotosintesi attuale, che controlla il ciclo stagionale della crescita e dello sviluppo della chioma.

L'algoritmo della fenologia decidua stagionale consente una singola nascita della foglia e un singolo periodo di caduta sulla lettiera all'anno. Questo algoritmo è applicato agli alberi decidui temperati e boreali, i quali tipicamente presentano una singola stagione di crescita annuale, per cui la caduta sulla lettiera è fortemente controllata dalla lunghezza del giorno autunnale. L'inizio della nascita della foglia è governato da una somma dei gradi giorno critici, e la caduta della foglia sulla lettiera comincia quando la lunghezza del giorno è più corta di un valore critico (fototipo caratteristico). Il periodo per il trasferimento della nuova

crescita dall'immagazzinamento e il periodo per la completa caduta della foglia sulla lettiera sono entrambi di 15 giorni.

L'algoritmo della fenologia decidua in condizioni di stress consente diverse stagioni della crescita nell'arco dell'anno, a seconda delle condizioni favorevoli di umidità del suolo e di temperatura, ed è applicato agli alberi decidui tropicali, a tutti i tipi di arbusti ed ai PFT erbacei. Se durante un periodo inattivo il numero dei giorni con la temperatura sotto lo zero supera un valore critico (impostato qui a 15 giorni) l'inizio della nuova crescita dall'immagazzinamento dipende dai gradi giorno accumulati e dai giorni accumulati (pari a 15) con il potenziale di acqua nel terreno sopra una soglia critica (impostata a -2.0 MPa) per il terzo strato di terreno del modello (a circa 4.5 cm sotto la superficie del suolo). L'inizio della caduta della foglia sulla lettiera è innescato dallo stress idrico accumulato del terreno, definito come più di 15 giorni in cui il potenziale di acqua del suolo nel terzo strato è inferiore a -2.0 MPa. Oppure è innescato dallo stress da freddo, definito come più di 15 giorni in cui la temperatura del terreno nel terzo strato è inferiore allo zero. Sia per l'innescamento della caduta sulla lettiera per lo stress idrico che per lo stress da freddo, i periodi con il potenziale di acqua nel suolo o con la temperatura del suolo sopra la soglia critica, diminuiscono le quantità accumulate, cosicché è richiesto un periodo continuo, o di stress da freddo o di stress idrico, per innescare l'avvio della caduta sulla lettiera. Ad ogni passo temporale, il serbatoio di carbonio della foglia prognostico è "traslato" a un indice di area fogliare proiettato alla scala della chioma, basandosi sull'ipotesi di un gradiente verticale nell'area specifica della foglia che è lineare con l'aumentare del LAI. Il modello biofisico richiede una stima dell'altezza della vegetazione ( $z_{top}$ ) ottenuta per la vegetazione legnosa a partire dal carbonio del gambo ( $C_{stem}$ ), mentre i tipi di vegetazione non legnosa è funzione del LAI totale della chioma.

### 5.3.6 Incendi e mortalità

In genere è sufficiente considerare la quantità di combustibile e l'umidità della lettiera come elementi chiave per il regime degli incendi. In particolare è l'umidità della lettiera a governare la probabilità di incendio giornaliera (Thonicke et al., 2001). La lunghezza della stagione degli incendi viene utilizzata per stimare la frazione di area bruciata all'interno di una cella nel corso di un dato anno.

Il modello CLM include due meccanismi di mortalità indipendenti, costituiti da un algoritmo di incendio di tipo prognostico, che dipende dalla disponibilità di combustibile e dalle condizioni di umidità del suolo vicino alla superficie e da una mortalità della pianta dovuta ad altre cause. La routine per la mortalità da incendio è basata sul modello di (Thonicke et al., 2001), con delle modifiche per adattare il passo temporale annuale originale al passo temporale sub-quotidiano del CLM. Essa consiste principalmente nel reinterpretare la

---

frazione annuale di area bruciata ad ogni passo temporale, non più una volta all'anno, ma al contrario utilizzando nelle simulazioni una media della probabilità di incendio giornaliera.

Il risultato è che l'area frazionale bruciata, per una data cella della griglia, presenta un ciclo stagionale che corrisponde agli aumenti ed alle diminuzioni nella probabilità di incendio giornaliera, come previsto dal modello originale. L'area frazionale bruciata ad ogni passo temporale, è applicata ai serbatoi di carbonio e azoto (del livello-strato) della lettiera e dei detriti legnosi spessi (*CWD*). Essa è applicata differentemente ai serbatoi di carbonio e di azoto della vegetazione, a seconda della resistenza all'incendio specifica per ogni PFT.

La combustione è assunta completa per la parte colpita della foglia, della radice fine e dei serbatoi della lettiera, mentre per i serbatoi del gambo, della radice legnosa spessa e del *CWD* si assume una combustione incompleta (fissata al 20% della frazione colpita del serbatoio). Le frazioni combuste dei serbatoi del carbonio sono restituite all'atmosfera, come parte del flusso di carbonio netto. I serbatoi di azoto combusti sono trattati invece come perdite verso l'atmosfera. Si assume che le frazioni incombuste dei serbatoi legnosi, della vegetazione colpita, persistano come nuove aggiunte al serbatoio *CWD*. Mentre la frazione incombusta del serbatoio *CWD* colpito rimane sul posto.

La mortalità dell'intera pianta è stimata ad ogni passo temporale, ed è trattata semplicemente come una percentuale della massa totale. Tale massa è contenuta in ogni serbatoio della vegetazione che viene perso verso la lettiera e nei serbatoi legnosi spessi su base annuale. Qui è utilizzato un valore del 2% all'anno per tutti i PFT, sebbene sia desiderabile un trattamento più meccanicistico, con delle dipendenze basate sulla distribuzione dei PFT, dell'età e della dimensione degli individui.

### **5.3.7 Fonti di azoto e perdite**

Il bilancio di lungo termine tra i guadagni e le perdite di azoto, rappresenta per molti ecosistemi un controllo dominante sulla produttività e sull'immagazzinamento di carbonio. Thornton e Rosenbloom (Thornton e Rosenbloom, 2005) hanno dimostrato l'importanza di questo controllo per il modello Biome-BGC, e queste dinamiche si adattano bene anche al modello CN.

Il modello include la deposizione dell'azoto minerale, combinando la deposizione degli  $\text{NO}_x$  e degli  $\text{NH}_x$  dall'atmosfera e la fissazione dell'azoto biologico, come fonti del nuovo azoto minerale che entrano negli ecosistemi terrestri. Si assume che entrambe le fonti entrino direttamente nel serbatoio di azoto minerale del suolo. La deposizione atmosferica è prescritta come un tasso annuale per ciascuna cella della griglia, con l'opzione di fornire un campo variante nel tempo. I valori, se necessario, sono interpolati nel tempo per produrre un campo non discontinuo ad ogni cella della griglia. Questi tassi sono stati ottenuti da una

simulazione CAM transitoria dal 1850-2009 (ad una risoluzione di 1.9x2.5x26L) comprendente la chimica reattiva in troposfera e stratosfera.

Le concentrazioni osservate sono specificate per il metano, per l' $N_2O$ , per le sostanze lesive dell'ozono (*CFC*) e per la  $CO_2$ .

La fissazione dell'azoto biologico (*BNF* [ $g\ N/ m^2\ y$ ]) è stimata come una funzione della produzione primaria netta annuale (*NPP* [ $g\ C/m^2\ y$ ]), come

$$BNF = 1.8[1 - \exp(-0.003.NPP)] \quad (5.19)$$

Questa formulazione coglie la dipendenza osservata ad ampia scala del BNF sulla produttività dell'ecosistema e per alti valori di NPP presenta una ridotta sensibilità tra fluttuazioni di NPP e di BNF, rappresentando in questo modo l'insorgere di limitazioni da altri nutrienti che caratterizzano i sistemi molto produttivi. Il modello include quattro percorsi per la perdita di azoto: denitrificazione, volatilizzazione, separazione e le perdite dovute agli incendi.

## 5.4 Modello dinamico di vegetazione globale CNDV

Nel CLM l'utente può scegliere di lanciare il modello CN come un modello dinamico di vegetazione globale (*DGVM*), qui chiamato *CNDV*. E' importante notare che il modello di biogeochimica standard CN, consente di eseguire i calcoli relativi al carbonio e all'azoto, ma non permette di valutare la biogeografia dinamica. Poiché il CN deve essere attivo affinché si possa lanciare il *CNDV*, si deduce che nel CLM anche il *DGVM* include un ciclo per l'azoto.

Il *CNDV* può simulare soltanto cambiamenti biogeografici della vegetazione naturale. Qui, l'unità di territorio vegetata è separata in vegetazione naturale e antropica, per consentire la coesistenza di entrambi i tipi di vegetazione. Questo funziona solo se l'unità di territorio antropica è fissata. Per implementare il *CNDV*, è stato introdotto il codice del modello di vegetazione dinamica delle precedenti versioni del CLM (*CLM-dgvm*), al framework orario del CN, soltanto per riuscire a simulare gli aggiornamenti della biogeografia annuale. Questo include i processi annuali di competizione per la luce, lo stabilimento e la sopravvivenza per quanto riguarda la copertura dei PFT (detta *FPC*) e la popolazione (*P*), ma non per i processi relativi ai serbatoi di carbonio, al LAI o all'altezza della chioma. Nel *CNDV* il calcolo del gap di mortalità utilizza i concetti di stress annuale di calore e alcune considerazioni

sull'efficienza di crescita. Tutti gli altri processi dell'ecosistema (allocazione, fenologia, incendi, etc.) sono tenuti dai moduli del CN. A differenza del precedente CLM-dgvm, nel CNDV gli aggiornamenti della biogeografia annuale sono interpolati ad intervalli orari.

### 5.4.1 Stabilimento e sopravvivenza

La distribuzione dei PFT è in genere prescritta nel CLM, tranne nel caso in cui il CNDV è attivo. Nel CNDV infatti il modello inizia la simulazione senza nessuna informazione sui PFT per la cella della griglia. Il modello valuta se un PFT può oppure non può stabilirsi o sopravvivere, secondo i limiti bioclimatici dei PFT (Tabella 5.3). I PFT del tipo “*shrub*” (ovvero gli arbusti) vengono trattati come alberi allo stabilimento.

Quando un PFT può stabilirsi, il CNDV trascura l'introduzione annuale dei giovani alberi e aggiorna la FPC sulla base della consistenza del serbatoio di carbonio a livello delle foglie per il relativo PFT. Per i nuovi PFT stabiliti, il CNDV assegna un valore pari a 1 gC m<sup>-2</sup> dell'area dell'unità di territorio per quanto riguarda il carbonio della foglia relativo ai semi. Il FPC dei semi è uguale a 0.05 per le specie erbacee e 0.000844 per gli alberi (valori determinati dalle simulazioni del CLM-dgvm). Il CNDV considera l'aggiunta di nuovi individui alla popolazione P. La copertura FPC cambia annualmente come nel CLM-dgvm, ma qui è interpolata ad un incremento orario. Naturalmente l'energia e la massa sono conservate.

Tabella 5.3. Biogeografia dei tipi funzionali di pianta (PFT) rispetto al clima.

$T_{c,min}$  (°C), temperature dell'aria mensile minima più fredda per la sopravvivenza dei PFT precedentemente stabiliti;  $T_{c,max}$  (°C) temperature dell'aria mensile minima più calda per lo stabilimento dei nuovi PFT;  $GDD_{min}$ , gradi giorno crescenti annuali minimi sopra i 5°C per lo stabilimento di nuovi PFT.

PFT	Sopravvivenza		Stabilimento
	$T_{c,min}$ (°C)	$T_{c,max}$ (°C)	$GDD_{min}$
Tropical broadleaf evergreen tree (BET)	15.5	No limit	0
Tropical broadleaf deciduous tree (BDT)	15.5	No limit	0
Temperate needleleaf evergreen tree (NET)	-2.0	22.0	900
Temperate broadleaf evergreen tree (BET)	3.0	18.8	1200
Temperate broadleaf deciduous tree (BDT)	-17.0	15.5	1200
Boreal needleleaf evergreen tree	-32.5	-2.0	600

Boreal deciduous tree	No limit	-2.0	350
Temperate broadleaf deciduous shrub (BDS)	-17.0	No limit	1200
Boreal broadleaf deciduous shrub (BDS)	No limit	-2.0	350
C <sub>4</sub>	15.5	No limit	0
C <sub>3</sub>	-17.0	15.5	0
C <sub>3</sub> artic	No limit	-17.0	0

### 5.4.2 Competizione per la luce

Nell'ordine dei processi annuali del CNDV, la competizione per la luce è invocata prima dello stabilimento e della sopravvivenza. Tuttavia, la competizione per la luce non influenza una simulazione che parte dal suolo nudo fino a quando la vegetazione non occupa completamente l'unità di territorio (almeno un paio d'anni). La competizione per la luce comincia con un calcolo che aggiorna la copertura FPC. A causa del loro vantaggio nell'altezza, gli alberi occuperanno fino al 95% dell'unità di territorio, indipendentemente dalla produttività dell'erba e degli arbusti. L'erba ha la seconda priorità, e infine gli arbusti che hanno accesso allo spazio rimanente. Il risultato è che gli alberi dominano nelle regioni maggiormente produttive, l'erba nelle regioni meno produttive ed infine gli arbusti nelle regioni non-desertiche meno produttive.

### 5.4.3 Processi modificati del CN per l'accoppiamento con il CNDV

Per quanto riguarda il gap di mortalità e la mortalità provocata dagli incendi, non viene più utilizzato il tasso di mortalità annuale costante di 0.02. Questo tasso costante è sostituito, per gli alberi e gli arbusti, da un tasso annuale calcolato tenendo conto dell'ambiente e della mortalità da stress. Il modulo del CN converte il tasso annuale ad un tasso orario. Il CNDV utilizza le caratteristiche di individuo medio e la numerosità della popolazione (P) per ciascun PFT nei calcoli della competizione per la luce, dello stabilimento e della sopravvivenza. Sono considerati gli individui rimossi ad ogni ora dalla popolazione P, in risposta alla mortalità per incendi ed altre cause. I serbatoi di carbonio per gli individui e la copertura FPC rimangono invece costanti. Infine, gli aggiornamenti della popolazione P influenzano solamente i processi annuali di competizione per la luce, lo stabilimento e la sopravvivenza.

---

## 5.5 Configurazione e Implementazione del modello CLM

Il modello CLM per effettuare le simulazioni richiede:

- Accoppiamento atmosferico;
- Inizializzazione;
- Dati superficiali.

Ciascun punto verrà analizzato nei sotto paragrafi successivi. Verrà dedicato anche un paragrafo alla configurazione del suddetto modello e alla sua implementazione sul server disponibile presso il *Consorzio Interuniversitario Lombardo per L'Elaborazione Automatica (CILEA)*.

### 5.5.1 Accoppiamento atmosferico

Lo stato attuale dell'atmosfera (Tabella 5.4) ad un dato passo temporale è utilizzato per forzare il CLM. Questo stato atmosferico è fornito dal modello atmosferico nella modalità accoppiata. Il CLM, dunque, inizia un set completo di calcoli per l'energia della superficie, per i costituenti, per la quantità di moto e per i flussi radiativi. I calcoli del modello sono implementati in due passaggi. Il CLM procede con i calcoli dell'energia della superficie, dei costituenti, della quantità di moto e dei flussi radiativi utilizzando gli stati idrologici del suolo e della neve provenienti dal precedente passo temporale. In seguito esso aggiorna i calcoli dell'idrologia del suolo e della neve basandosi su questi flussi. Questi campi sono poi inviati all'atmosfera (Tabella 5.5).

Gli albedo inviati all'atmosfera sono quelli per l'angolo zenitale solare al passo temporale successivo, ma con le condizioni della superficie provenienti dal passo temporale corrente.

Nella modalità *offline* (ovvero disaccoppiata da un modello atmosferico), le forzanti atmosferiche richieste dal CLM sono fornite attraverso dei dataset osservati. In questo elaborato si è adottata la modalità *offline*. Il dataset di forzanti standard fornito con il modello comprende 57 anni di osservazioni (1948-2004) ed è descritto in (Qian et al., 2006). Sono presenti tre flussi: uno relativo alla precipitazione  $P$  [ $\text{mm s}^{-1}$ ], uno relativo alla radiazione solare  $S_{atm}$  [ $\text{W m}^{-2}$ ], e altri quattro campi [pressione atmosferica  $P_{atm}$  [Pa], umidità specifica atmosferica  $q_{atm}$  [ $\text{kg kg}^{-1}$ ], temperatura atmosferica  $T_{atm}$  [K] e vento atmosferico  $W_{atm}$  [ $\text{m s}^{-1}$ ]. Questi tre flussi sono separati perché gestiti in maniera differente a seconda del tipo di campo e di risoluzione temporale alla quale vengono forniti.

Nel dataset utilizzato la precipitazione è fornita ad intervalli di sei ore, e il modello atmosferico adotta un tasso costante all'interno di tale intervallo temporale. La radiazione solare totale è fornita alla stessa risoluzione temporale, mentre in questo caso i dati sono

adattati utilizzando una funzione che dipende dall'angolo di zenit solare  $\mu$ . I restanti quattro campi (pressione, umidità, temperatura e vento), sono forniti ad intervalli di tre ore ed interpolati linearmente al passo temporale del modello.

Tabella 5.4. Input atmosferico al modello CLM.

Reference height	$z'_{atm}$	m
Zonal wind at $z_{atm}$	$u_{atm}$	$\text{m s}^{-1}$
Meridional wind at $z_{atm}$	$v_{atm}$	$\text{m s}^{-1}$
Potential temperature	$\overline{\theta}_{atm}$	K
Specific humidity at $z_{atm}$	$q_{atm}$	$\text{kg kg}^{-1}$
Pressure at $z_{atm}$	$P_{atm}$	Pa
Temperature at $z_{atm}$	$T_{atm}$	K
Incident longwave radiation	$L_{atm} \downarrow$	$\text{W m}^{-2}$
Liquid precipitation	$q_{rain}$	$\text{mm s}^{-1}$
Solid precipitation	$q_{sno}$	$\text{mm s}^{-1}$
Incident direct beam visible solar radiation	$S_{atm} \downarrow_{vis}^{\mu}$	$\text{W m}^{-2}$
Incident direct beam near-infrared solar radiation	$S_{atm} \downarrow_{nir}^{\mu}$	$\text{W m}^{-2}$
Incident diffuse visible solar radiation	$S_{atm} \downarrow_{vis}$	$\text{W m}^{-2}$
Incident diffuse near-infrared solar radiation	$S_{atm} \downarrow_{nir}$	$\text{W m}^{-2}$
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> ) concentration	$c_a$	ppmv
Aerosol deposition rate	$D_{sp}$	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Nitrogen deposition rate	$NF_{ndep\_sminn}$	$\text{g(N) m}^{-2} \text{yr}^{-1}$

Tabella 5.5. Output del CLM al modello atmosferico.

Latent heat flux	$\lambda_{vap}E_v + \lambda E_g$	$\text{W m}^{-2}$
Sensible heat flux	$H_v + H_g$	$\text{W m}^{-2}$
Water vapor flux	$E_v + E_g$	$\text{mm s}^{-1}$
Zonal momentum flux	$\tau_x$	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$
Meridional momentum flux	$\tau_y$	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$
Emitted longwave radiation	$L \uparrow$	$\text{W m}^{-2}$
Direct beam visible albedo	$I \uparrow_{vis}^{\mu}$	-

---

Direct beam near-infrared albedo	$I \uparrow_{nir}^{\mu}$	-
Diffuse visible albedo	$I \uparrow_{vis}$	-
Diffuse near-infrared albedo	$I \uparrow_{nir}$	-
Absorbed solar radiation	$\vec{s}$	$W m^{-2}$
Radiative temperature	$T_{rad}$	K
Temperature at 2 meter height	$T_{2m}$	K
Specific humidity at 2 meter height	$q_{2m}$	$kg kg^{-1}$
Snow water equivalent	$W_{sno}$	m
Aerodynamic resistance	$r_{am}$	$s m^{-1}$
Friction velocity	$u_*$	$m s^{-1}$
Dust flux	$F_j$	$kg m^{-2} s^{-1}$
Net ecosystem exchange	NEE	$kgCO_2 m^{-2} s^{-1}$

---

## 5.5.2 Inizializzazione

L'inizializzazione del CLM dipende dal tipo di simulazione, che può avvenire in modalità *startup* oppure *restart*. La modalità di *startup* adotta condizioni iniziali arbitrarie o fornite dall'utente, mentre nella modalità di *restart* il modello prosegue da una simulazione precedente ed è inizializzato da un file generato al termine di quest'ultima. Nel seguito sono descritte le condizioni arbitrarie che sono state adottate nelle nostre simulazioni.

Le unità di territorio della vegetazione, delle paludi e dei ghiacci hanno quindici livelli verticali, mentre i laghi ne hanno dieci. Per i punti del terreno, i calcoli della temperatura sono eseguiti su tutti gli strati,  $N_{levgrnd}=15$ , mentre i calcoli dell'idrologia sono eseguiti sui primi dieci strati,  $N_{levsoi}=10$ , essendo i cinque strati di fondo specificati come roccia impermeabile (*bedrock*).

I punti del terreno sono inizializzati con la temperatura del suolo superficiale  $T_g$  e la temperatura dello strato di terreno  $T_i$ , con  $i=1, \dots, N_{levgrnd}$ , di 274 K; la temperatura della vegetazione  $T_v$  di 283 K; assenza dell'acqua della neve o della chioma ( $W_{sno}=0, W_{can}=0$ ), e il contenuto volumetrico di acqua del suolo  $\vartheta=0.3 mm^3 mm^{-3}$  per gli strati  $i=1, \dots, N_{levsoi}$  e  $\vartheta=0.0 mm^3 mm^{-3}$  per gli strati  $i= N_{levsoi} + 1, \dots, N_{levgrnd}$ .

Le temperature dei laghi ( $T_g$  e  $T_i$ ) sono inizializzate a 277 K e  $W_{sno}=0$ . Le temperature delle paludi ( $T_g$  e  $T_i$ ) sono inizializzate a 277 K,  $\vartheta=1.0 mm^3 mm^{-3}$  per gli strati  $i=1, \dots, N_{levsoi}$  e  $\vartheta=0.0 mm^3 mm^{-3}$  per gli strati  $i= N_{levsoi} + 1, \dots, N_{levgrnd}$ , e  $W_{snow}=0$ . Tutte le unità del territorio della vegetazione, delle paludi e dei ghiacci, sono inizializzate con un contenuto d'acqua

$W_a=W_t=4800 \text{ mm}$  (nell'acquifero non confinato e nel terreno non saturo), e con una profondità della falda indicata come  $z_v=4.8 \text{ m}$ .

### 5.5.3 Dati superficiali

I dati superficiali richiesti per ciascuna cella della griglia del territorio sono elencati nella Tabella 5.6 e includono:

- Le porzioni della cella della griglia occupate dai ghiacciai, dai laghi, dalle paludi e dall'urbanizzato (la vegetazione occupa il restante spazio);
- la copertura frazionale di ciascun PFT;
- l'indice di area fogliare, l'indice di area del gambo e le altezze del tetto, dalla chioma e dal fondo, per ogni PFT;
- le caratteristiche del suolo (colore, tessitura e consistenza dei serbatoi di materia organica).

Sono anche richiesti un certo numero di campi per parametri urbani. I campi sono aggregati alla griglia del modello a partire dai dataset superficiali ad alta risoluzione. Il colore del suolo determina gli albedo del suolo secco e saturo. Il contenuto di sabbia, argilla e di materia organica determina le proprietà termiche ed idrologiche. La massima area satura frazionale è usata per determinare il ruscellamento superficiale e l'infiltrazione. La percentuale di ciascun PFT è data rispetto alla porzione vegetata della cella della griglia, la somma dei PFT è pari al 100%. La percentuale di laghi, di paludi, di ghiacciai e di urbanizzato alla loro risoluzione di base sono specificate rispetto all'intera griglia della cella. Le procedure di creazione dei dataset superficiali aggiustano le percentuali di PFT per assicurare che la somma di tutti i tipi di copertura del territorio, nella cella della griglia, sia il 100%. Per i laghi, i ghiacciai e le paludi è richiesta una soglia minima pari all'1% dell'area della cella. La soglia minima per le aree urbane è dello 0,1%. Nei dataset superficiali sono anche contenuti il numero di punti di longitudine per la latitudine, la latitudine e la longitudine al centro della cella della griglia, gli orli nord, sud, est ed ovest e l'area di ciascuna cella della griglia. Per una griglia regolare il numero di punti di longitudine dovrebbe essere lo stesso per ciascuna latitudine. La latitudine e la longitudine sono utilizzate per determinare l'angolo di zenit solare. I PFT e le loro abbondanze sono derivate dai dati satellitari MODIS come descritto in (Lawrence and Chase, 2007) . Gli indici di area fogliare dei PFT prescritti sono derivati dai dati satellitari MODIS usando i metodi descritti in (Myneni et al., 2002) e (Lawrence e Chase, 2007). Gli indici di area del gambo sono derivati dalla fenologia degli indici di area fogliare dei PFT, combinati con i metodi di (Zeng et al., 2002). Le altezze prescritte del tetto dalla chioma e dal

fondo provengono da (Bonan, 1996) e (Bonan et al. 2002). Se il modello del carbonio-azoto è attivo, esso fornisce gli indici LAI e SAI e le altezze del tetto dalla chioma e dal fondo dinamicamente e i valori prescritti sono in tal modo ignorati. Nelle simulazioni effettuate per il nostro studio il modello CLM è stato utilizzato con la configurazione CN ovvero con il modello biogeochimico attivo. In questo caso la simulazione biogeofisica media è leggermente “degradata” poiché la struttura della vegetazione è prognostica e non più prescritta come accade invece nella configurazione standard SP (dove la fenologia proviene da dati satellitari). I dati sono riportati in Tabella 5.6.

Tabella 5.6. Dati superficiali richiesti per il CLM, loro risoluzione spaziale di base e metodo di aggregazione alla griglia del modello.

Campo Superficiale	Risoluzione	Metodo di Aggregazione
Percentuale di ghiacciai	0.5°	Media dell'area
Percentuale di laghi	1°	Media dell'area
Percentuale di paludi	1°	Media dell'area
Percentuale di urbanizzato	0.5°	Media dell'area
Percentuale di sabbia, percentuale di argilla	5'	Unità della mappa con l'area maggiore
Densità della materia organica del suolo	1°	Media dell'area
Colore del suolo	0.5°	Classe di colore con l'area maggiore
Frazione massima di area satura	0.5°	Media dell'area
PFT (percentuale di suolo vegetato)	0.5°	Media dell'area
LAI e SAI mensili	0.5°	Media dell'area
Altezza della chioma (cima, fondo)	0.5°	Media dell'area

### 5.5.4 Configurazione del modello per i siti di analisi

La configurazione del CLM avviene a partire da quella del modello completo CESM. Trattandosi di un modello climatico accoppiato è necessario innanzitutto che si definisca quali sono le componenti del modello “attive”, ovvero le componenti dinamiche che in genere sono completamente prognostiche. Essendo i modelli attivi piuttosto costosi dal punto di vista computazionale, il CESM include dei modelli definiti come *data model* che velocizzano l’accesso ai dati di input.

Per i casi in analisi si è utilizzata la componente attiva terrestre forzata con i dati atmosferici. Dopo aver scelto quali componenti utilizzare è possibile procedere con la configurazione della simulazione del CLM. Tale configurazione è caratterizzata da una numerosa lista di opzioni che consentono di personalizzare e adattare il modello alle esigenze specifiche. Non è tra gli scopi di questo elaborato entrare nel dettaglio tecnico della configurazione del modello CLM. Per eventuali approfondimenti si rimanda alla guida dell’utente “*CESM Research Tools: CLM4.0.10 User’s Guide Documentation*” (Kluzek, 2010).

Per l’analisi *Single Site* si è utilizzato il CLM con la configurazione seguente:

- modello terrestre attivo;
- modello atmosferico di tipo *data model* con le forzanti atmosferiche del dataset QIAN all’anno 2003;
- biogeochimica attiva (modello CN) o dinamica della vegetazione attiva (modello CNDV);
- risoluzione spaziale  $0.9^\circ \times 1.25^\circ$  (f09);
- risoluzione temporale standard del modello CLM di 1800 secondi.

Per l’analisi *Spazialmente Distribuita* la configurazione utilizzata è la seguente:

- modello terrestre attivo;
- modello atmosferico di tipo *data model* con le forzanti atmosferiche del dataset QIAN all’anno 2003;
- biogeochimica attiva (modello CN);
- 5 celle con risoluzione spaziale  $0.9^\circ \times 1.25^\circ$  (f09);
- risoluzione temporale standard del modello CLM di 1800 secondi.

Per quanto riguarda le condizioni iniziali il CLM prevede tali condizioni siano relative ad una condizione di equilibrio. Tale condizione è raggiunta attraverso uno *spin-up*, ovvero una simulazione con condizioni iniziali arbitrarie per un periodo di tempo sufficientemente lungo da garantire l’esaurimento della fase transitoria determinata da tali condizioni iniziali, che varia a seconda del tipo di configurazione del CLM e dopo la quale si osserva una

stabilizzazione delle serie storiche delle variabili di output a dei valori che rimangono costanti o oscillanti attorno ad una media costante nel tempo. Nella tabella che segue (Tabella 5.7) sono indicati i tempi minimi di *spin-up* del CLM nelle possibili configurazioni e nelle due modalità utilizzate. Si nota come i tempi sono maggiori se il modello funziona con i cicli del carbonio e dell'azoto attivi. In Tabella 5.8 sono riportate invece le durate dello spinup di ciascuna fase del modello distribuito.

Tabella 5.7 Tempi di spin-up del CLM in modalità single site necessari per il raggiungimento di uno stato di equilibrio con il clima.

<b><i>CLM-SP</i></b> <b><i>(Fenologia da satellite)</i></b>	<b><i>CLM-CN</i></b> <b><i>(Biogeochimica attiva)</i></b>	<b><i>CLM-CNDV</i></b> <b><i>(Dinamica della vegetazione attiva)</i></b>
50 anni di simulazione	600 anni di simulazione	800 anni di simulazione

Tabella 5.8 Tempi di spin-up del CLM in modalità spazialmente distribuita necessari per il raggiungimento di uno stato di equilibrio con il clima.

<b><i>CLM-CN</i></b> <b><i>AD_SPINUP</i></b>	<b><i>CLM-CN</i></b> <b><i>EXIT_SPINUP</i></b>	<b><i>CLM-CN</i></b> <b><i>FINAL_SPINUP</i></b>
600 anni di simulazione	1 anno di simulazione	50 anni di simulazione

Le simulazioni sono state realizzate utilizzando uno dei server disponibili presso il *Consorzio Interuniversitario Lombardo per L'Elaborazione Automatica (CILEA)*. In particolare si è utilizzato il server *LAGRANGE* per la compilazione del codice sorgente e per le simulazioni. Le variabili di output del modello CLM hanno frequenza mensile.

Nella modalità single site si sono effettuate simulazioni superiori ai 1000 anni per garantire il raggiungimento dell'equilibrio (spin-up) sia con il modello CN che con il modello CNDV. In modalità spazialmente distribuita sono stati invece seguiti gli step in Tabella 5.8. Per la lettura e l'elaborazione delle serie storiche delle variabili sono stati realizzati degli *script* in *MatLab*. Di seguito vengono riportati i grafici del ciclo stagionale annuale delle variabili di interesse per entrambi i tipi di configurazione del modello e per tutti i siti scelti per l'analisi.

## 5.6 Analisi

Nel presente paragrafo, vengono mostrate alcune serie di variabili scelte il cui andamento è simulato per l'anno 2003. Per le suddette analisi, è stato utilizzato il Community Land Model in modalità *Single Site* per i siti di Skukuza e Lesotho e in modalità *Spazialmente Distribuita* per lo studio dell'intero Sudafrica.

### 5.6.1 Analisi in modalità *Single Site* per Skukuza

La modalità *Single Site* del CLM permette di effettuare le simulazioni in un punto della Terra, date le sue coordinate di latitudine e di longitudine. Il modello costruisce una griglia centrata nel punto d'interesse alla risoluzione spaziale richiesta nella simulazione. Nello studio la griglia spaziale ha una risoluzione di  $0.9^\circ \times 1.25^\circ$  ed è condivisa sia dalla componente terrestre che da quella atmosferica. Questa risoluzione copre un'area nella realtà di circa 10000 kmq.

Per il sito in analisi sono state valutate due simulazioni:

- simulazione con il modello biogeochimico CN
- simulazione con il modello dinamico di vegetazione globale CNDV

In questo modo si è potuta verificare la diversa risposta del modello nelle due configurazioni con il modello CN e con il modello CNDV, andando a confrontare i risultati delle simulazioni.

L'analisi del suddetto studio si è concentrata nelle seguenti macroaree:

- idrologia (contenuto d'acqua nel suolo, flussi di evaporazione della vegetazione e del terreno, traspirazione della vegetazione);
- quantità di carbonio e di azoto perse nel corso degli incendi;

Al fine di facilitare la visualizzazione dei risultati ottenuti per ogni simulazione sono state riportate delle tabelle riassuntive contenenti i valori annuali delle variabili considerate nella nostra analisi, anche in ottica di un confronto con studi di letteratura. E' opportuno sottolineare che il CLM restituisce in output un numero elevato di variabili (maggiore di trecento). Ad esempio per quanto concerne l'idrologia sono calcolate le portate di ruscellamento superficiale, di infiltrazione nel suolo e di ricarica della falda sotterranea. Naturalmente la scelta delle variabili di interesse ha tenuto conto degli obiettivi che ci si è proposti in questo studio.

---

### ➤ Idrologia

La precipitazione in ingresso al CLM sia per la configurazione con il modello biogeochimico CN sia con il modello dinamico di vegetazione globale CNDV è quella del dataset QIAN riferita all'anno 2003.

Il contenuto volumetrico di acqua nel suolo [ $\text{mm}^3 \text{mm}^{-3}$ ](Figura 5.4) ottenuto in simulazione, non varia notevolmente nel corso dell'anno ed assume un valore medio pari a 11,7%. Il CLM considera per lo strato di terreno 10 livelli idrologicamente attivi più 5 livelli definiti "bedrock". In questi ultimi si è ottenuto ovviamente un valore nullo del contenuto volumetrico di acqua. Per gli altri 10 livelli si è calcolato il contenuto volumetrico d'acqua mensile facendo la media del contenuto volumetrico d'acqua di tutti i livelli. L'andamento stagionale del contenuto volumetrico d'acqua (Figura 5.5) simulato con il modello in modalità CNDV è identico a quello del modello biogeochimico CN con un valore annuale pari a 11,8%.

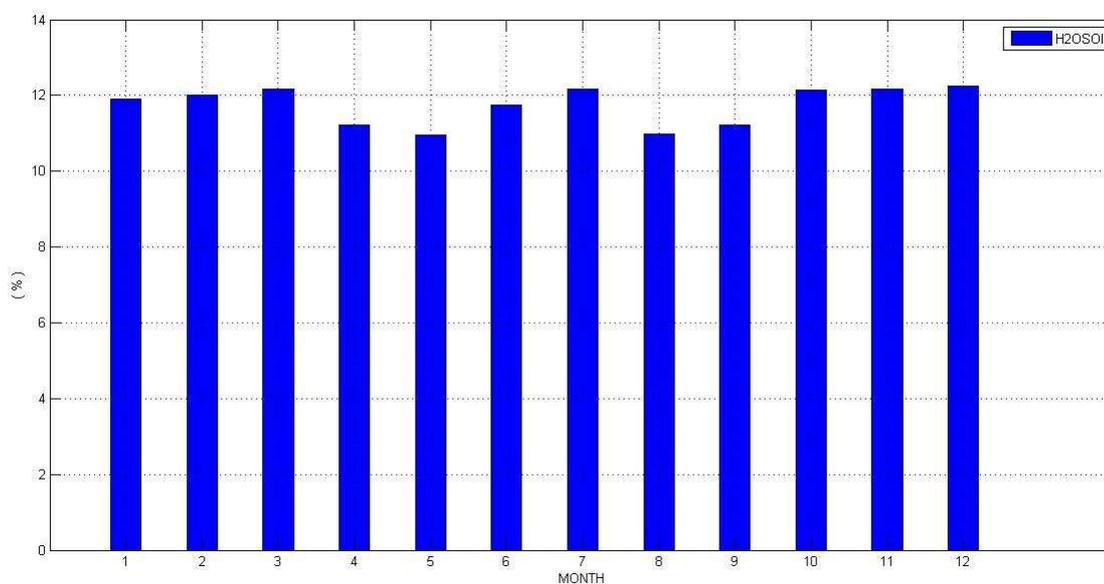


Figura 5.4. Andamento stagionale del contenuto volumetrico d'acqua nel suolo con il modello CN per Skukuza.

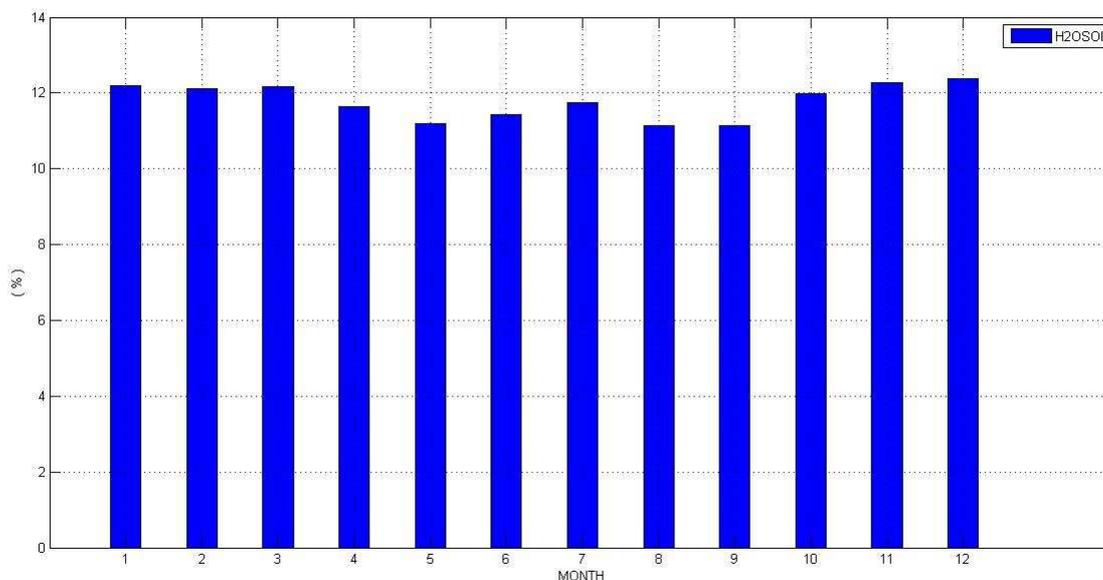


Figura 5.5 Andamento stagionale del contenuto volumetrico d'acqua nel suolo con il modello CNDV per Skukuza.

Per quanto riguarda l'evaporazione (Figura 5.6) si evidenzia come il contributo del terreno sia ampiamente superiore a quello della vegetazione. I valori annuali sono rispettivamente di  $253,7 \text{ mm yr}^{-1}$  e di circa  $30,0 \text{ mm yr}^{-1}$ . La traspirazione della vegetazione è sempre maggiore dell'evaporazione, con un valore annuale pari a  $144,5 \text{ mm yr}^{-1}$ .

E' importante ricordare che è proprio il flusso di traspirazione a fornire l'acqua e i nutrienti alla pianta ed è quindi quest'ultimo ad essere legato alla produzione. Infatti la parte di evaporazione che non attraversa la pianta non è produttiva.

Nella simulazione realizzata con il modello CNDV l'evaporazione dalla vegetazione è più piccola rispetto al contributo di traspirazione (Figura 5.6) con i valori annuali rispettivamente pari a circa  $3,6 \text{ mm yr}^{-1}$  e  $32,0 \text{ mm yr}^{-1}$ . Si nota come anche questi flussi siano sottostimati di un ordine di grandezza se confrontati con i precedenti valori delle simulazioni con il modello biogeochimico. Il contributo di evaporazione del suolo (Figura 5.7) è risultato essere di  $393,5 \text{ mm yr}^{-1}$  più elevato rispetto a quello del modello CN, che è  $253,7 \text{ mm yr}^{-1}$ .

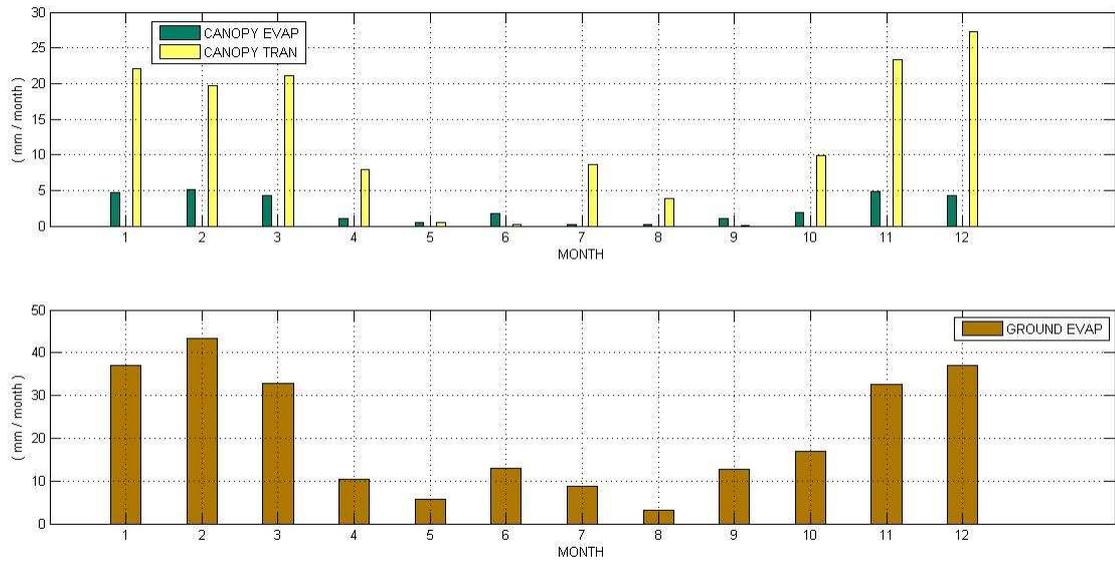


Figura 5.6 Andamento stagionale dell'evaporazione e della traspirazione della chioma e dell'evaporazione del terreno con il modello CN per Skukuza.

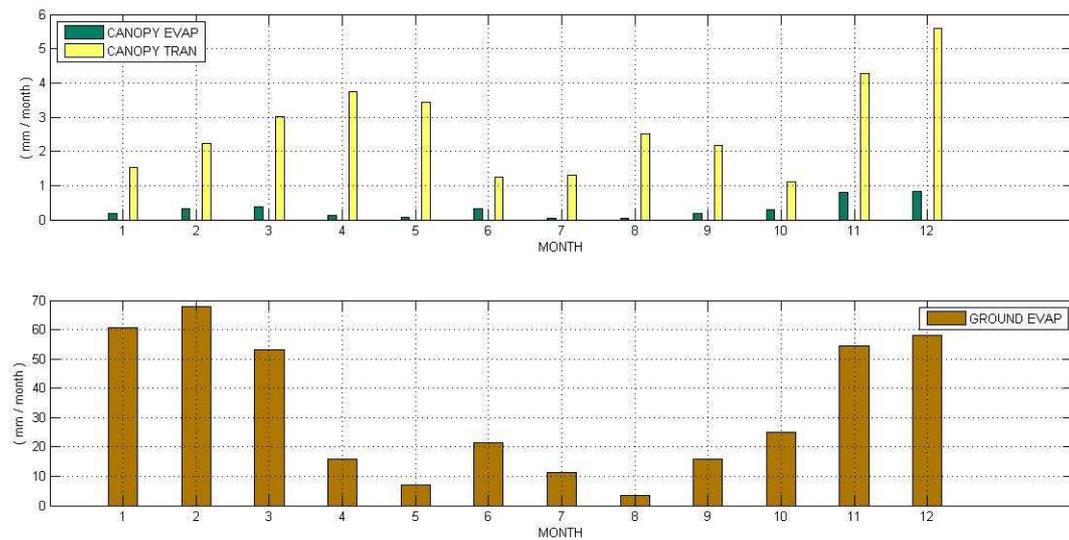


Figura 5.7 Andamento stagionale dell'evaporazione e della traspirazione della chioma e dell'evaporazione del terreno con il modello CNDV per Skukuza.

Nella tabella sottostante (Tabella 5.9) sono riportati i valori delle variabili idrologiche considerate in questo studio per le simulazioni CN e CNDV. Sono indicati i valori annuali del ciclo stagionale. Viene riportato il confronto con lo studio effettuato nella savana al sito di ricerca Nylsvley da (Scholes e Walker, 1999). I risultati ottenuti hanno mostrato un'ottima stima dei valori idrologici simulati dal modello biogeochimico CN. Il modello di dinamica della vegetazione CNDV ha sottostimato invece i flussi relativi alla vegetazione e ha

leggermente sovrastimato il flusso relativo al terreno (cogliendone comunque l'ordine di grandezza).

<b>SKUKUZA</b>	<b>CN</b>	<b>Lieth and Whittaker (1975)</b>	<b>Scholes and Walker (1993)</b>
Precipitazione (mm yr <sup>-1</sup> )	419,6	419,6	585,8
Evaporazione vegetazione (mm yr <sup>-1</sup> )	30,0	3,6	34,6
Evaporazione suolo (mm yr <sup>-1</sup> )	253,7	393,5	275,4
Traspirazione vegetazione (mm yr <sup>-1</sup> )	144,5	32,0	215,3

Tabella 5.9. Valori annuali delle variabili idrologiche ottenuti con il modello CLM per Skukuza. Nell'ultima colonna è indicato il valore di riferimento in letteratura.

Strettamente correlata ai fenomeni idrologici che caratterizzano il sito in analisi è la produttività della vegetazione. Si riportano alcune stime, sintetizzate in Tabella 5.10, ottenute in simulazione. Si sottolinea, inoltre, come il modello CN risponda coerentemente all'input di precipitazione, con i valori di produttività più elevati che si registrano a Gennaio, Febbraio, Marzo, Luglio, Novembre e Dicembre e i valori più bassi a Maggio, Giugno e Settembre. La produttività primaria lorda annuale risulta essere all'incirca  $380,0 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  e la produzione primaria netta circa  $176,1 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ . Il tasso medio mensile della GPP è di  $31,7 \text{ gC m}^{-2} \text{ month}^{-1}$  e quello del NPP è di  $14,7 \text{ gC m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ . Data la stessa forzante di precipitazione del dataset QIAN all'anno 2003, il modello CNDV risponde in maniera diversa rispetto alle simulazioni effettuate con il CN. Si fa notare che l'ordine di grandezza delle variabili GPP, NPP e AR è inferiore di circa un fattore 10 rispetto a quello ottenuto con il CN. Si è passati infatti da una produzione primaria netta annuale con il CN di  $176,1 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  a circa  $29,4 \text{ gC m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  con il CNDV. Il valore massimo di produttività mensile è cambiato da  $32,8 \text{ gC m}^{-2} \text{ month}^{-1}$  del CN a circa  $4,0 \text{ gC m}^{-2} \text{ month}^{-1}$  con il CNDV ed il tasso mensile di produttività è diminuito a  $2,5 \text{ gC m}^{-2} \text{ month}^{-1}$  contro i precedenti  $14,7 \text{ gC m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ .

SKUKUZA	CN	CNDV	Lieth and Whittaker (1975)	Scholes and Walker (1993)
Produzione primaria netta NPP ( $gC\ m^{-2}\ yr^{-1}$ )	176,1	29,4	100-600	381
Indice di area fogliare LAI ( $m^2\ leaf\ area\ m^{-2}\ ground\ area$ )	0,5	0,08	4-12	-

Tabella 5.10 Valori annuali delle variabili relative alla produttività ottenuti con il modello CLM per la simulazione effettuata a Skukuza. Nelle ultime due colonne sono riportati i valori di riferimento in letteratura.

Si nota come il modello CN colga il range di produttività e sottostima invece il LAI. Il modello CNDV ha invece ampiamente sottostimato di due ordini di grandezza sia la produttività sia l'indice di area fogliare. Occorre comunque notare che il valore di precipitazione considerato a Nylsvley è superiore a quello di Skukuza. Questo giustifica la produttività più bassa registrata a Skukuza.

### ➤ Incendi

Si sono riportate infine le quantità di carbonio e di azoto perse nel corso degli incendi (Figura 5.8). Per il sito di Skukuza il modello CLM ha evidenziato degli incendi nei mesi di Agosto, Settembre e Ottobre, nel corso quindi della stagione umida calda. Per il carbonio si è registrato un valore di circa  $0,1\ gC\ m^{-2}\ yr^{-1}$  e per l'azoto un valore di circa  $0,04\ gN\ m^{-2}\ yr^{-1}$  al livello dei PFT.

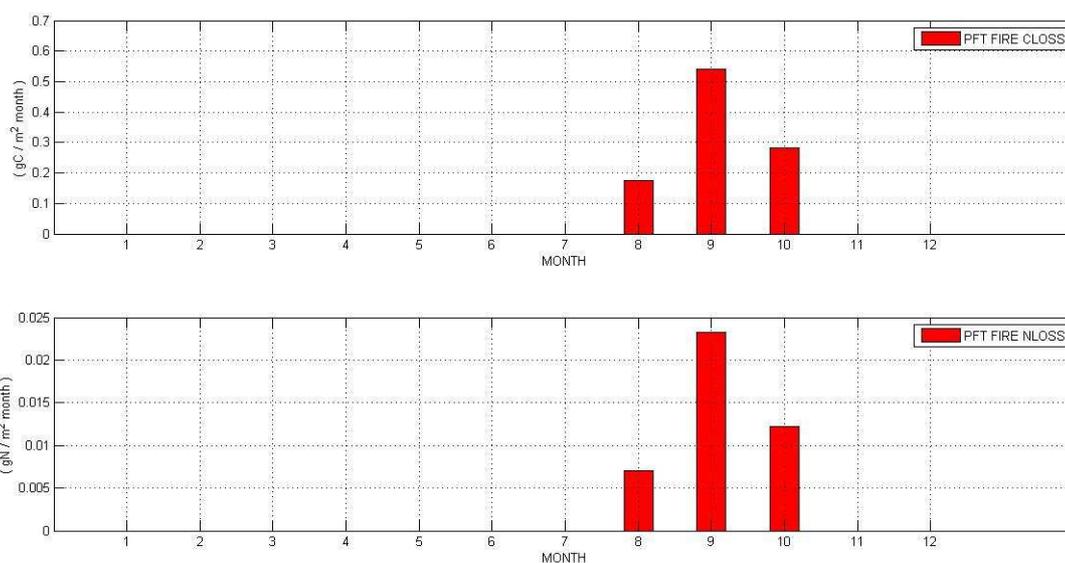


Figura 5.8 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto persi negli incendi al livello dei PFT con il modello CN per Skukuza.

## 5.6.2 Analisi in modalità *Single Site* per Lesotho

Analogamente a quanto fatto per Skukuza, per il sito Lesotho sono state valutate due simulazioni:

- simulazione con il modello biogeochimico CN
- simulazione con il modello dinamico di vegetazione globale CNDV

L'analisi del suddetto studio si è concentrata nelle seguenti macroaree:

- idrologia (contenuto d'acqua nel suolo, flussi di evaporazione della vegetazione e del terreno, traspirazione della vegetazione);
- quantità di carbonio e di azoto perse nel corso degli incendi;

La precipitazione per le simulazioni nell'area del Lesotho è ancora quella dell'anno 2003 del dataset QIAN.

### ➤ **Idrologia**

Il valore annuale del contenuto volumetrico d'acqua nel suolo è di circa il 10,7% per entrambe le configurazioni (CN e CNDV). L'andamento stagionale è pressoché identico (Figura 5.9 e Figura 5.10). I flussi di traspirazione (Figura 5.11 e Figura 5.12) sia nel CN che CNDV sono superiori a quelli di evaporazione della chioma. Il contributo di evaporazione del suolo (Figura 5.11 e Figura 5.12) è sempre maggiore dei flussi relativi alla vegetazione.

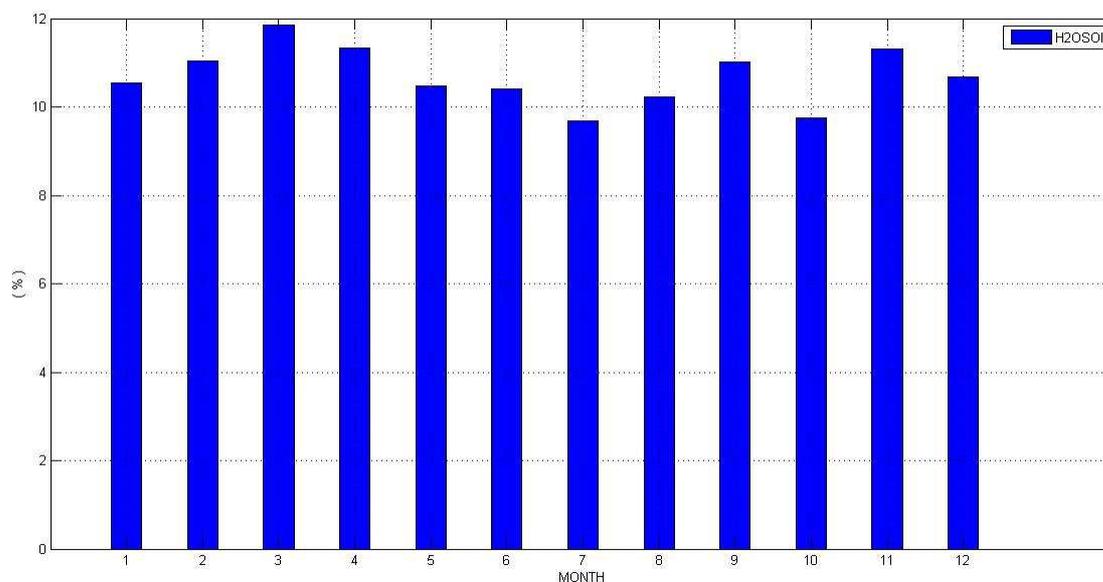


Figura 5.9. Andamento stagionale del contenuto volumetrico d'acqua nel suolo con il modello CN per Lesotho.

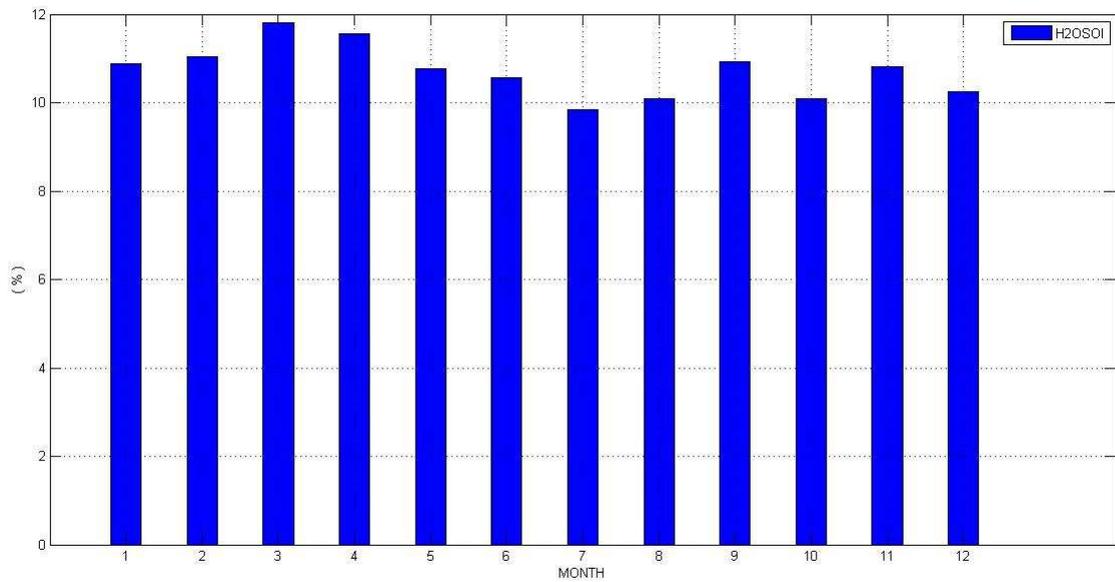


Figura 5.10. Andamento stagionale del contenuto volumetrico d'acqua nel suolo con il modello CNDV per Lesotho .

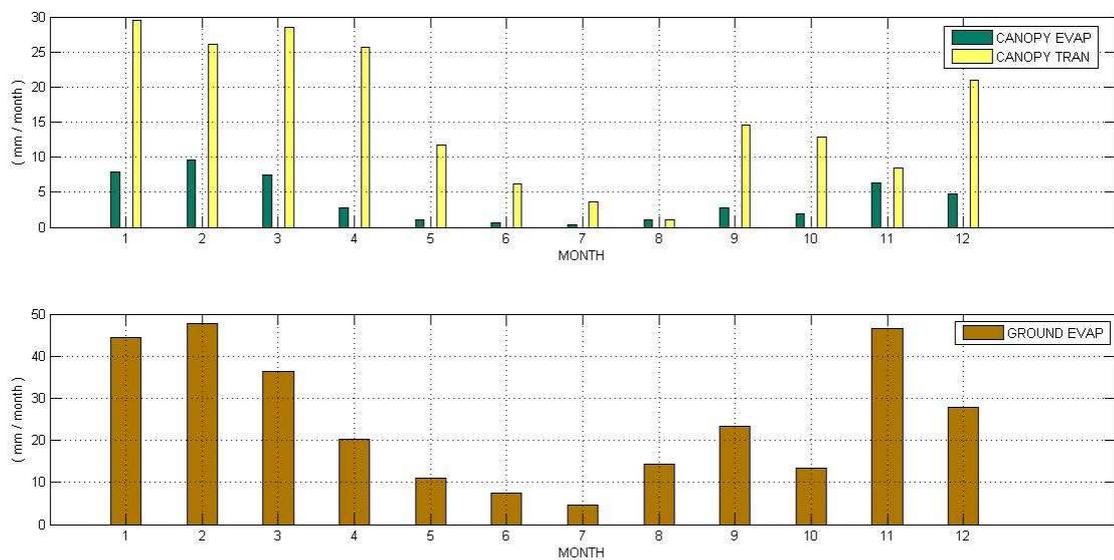


Figura 5.11 Andamento stagionale dell'evaporazione e della traspirazione della chioma e dell'evaporazione del terreno con il modello CN per Lesotho.

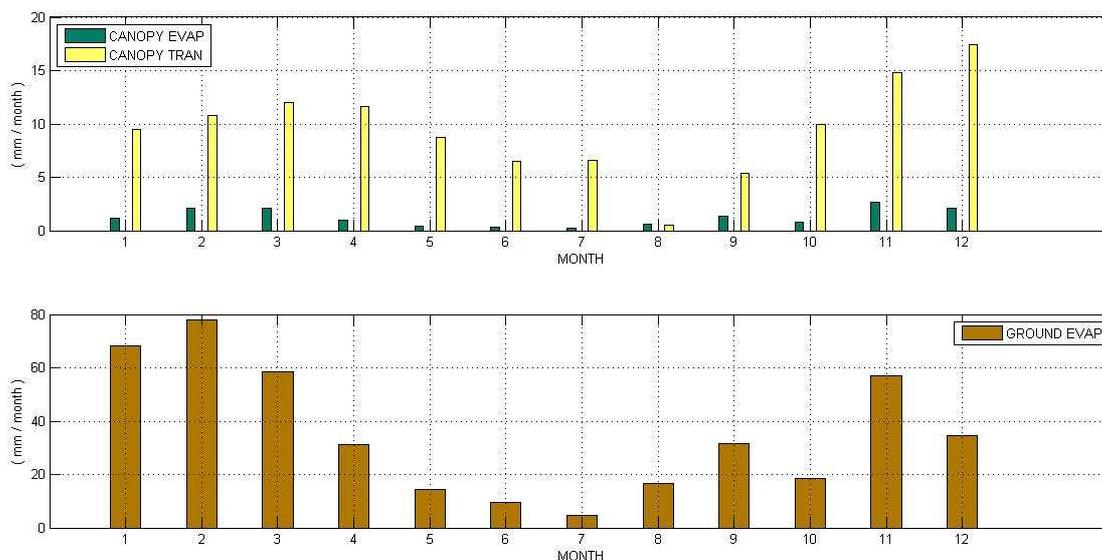


Figura 5.12 Andamento stagionale dell'evaporazione e della traspirazione della chioma e dell'evaporazione del terreno con il modello CNDV per Lesotho.

Si riassumono ora i valori ottenuti in simulazione e li si confrontano con i dati in letteratura in Tabella 5.11

LESOTHO	CN	CNDV
Precipitazione (mm yr <sup>-1</sup> )	535,44	535,44
Evaporazione vegetazione (mm yr <sup>-1</sup> )	46,0	14,7
Evaporazione suolo (mm yr <sup>-1</sup> )	297,0	422,6
Traspirazione vegetazione (mm yr <sup>-1</sup> )	189,0	113,7

Tabella 5.11 Valori annuali delle variabili idrologiche ottenuti con il modello CLM per la simulazione effettuata a Lesotho

Per questa simulazione gli ordini di grandezza delle variabili idrologiche sono gli stessi sia con il modello CN che con il modello CNDV. I valori simulati con il modello biogeochimico per la vegetazione sono risultati superiori rispetto al modello dinamico di vegetazione. Si è invece registrato un valore più elevato con il CNDV per quanto riguarda il suolo.

Come per Skukuza si riporta in Tabella 5.12 i valori relativi alle variabili di produttività della vegetazione strettamente correlate al ciclo idrologico.

Tabella 5.12 Valori annuali delle variabili relative alla produttività ottenuti con il modello CLM per la simulazione effettuata a Lesotho. Nell' ultima colonna sono riportati i valori di riferimento in letteratura.

LESOTHO	CN	CNDV	Scholes and Walker (1999)
Produzione primaria netta NPP ( $gC\ m^{-2}\ yr^{-1}$ )	120,0	54,9	80-800
Indice di area fogliare LAI ( $m^2\ leaf\ area\ m^{-2}\ ground\ area$ )	0,8	0,4	1-5

Il modello CN coglie il range di produttività osservato e l'indice di area fogliare. Il modello CNDV non centra il range di produttività ma stima invece correttamente il suo ordine di grandezza. Il LAI simulato è sottostimato.

### ➤ Incendi

Si riportano infine alcuni valori relativi alla presenza di incendi in Lesotho.

Con il modello CN si è prevista una perdita di carbonio e di azoto dovuta agli incendi pari a  $18,6\ gC\ m^{-2}\ yr^{-1}$  e a  $0,5\ gN\ m^{-2}\ yr^{-1}$  rispettivamente. I tassi mensili più alti si sono registrati nei mesi di Luglio, Ottobre e Dicembre (Figura 5.13).

Nelle simulazioni CNDV invece non si è riscontrata la presenza di incendi sistematici.

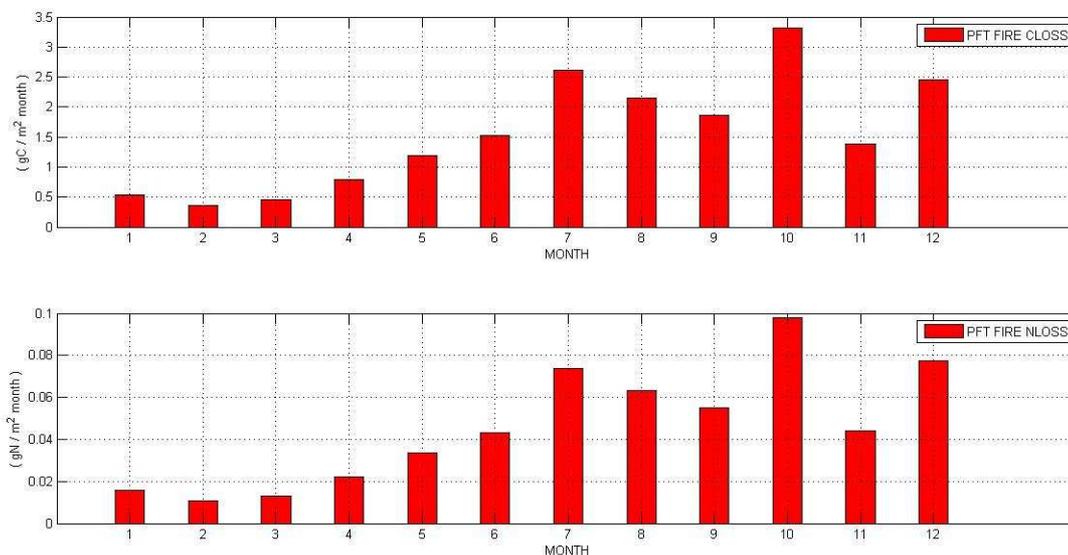


Figura 5.13 Andamento stagionale del carbonio e dell'azoto persi negli incendi al livello dei PFT con il modello CN per Lesotho.

Come si può evincere dalla figura, il Sito di Lesotho è sicuramente più suscettibile ad incendi rispetto a Skukuza e questo lo rende un ecosistema *fire dependent*. La dinamica della vegetazione sarà, come si analizzerà nel Capitoli 7 e 8, strettamente correlata alla presenza di biomassa secca che consente agli incendi di propagarsi più facilmente.

### 5.6.3 Analisi in modalità *Spazialmente Distribuita* per il Sudafrica

La modalità *spazialmente distribuita* del CLM permette di effettuare le simulazioni in un'area più o meno vasta della globo, una volta stabilite le coordinate di latitudine e di longitudine degli estremi perimetrali che ne confinano l'estensione. L'area d'interesse deve essere suddivisa in un numero discreto di celle (nel caso di studio 5 celle) in modo tale che il modello possa costruire una griglia centrata nei punti baricentrici di ognuna di esse alla risoluzione spaziale richiesta nella simulazione. Nello studio, la griglia spaziale ha una risoluzione di  $0.9^\circ \times 1.25^\circ$  ed è condivisa sia dalla componente terrestre che da quella atmosferica. Questa risoluzione copre un'area nella realtà di circa 10000 kmq.

Per la modalità *spazialmente distribuita* è inoltre necessario utilizzare in cascata le opzioni "mkgriddata", per consentire al modello di costruire un'orografia standard per ciascuna cella della griglia, "mkdatadomain", per attivare una maschera di una determinata risoluzione per componente terrestre e atmosferica, infine "mksurfddata" per personalizzare la superficie di studio.

Per il Sudafrica è stata eseguita la simulazione con il modello biogeochimico CN, dopo aver eseguito la lunga procedura di spinup suddivisa in 3 fasi di, rispettivamente, 600 anni, 1 anno ed infine 50 anni.

L'analisi del suddetto studio si è concentrata nelle seguenti macroaree:

- idrologia (in particolare l'andamento dell'umidità del suolo);
- produttività della vegetazione (in particolare la produzione primaria netta);
- copertura dei tipi funzionali di piante;

Nel proseguo si riportano le mappe ottenute, avendo come ingresso al modello la precipitazione dell'anno 2003 del dataset QIAN.

#### ➤ **Idrologia**

Per quanto riguarda la componente idrologica, come è possibile notare dalla Figura 5.14 la cella più a sud-est, la cui area è evidenziata dalla presenza dell'istogramma, presenta un contenuto idrico del suolo più elevato rispetto alle celle posizionate a nord est. Questo permette di tracciare un gradiente di precipitazione che cresce passando da nord-ovest a sud-est.

Diverse per ogni cella sono anche i valori di umidità del suolo propri di ogni stagione: per quanto riguarda la macroarea di nostro interesse (istogramma posto nella terza riga e seconda colonna) l'umidità del suolo presenta valori più bassi nella stagione estiva (da

Giugno ad Agosto) e i valori più elevati nella stagione invernale (da Dicembre a Febbraio). Ciò è coerente con l'andamento fortemente stagionale rilevato sia in Skukuza sia per Lesotho.

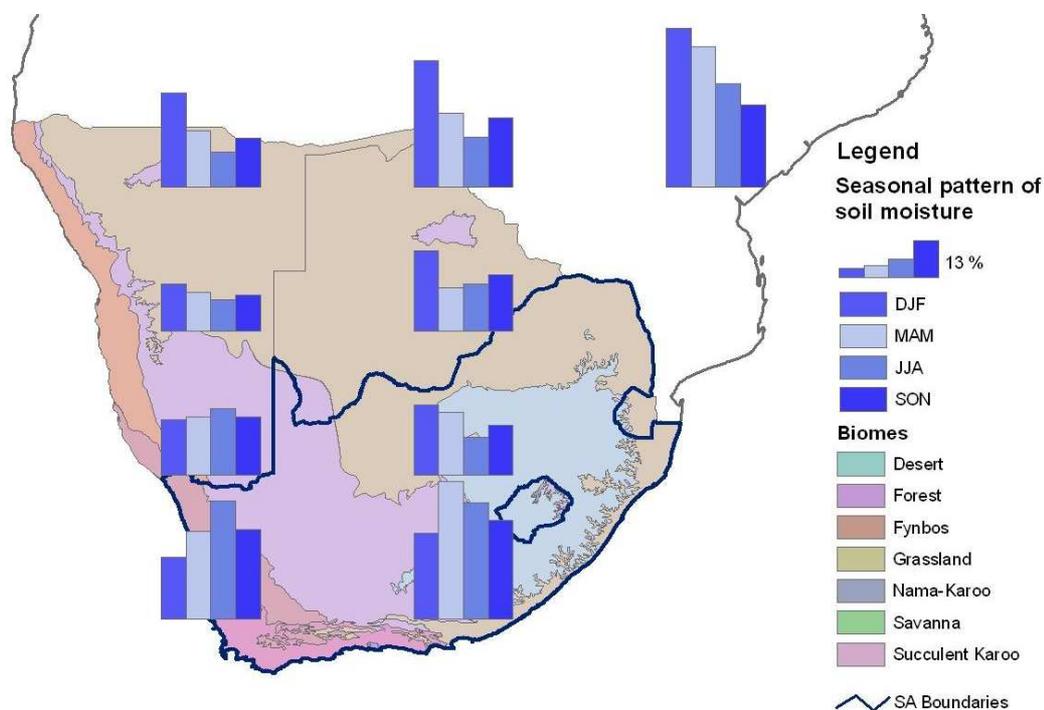


Figura 5.14. Andamento stagionale di umidità del suolo in condizioni di stato stazionario dopo lo spinup del modello per il Sudafrica.

### ➤ **Produttività della vegetazione**

Correlata all'andamento dell'umidità del suolo è la produttività della vegetazione identificata in questa analisi con la produttività netta primaria, è riportata in Figura 5.15 e Figura 5.16. Come si evince dalle Figure riportate, nella macroarea di studio, la produttività è più elevata nella stagione invernale e primaverile, mentre la produttività della vegetazione è pressoché nulla nelle aree desertiche poste ad est del Sudafrica. Anche questi dati sono coerenti con i dati di precipitazione in ingresso al modello.

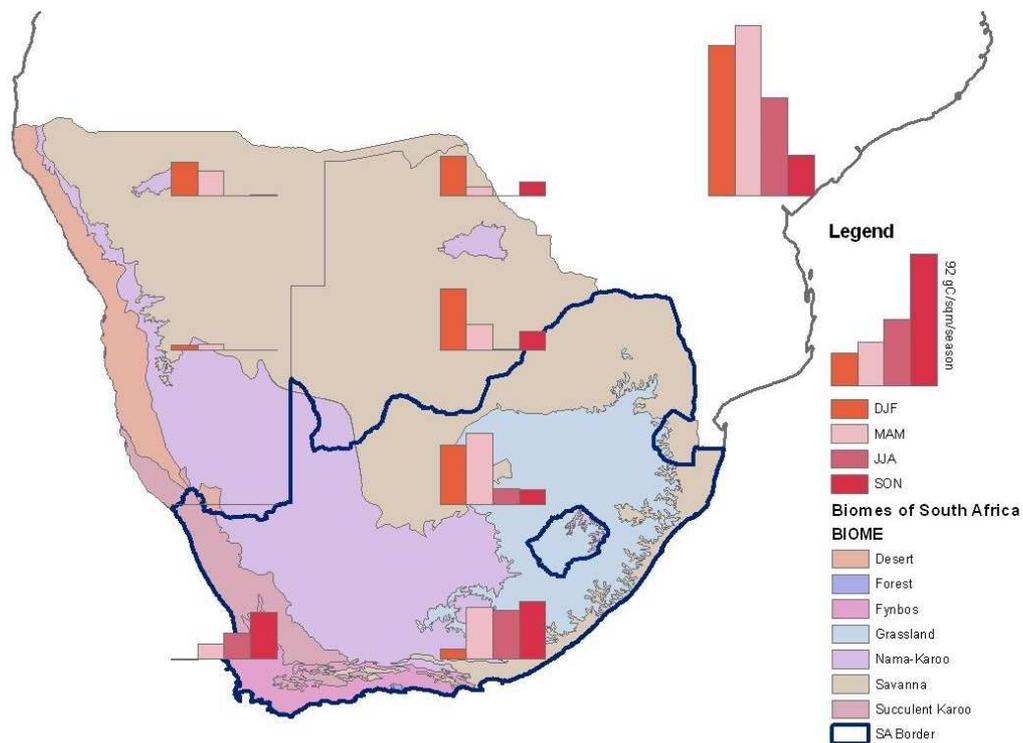


Figura 5.15 Andamento stagionale della produzione primaria netta della vegetazione in condizioni di stato stazionario dopo lo spinup del modello per il Sudafrica.

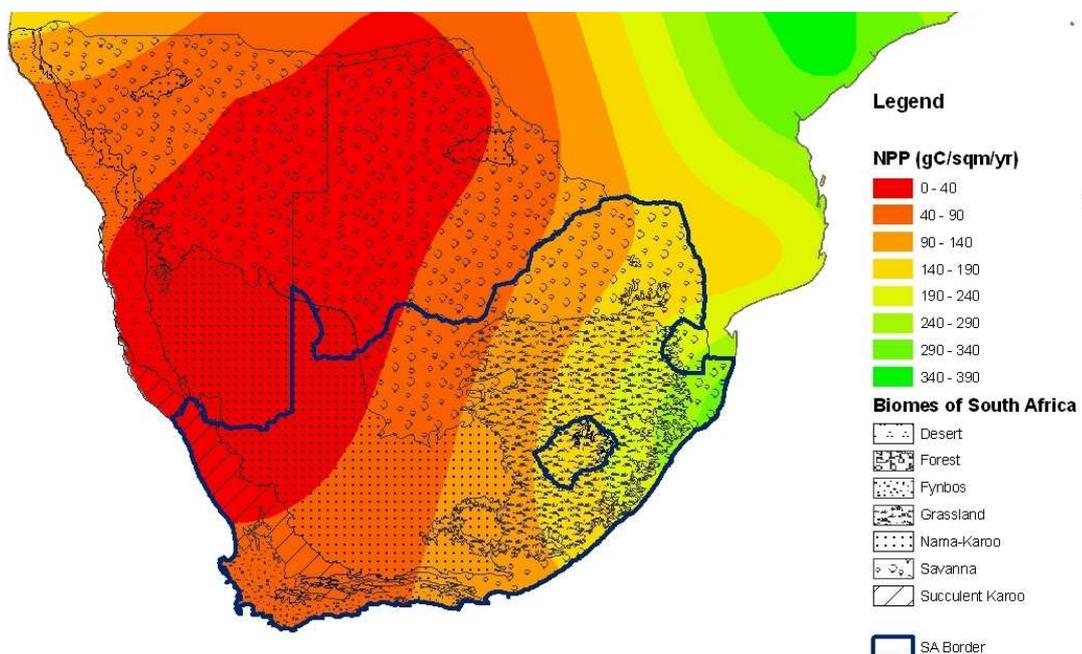


Figura 5.16 Media dei valori di produzione primaria netta della vegetazione in condizioni di stato stazionario dopo lo spinup del modello per il Sudafrica.

➤ **copertura dei tipi funzionali di piante**

Infine si riporta in Figura 5.17 la mappa relativa alla copertura di ciascun tipo funzionale di pianta su ciascuna macroarea.

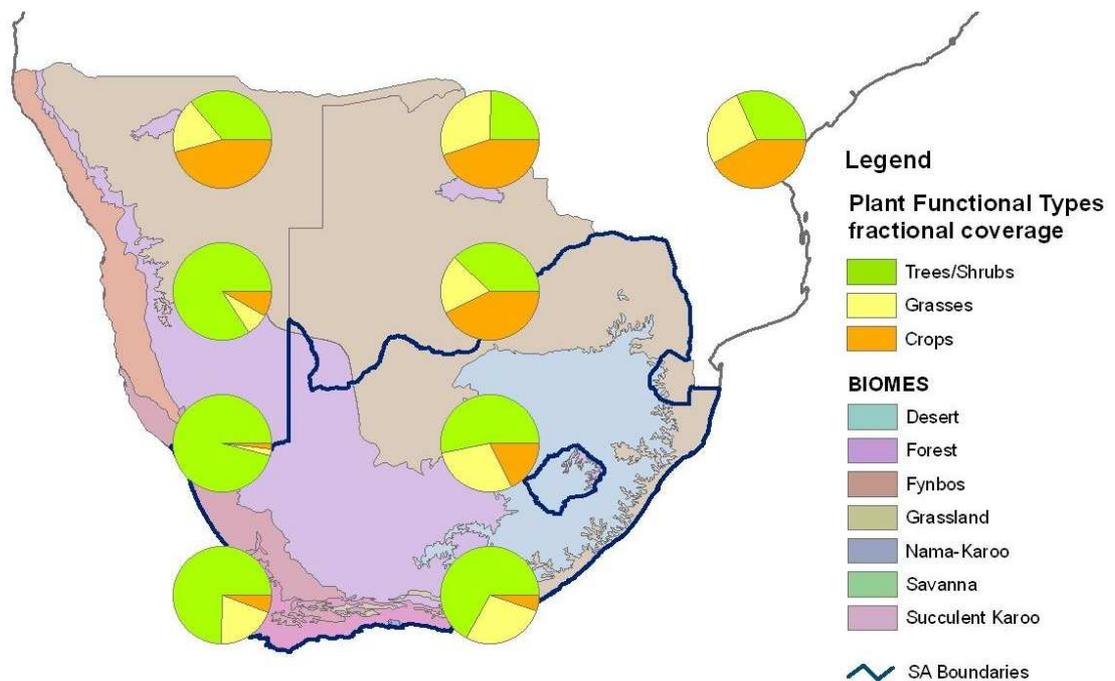


Figura 5.17 Distribuzione dei PFT a seguito dello spinup del modello per il Sudafrica

In Figura i PFT sono stati divisi in tre gruppi: Alberi, Erba, Coltivazioni. In generale si nota che tutto il Sudafrica orientale è caratterizzato da coesistenza di una copertura erbosa e arborea: il perché di questo fenomeno verrà analizzato nei capitoli successivi nei quali verranno introdotte le influenze di erbivori e incendi sugli ecosistemi. La loro azione congiunta, infatti, impedisce agli alberi di crescere tanto da generare la chiusura della volta dovuta alle fitte chiome, permettendo così la coesistenza tra i due tipi funzionali.

## 5.7 Pregi e difetti del modello spazialmente distribuito CLM

Il modello CLM, utilizzato per le suddette analisi preliminari dei siti di studio, è stato utilizzato per ottenere valori di alcune delle variabili più importanti per la dinamica degli ecosistemi; purtroppo, però, l'implementazione molto complessa del suddetto modello e i

costi computazionali elevati in termini di tempo, non vengono compensati da un'elevata accuratezza dei valori ottenuti in simulazione, che, per quanto possano essere attendibili nell'ordine di grandezza, non offrono garanzia di certezza.

Se, infatti, si è potuto confermare un buon accordo con la realtà, almeno sul piano qualitativo, per quanto riguarda il modello biogeochimico, il modello di dinamica della vegetazione presenta risultati meno convincenti, suggerendo alcune criticità nel suo utilizzo in simulazioni rappresentanti scenari di cambiamento climatico. A questo proposito è opportuno citare il lavoro di [Scheiter e Higgins , 2009] sull'incapacità dei principali modelli di vegetazione di riprodurre le condizioni peculiari degli ecosistemi tropicali e subtropicali.

Per questo motivo si è deciso di non approcciare la previsione di scenario con questo tipo di modello.

Nei prossimi capitoli dunque verrà proposta una visione modellistica totalmente opposta: si utilizzeranno modelli minimali per simulare l'andamento di copertura di vegetazione nei 101 di scenario, che sebbene siano semplici nella formulazione matematica, riescono a cogliere la dinamica generale delle variabili in analisi.

---

## CAPITOLO 6

# MODELLI DI DINAMICA DELLA VEGETAZIONE NELLE SAVANE

Esistono diversi modelli di dinamica della vegetazione che hanno la finalità di spiegare la coesistenza di alberi ed erba all'interno di un ecosistema. La coesistenza tra i due tipi di vegetazione può essere studiata attraverso un modelli *di equilibrio*, di *non equilibrio* o di *disequilibrio* (Scholes e Archer, 1997). I primi ipotizzano che la coesistenza tra alberi ed erba all'interno della savana sia a lungo termine stabile; i secondi assumono che esista un equilibrio stabile tra i due tipi di vegetazione ma che esso venga continuamente perturbato da disturbi (quali fuoco ed erbivori); i terzi, infine, assumono che esista un equilibrio stabile di coesistenza tra alberi ed erba, nel mezzo tra i biomi foresta e prateria, e che i disturbi ne impediscano il raggiungimento. Due sono i paradigmi all'interno del quale possono essere inquadrati i modelli di vegetazione per il bioma savana: i modelli di *equilibrio* appartengono al *paradigma di stabilità*, i modelli di *disequilibrio* al *paradigma di instabilità* ed infine tra i due paradigmi si inseriscono i modelli di *non equilibrio*.

Esistono, poi, dei modelli complessi e spazialmente distribuiti, quale ad esempio il CLM in modalità CNDV, descritto nel capitolo 5, che riescono a simulare l'andamento biogeografico dei diversi tipi funzionali di piante implementando processi annuali di competizione per la luce e lo stabilimento e la sopravvivenza per quanto riguarda la copertura dei PFT (detta *FPC*) e la popolazione (*P*).

Infine sono presenti in letteratura modelli spazialmente espliciti: sono modelli definiti su un dominio discretizzato in cui si rappresentano numericamente fenomeni ecologici. Nel presente capitolo verranno analizzati i modelli di *equilibrio*, quali i modelli basati sulla competizione, e i modelli di *disequilibrio* e *non equilibrio*, quali i modelli demografici a collo di bottiglia.

## 6.1 Modelli basati sulla competizione

I modelli basati sulla competizione sono modelli di *equilibrio* nei quali l'acqua e i nutrienti sono considerati fattori primari di influenza mentre il fuoco e gli erbivori dei "disturbi". La coesistenza tra due specie in competizione è possibile quando la competizione viene in qualche modo evitata oppure quand'è bilanciata: nel primo modo è necessaria una separazione di nicchia spaziale (diversa profondità a cui le radici di alberi ed erba prelevano acqua) o temporale (diversi tempi di crescita fogliare); nel secondo modo la coesistenza è possibile se il competitore superiore raggiunge una densità tale che lui stesso è limitato, e quindi, permette l'esistenza del competitore inferiore. Secondo Sankaran et al. (2004) i modelli basati sulla competizione sono di quattro tipi: i modelli riguardanti la separazione di nicchia delle radici, quelli circa la separazione di nicchia fenologica, i modelli di competizione bilanciata e i modelli idrologicamente forzati da competizione e colonizzazione. Infine ci sono modelli esplicitamente spaziali che tengono in conto il parametro spazio come un indice chiave per la coesistenza.

### 6.1.1 Modelli di separazione di nicchia delle radici

Walter (1971) dà un'interpretazione della coesistenza tra alberi ed erba; se ci si sposta da un clima secco ad uno umido, le prime forme di vita che possono crescere sono costituite dall'erba. La loro crescita veloce e il loro alto tasso di traspirazione porta ad uno sfruttamento efficiente dell'acqua nella parte più superficiale del suolo. Dunque, per piogge con media annuale bassa, l'acqua nel suolo è assorbita dall'erba; le piante, la crescita delle quali è più lenta, non riescono a crescere. Gli alberi che crescono quando la media annuale di pioggia è alta abbastanza da permettere la presenza di una frazione di acqua nello strato di terreno che non viene utilizzata dall'erba. Questa frazione di contenuto d'acqua nel suolo si infiltra negli strati più profondi e non è più accessibile da parte dell'erba ma solo dal sistema radicale degli alberi che arriva più in profondità. Questa descrizione implica due assunzioni principali: che l'umidità del suolo sia una risorsa limitante per gli ecosistemi e che c'è una separazione di nicchia in profondità alle quali gli alberi e l'erba affondano il proprio sistema radicale per assorbire acqua. Così, l'erba diventa il competitore superiore per l'acqua nella parte più superficiale del terreno mentre gli alberi hanno accesso solo all'acqua presente nella parte più profonda del suolo. Seguendo questa idea, i siti che hanno capacità di ritenzione d'acqua bassa (ad esempio le sabbie) e caratterizzati da condizioni climatiche più umide potranno avvantaggiare la presenza degli alberi: infatti tali condizioni portano alla percolazione dell'acqua nelle zone più profonde del terreno (Scholes e Archer, 1997). Il ruolo dell'umidità del suolo come risorsa limitante e la separazione degli apparati radicali vanno sotto il

---

termine di “Walter hypothesis”. Walker e Noy-Meir (1982) dimostrarono matematicamente la possibilità di un equilibrio di coesistenza con il modello basato sulla “Walter Hypothesis”. Con tali modelli è possibile predire un certo rapporto tra l’abbondanza di questi due competitori partendo dal profilo di distribuzione del suolo, nonostante i disturbi come gli incendi e gli erbivori possano causare deviazioni da questo rapporto. Tuttavia questo tipo di modelli non è in grado di spiegare la grande variazione del rapporto alberi-erba entro una singola combinazione clima-suolo (Scholes e Archer, 1997).

In molti campi di osservazione, più che una separazione, si è osservata una sovrapposizione dei profili radicali. Secondo Sankaran et al. (2004) una significativa partizione tra alberi e erba è probabilmente prevalente in certi casi sotto condizioni ambientali ben precise. Inoltre, assumendo la separazione del sistema radicale, ci si focalizza solamente sugli alberi adulti trascurando il passaggio in cui gli alberi sono ancora piccoli e quindi hanno l’apparato radicale simile a quello dell’erba.

### **6.1.2 Modelli di separazione di nicchia fenologica**

La netta stagionalità che caratterizza i climi tropicali e subtropicali ha suggerito ad alcuni ecologi che tale andamento si dovesse rispecchiare in qualche modo due differenti periodi di crescita dei competitori. Si può osservare questa separazione di nicchia temporale in vari elementi (Trapnell, 1959): ad esempio nella savana gli alberi sono capaci di stoccare acqua e nutrienti e dunque raggiungere una piena espansione fogliare appena prima, o entro poche settimane seguenti, dell’inizio del periodo umido (Scholes e Archer, 1997). Questo implica che gli alberi hanno un accesso esclusivo alle risorse all’inizio o alla fine della stagione di crescita (Sankaran et al., 1994), e dall’altra parte, l’erba è il competitore superiore durante il periodo della crescita in comune con gli alberi. Tale separazione di nicchia porta ad un rapporto alberi-erba contingente che è fortemente dipendente dalla lunghezza della stagione di crescita che può essere fortemente variabile in diversi anni. Un modello con separazione temporale di nicchia fu proposto da Westoby (1979). Secondo Scholes e Archer (1997), la separazione di nicchia per la fenologia stessa è supportata da molte osservazioni sperimentali, tuttavia sono presenti anche eccezioni locali e temporali.

### **6.1.3 Modelli di competizione bilanciata**

I modelli di competizione bilanciata sono dei modelli di equilibrio che non presuppongono la presenza di una separazione di nicchia. Perciò, con questi modelli, la competizione è presa in considerazione esplicitamente. Si può intuire da diversi indizi che gli alberi sono i competitori superiori. Il primo passo fondamentale nella vita di un albero è costituito dal radicamento nello strato di terreno appartenente all’erba. In questo passo, l’erba ha un’

influenza negativa sulle giovani piantine competendo con loro per luce, acqua, nutrienti e costituendo un potenziale biomassa-combustibile adatto a innescare incendi che mettono a rischio la crescita degli alberi. Tuttavia, anche se con iniziali difficoltà, quando un albero tenta di insediarsi nello strato “di proprietà” dell’erba, riesce a prenderne il posto. Gli alberi hanno un’ influenza negativa sullo strato di erba. Secondo Walter (1971) quando gli alberi raggiungono una certa densità, lo strato d’erba diventa più debole. Gli alberi hanno un effetto negativo sullo strato d’erba intercettando pioggia, facendo ombra, accumulando lettiera e competendo con le sue radici. Molti studi empirici, infatti, hanno provato che rimuovendo gli alberi, la produzione d’erba cresce (Scholes e Archer, 1997). Ciò avviene perché in assenza di alberi, l’erba ha più spazio per espandere e più risorse da sfruttare. Queste osservazioni indicano che gli alberi possono essere considerati competitori superiori per lo spazio, soprattutto nell’ecosistema della savana.

Così, può essere ammessa la convivenza alberi-erba quando gli alberi diventano limitanti per se stessi a tal punto che permettono che l’erba rimanga nello spazio libero. Tilman (1994) chiama questo tipo di coesistenza “ipotesi di competizione spaziale”. In un habitat strutturato spazialmente, l’interazione con l’ambiente circostante accresce la competizione intra-specifica rispetto a quella inter-specifica. In questo modo è consentita una stabile coesistenza. La crescita degli alberi può essere limitata dalla disponibilità dell’acqua o, quando l’acqua non è un fattore limitante, dalla competizione intra-specifica per la luce o per le risorse.

Anche con questo tipo di modelli sono trascurati i vari stadi di vita degli alberi. Infatti, si è assunto che il bilancio competitivo tra erba e alberi rimane uguale durante tutta la vita e durante tutti gli stadi di vita degli alberi. Questo è molto improbabile nella realtà. E’ provato infatti che l’erba può avere un effetto negativo sul radicamento delle piante giovani, a causa della competizione per le risorse e indirettamente per il suo effetto sul regime degli incendi.

### **6.1.4 Modelli di competizione e colonizzazione forzati idrologicamente**

Il modello di Tilman (1994) è stato ampiamente utilizzato e studiato in ecologia: è uno strumento utile per capire la competizione e la biodiversità in habitat spazialmente strutturati. Esso è basato sulla dinamica delle aree. L’abbondanza di una specie non è interpretata come biomassa ma come frazione di area colonizzate da tale specie. I parametri del modello sono i tassi di colonizzazione che rappresentano l’abilità nel colonizzare nuove aree da parte della specie, e i tassi di mortalità che sono i tassi con i quali le specie muoiono lasciando le aree libere. Questo modello ammette la coesistenza a causa del principio illustrato nel punto precedente: il competitore inferiore può coesistere con quello superiore

---

perché il secondo diventa auto limitante in corrispondenza di sufficiente biomassa permettendo così l'invasione del competitore inferiore. Fernandez-Illescas e Rodriguez-Iturbe (2004) modificarono il modello aggiungendo una forzante idrologica. Poiché la germinazione dei semi si è mostrata positivamente influenzata dalla pioggia, in tale modello i tassi di colonizzazione di alberi e erba, che sono rispettivamente il competitore superiore ed inferiore, sono funzioni crescenti dell'umidità del suolo. Questo modello è un modello di *non equilibrio* poiché il bilancio tra alberi ed erba segue le dinamiche di fluttuazione delle condizioni climatiche.

### **6.1.5 Modelli esplicitamente spaziali**

Il punto chiave dei modelli spaziali espliciti è l'interazione tra organismi coesistenti non sono spazialmente omogenei. Questo tipo di modelli considerano strutture laterali di organismi mentre gli altri considerano solo gli alberi o solo l'erba come classi astratte che hanno una struttura verticale, per esempio l'apparato radicale e la chioma (Scholes e Archer, 1997). In Sanclan (1992) un modello spazialmente esplicito è proposto nel modo seguente : un albero ha un effetto circolare nello spazio attorno ad esso corrispondentemente all'estensione del proprio sistema radicale. In questo cerchio di influenza la produzione di erba è diminuita. Un secondo albero può avere un'influenza addizionale secondo il principio della sovrapposizione degli effetti. I risultati del modello sono in accordo con le osservazioni di campo secondo le quali la produzione di erba decresce quando la densità degli alberi cresce.

## **6.2 Modelli demografici**

In questo tipo di modelli la vita degli alberi è presa in considerazione in modo esplicito: l'impatto dei disturbi hanno un effetto diverso a seconda dello stadio di vita degli alberi.

I modelli di questa categoria sono modelli di non equilibrio e di disequilibrio. Dunque, gli alberi non possono mai raggiungere la dominanza assoluta perché esistono dei colli di bottiglia dovuti ai disturbi che impediscono la transizione da certi stadi di vita ad altri. In questi modelli, in contrasto con i modelli basati sulla competizione, l'attenzione è focalizzata sulla demografia piuttosto che sui meccanismi di fisiologia. Secondo Higgins et al. (2000) gli alberi sono limitati dall'aridità allo stadio giovanile e dagli incendi allo stadio più adulto. In siti aridi, il regime pluviometrico è caratterizzato da dinamiche di impulso e il tempo di attesa tra gli eventi a impulso è stocastico. Questo implica che l'accumulo delle piantine giovani è anch'esso un impulso nel tempo. La crescita verso la maturità può essere raggiunta negli anni di particolare abbondanza di pioggia. Nei siti umidi, viceversa, dove l'assenza

d'acqua non costituisce un collo di bottiglia allo stadio giovanile degli alberi, la frequenza degli incendi e la loro intensità limitano la crescita degli alberi verso lo stadio adulto, perché durante lo stadio giovanile essi sono interamente investiti dalle fiamme. Un altro collo di bottiglia per la crescita degli alberi è costituito dalla presenza degli erbivori. D'altra parte, quando il regime di precipitazione è basso, devono esistere dei meccanismi che consentono la radicazione delle piantine giovani prevenendo l'estinzione delle specie arboree. Quindi per esempio la savana esiste a causa di fattori che favoriscono il radicamento degli alberi nella parte bassa del gradiente di pioggia e prevengono la chiusura della volta dovuta alle chiome nella parte alta del gradiente (Sankaran et al., 2004).

### **6.2.1 Meccanismi ecologici buffer**

Nel lavoro di Jeltsch et al. (2000) per la prima volta vengono introdotti i meccanismi "cuscinetto" per indicare, in conformità con l'approccio del disequilibrio, che gli stadi di equilibrio sono costituiti dalla dominanza totale degli alberi (ad esempio bosco e foresta) o totale dominanza dell'erba (ad esempio le praterie).

In questi meccanismi ha grande importanza l'incendio perché è il fattore principale che riduce la densità delle specie arboree e previene la chiusura della volta in corrispondenza di regimi pluviometrici alti. Gli incendi generalmente decretano la morte degli alberi di piccola taglia generando così un collo di bottiglia e riducendo la possibilità di crescita verso lo stadio adulto. Un altro meccanismo di questo tipo è costituito dagli erbivori. Il fuoco e gli erbivori hanno una sinergia che può configurarsi come un forte meccanismo cuscinetto: infatti gli erbivori possono far diminuire la densità della vegetazione arborea consentendo all'erba di crescere in biomassa; in incremento della biomassa di erba corrisponde ad un incremento nel combustibile per gli incendi e quindi un incremento nella frequenza degli incendi e della loro intensità. La riduzione degli erbivori può corrispondere ad un incremento nel combustibile per gli incendi e quindi aumenta la probabilità di incendio. Così i predatori possono essere considerati come un meccanismo cuscinetto che indirettamente evita la chiusura a volta delle chiome. Esistono anche altri meccanismi di questo tipo: il taglio della legna per mano dell'uomo e gli animali ghiotti di semi sono elementi che possono ridurre la potenziale colonizzazione da parte degli alberi.

Dopo aver riportato una breve presentazione di quelli che sono i modelli utilizzati per studiare soprattutto biomi quali la savana, si ricorda, secondo Sankaran et al. (2004), che i modelli basati sulla competizione e quelli con demografia regolata da collo di bottiglia sono entrambi importanti al fine di un'analisi approfondita dell'ecosistema. Dunque è possibile che la realtà ecologica nella competizione tra erba ed alberi stia in mezzo a questi due approcci.

---

# CAPITOLO 7

## ANALISI CON MODELLO STG

I cambiamenti sono analizzati utilizzando un modello ecoidrologico minimale (Accatino et al., 2010), denominato STG, *Soil moisture-Tree-Grass*, per simulare le dinamiche accoppiate di alberi e copertura erbosa in competizione tra loro per spazio e acqua, ai quali si aggiunge il disturbo dovuto agli incendi e agli erbivori.

Nel corso del capitolo sarà descritto brevemente meccanismo di interazioni tra i vari componenti dell'ecosistema, la logica del modello ed infine saranno mostrate le simulazioni ottenute con il suddetto modello, utilizzando come ingresso la precipitazione di scenario B1 dal 2000 al 2100 introdotta nel capitolo 4.

### **7.1 Il fenomeno in luce: interazione umidità suolo e vegetazione**

Due sono i temi importanti per comprendere il fenomeno di coesistenza tra specie vegetali in un ecosistema: l'interazione reciproca tra specie e specie e l'interazione tra vegetazione e ciclo idrologico.

Per quanto riguarda il primo tema, si noti innanzitutto che all'interno di ogni habitat, ciascuna specie interagisce con più probabilità con le specie vicine rispetto a quelle più lontane (Tilman, 1994). Tuttavia, le dinamiche e la diversità di una certa comunità dipendono non solo dalle interazioni con i vicini, ma anche dalla diffusione della specie nelle zone appartenenti ad altre specie. Ad esempio, una specie può essere assente da una località non a causa di interazioni biotiche locali bensì per il fatto che nessun seme di quella specie è giunta in quel dato sito. La limitazione nella colonizzazione, è spesso citata come un

importante fattore per le dinamiche di successione, per la diversità e la composizione di una comunità, e per le dinamiche a lungo termine delle specie.

Un altro tema fondamentale per lo studio degli ecosistemi è costituito dalle interazioni tra il ciclo idrologico e la superficie vegetata: esso influenza fortemente il corretto apporto di risorse agli ecosistemi. Il principio di esclusione competitiva prevede che il miglior competitore per una singola risorsa limitante rimpiazzhi tutte le altre specie di un habitat, indipendentemente dalla loro densità iniziale (Tilman, 1982). Gli esperimenti di competizioni a lungo termine, messi a punto in vari siti, hanno largamente supportato tale predizione (Tilman e Wedin, 1993).

Secondo Amarasekare (Amarasekare, 2003) tutte le specie sono in qualche modo limitate nel diffondersi nello spazio dalle risorse o da nemici naturali. Nelle comunità in cui le specie sfruttano risorse comuni o possiedono nemici comuni, le specie che sono in grado di mantenere un tasso di crescita positivo al più basso livello di risorse o la più elevata pressione dovuta ai nemici porterà all'estinzione tutte le altre specie.

La coesistenza richiede che le specie siano diverse nel modo in cui agiscono sulle risorse e sui nemici naturali e nel modo in cui ne sono influenzati e dunque che la competizione intra-specifica sia più forte di quella inter-specifica (Amarasekare, 2003). Se si considerano le specie arboree, competitori superiori, mentre le specie erbose competitori inferiori, i fattori che permettono la crescita dell'erba sono fondamentalmente duplici: la presenza degli erbivori e gli incendi. L'azione dei meso- e mega-erbivori, infatti, può arrestare la crescita degli alberi in stadi di età giovani e dunque limitare in generale la crescita della popolazione arborea (Prins e van der Jeugd, 1993), mentre gli incendi hanno il duplice effetto di ridurre la copertura arborea ed evitare, soprattutto negli ecosistemi fuco-dipendenti, che si generi la cosiddetta "chiusura della volta" dovuta alle chiome degli alberi presenti in densità molto elevate.

## **7.2 La struttura del modello: descrizione della dinamica di vegetazione**

Nel modello minimale STG, pioggia, incendi ed erbivori sono tutti considerati in un unico sistema semplice. In particolare, la precipitazione e gli incendi sono esplicitamente inclusi nel modello con appositi parametri, mentre gli erbivori sono considerati implicitamente.

Il modello è costituito da due componenti principali: quella idrologica per le dinamiche di contenuto d'acqua nel suolo e quella ecologica per la dinamica delle vegetazione. Uno schema che esemplifica la struttura del modello è riportata in Figura 7.1. Dalla figura si può notare che la parte ecologica e quella idrologica sono legate reciprocamente l'una all'altra. La

precipitazione è una forzante della parte idrologica, mentre il fuoco e gli erbivori costituiscono delle forzanti per la parte ecologica del modello.

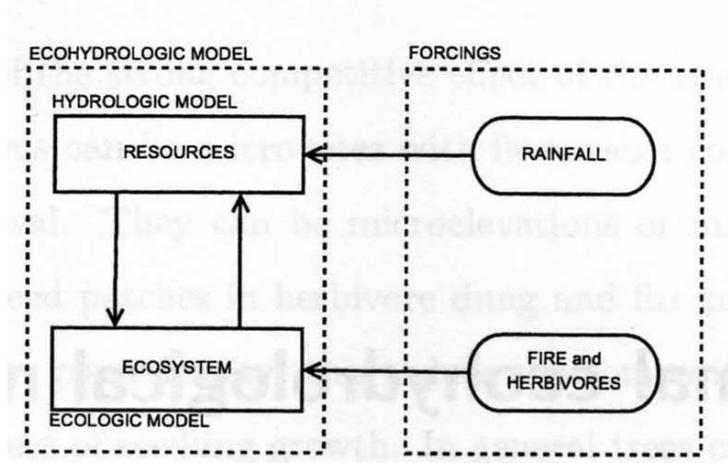


Figura 7.1 Modello minimale eco-idrologico per interazione alberi-erba e umidità del suolo.

Il contenuto d'acqua è la principale risorsa limitante negli ecosistemi aridi e semi-aridi ed è altamente variabile nel tempo, quindi è stato scelto di trattarla come una variabile piuttosto che come un parametro fisso. Il modello idrologico simula le dinamiche del contenuto d'acqua come bilancio di massa in cui la precipitazione è un ingresso.

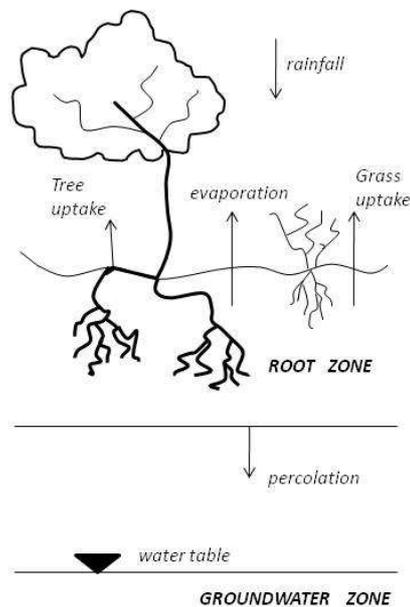


Figura 7.2 Schema dei flussi d'acqua in un generico volume di controllo in presenza di climi aridi e semi aridi.

Contrariamente a quanto sostenuto nella ‘Walter hypothesis’ (Walter, 1971), secondo il quale l’erba ha accesso solo alla parte di suolo più alta, mentre gli alberi estendono le loro radici sia nella parte più superficiale sia in quella sottostante per assorbire acqua, qui si assume che la profondità al quale gli alberi e l’erba assorbono acqua è la stessa. Si assume inoltre che la falda sia così profonda che non influenzi la dinamica dell’acqua nella zona dell’apparato radicale. Uno schema dell’interazione acqua-vegetazione è riportato in Figura 7.2. Le dinamiche della vegetazione alberi-erba sono simulate utilizzando un modello simile a quello proposto da Tilman (1994), parzialmente modificato per includere gli effetti del fuoco sulla vegetazione.

Le ipotesi assunte dal modello sono le seguenti:

- La diffusione del fuoco è fortemente influenzata dalla composizione e dalla distribuzione della vegetazione (Beckage et al., 2009). I fattori esterni che aumentano la probabilità di innesco di incendio non sono esplicitamente inclusi nel modello ma implicitamente considerati in alcuni parametri.
- Gli effetti degli erbivori sono raggruppati in un tasso di mortalità della vegetazione (si veda Paragrafo 7.3).
- Qui si assume che la superficie sia più o meno orizzontale e che tutta la pioggia si infiltri nel terreno.
- La profondità al quale gli alberi e l’erba assorbono acqua è la stessa.
- La falda è così profonda che non influenza la dinamica dell’acqua nella zona dell’apparato radicale.

## 7.3 Il modello

Come accennato, il modello è costituito da due componenti principali: quella idrologica per le dinamiche di contenuto d’acqua nel suolo e quella ecologica per la dinamica delle vegetazione. Il modello descritto è *minimale* per quanto riguarda le interazioni alberi-erba-umidità del suolo. Il termine *minimale* si riferisce al fatto che il modello è *concettuale*: la natura delle interazioni tra i due competitori non è considerata in modo dettagliato. Lo scopo del modello è quello di prevedere l’andamento delle dinamiche di vegetazione in funzione dei disturbi presenti negli ecosistemi. Nel proseguo verrà data una descrizione accurata di ogni parte del modello e verrà giustificato il valore dei parametri.

---

### 7.3.1 La dinamica della vegetazione

Si consideri il modello spazialmente implicito introdotto da Tilman (1994) per rappresentare le dinamiche temporali di copertura arborea e erbosa:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = c_T T(1-T) - \delta_T T \\ \frac{dG}{dt} = c_G G(1-G-T) - c_T T G - \delta_G G \end{cases} \quad (7.1)$$

Dove  $T$  e  $G$  sono frazioni di area occupata, rispettivamente, dagli alberi e dall'erba.  $T$  e  $G$  sono adimensionali e variano nell'intervallo chiuso  $[0, 1]$ :  $T=0$  significa che gli alberi non sono presenti nell'area, viceversa  $T=1$  significa che l'area è completamente coperta dagli alberi così analogamente per l'erba. Inoltre, i valori  $T$  e  $G$  devono soddisfare anche le condizioni  $0 \leq T + G \leq 1$ .  $c_T$  e  $c_G$  sono i tassi di colonizzazione, mentre  $\delta_T$  e  $\delta_G$  sono rispettivamente i tassi di rimozione per alberi e erba.  $c_T$ ,  $c_G$ ,  $\delta_T$  e  $\delta_G$  sono tutti positivi e dimensionalmente sono pari a  $[1/\text{yr}]$ . Nell'equazione (7.1), gli alberi sono i competitori superiori, mentre l'erba è il competitore inferiore. Gli alberi rimpiazzano l'erba (il termine  $-c_T T G$ ), e colonizzano parti di terreno in cui gli alberi sono assenti (il termine  $c_T T(1-T)$ ), mentre l'erba può insediarsi solo dove erba e alberi sono assenti (il termine  $c_G G(1-G-T)$ ). Il termine  $-c_T T G$  rappresenta proprio il "displacement" ovvero la porzione di suolo che viene sottratta all'erba ad opera degli alberi.

Si faccia riferimento a Tilman (1994) per ulteriori dettagli.

### 7.3.2 La dinamica dell'umidità del suolo

Si consideri che  $z$  [l] indichi la profondità a cui le radici esplorano il terreno,  $n$  la porosità (il volume di pori frazionario [-]),  $w$  [l<sup>3</sup>] il volume di controllo che si assume abbia area e profondità unitaria  $z$ ,  $w=1 \times z$ , e  $w_P$  [l<sup>3</sup>] lo spazio dei pori nel volume  $w$ ,  $w_P=1 \times z \times n = 1 \times w$ , indicando con  $w_i = z \times n$ .

Si ponga  $S$  il grado di saturazione del profilo di capacità del suolo disponibile, definita come il volume d'acqua presente nella zona dell'apparato radicale relativa al massimo volume di acqua che può essere tenuta in questa zona (lo spazio dei pori nel volume  $w$ ). La dinamica di  $S$  è descritta dalla seguente equazione di bilancio di massa nel volume di controllo  $w$ :

$$\frac{dS}{dt} = \frac{p}{w_1} (1-S) - \varepsilon S(1-T-G) - \tau_T S T - \tau_G S G \quad (7.2)$$

$S$  è adimensionale e assume valori nell'intervallo chiuso  $[0, 1]$ , in particolare  $S=0$  corrisponde a suolo completamente secco, mentre  $S=1$  a suolo completamente saturo. La condizione  $S=1$

non è verificata in savane semi aride e aride, in particolar modo se il bilancio è analizzato a scala stagionale o annuale.

Il termine  $p/w_1$ , [1/yr], è il tasso di pioggia ( al di sopra dell'unità d'area)  $p > 0$  [l/yr] normalizzati da  $w_1$  [l]. Il termine  $(p/w_1)S$  è la percolazione profonda, come ad esempio l'ammontare di pioggia che eccede la capacità della zona di suolo contenente l'apparato radicale, che percola oltre la profondità dell'apparato radicale.

Si noti che in letteratura, la percolazione profonda è rappresentata attraverso una funzione non lineare di  $S$  (ad esempio Rodriguez-Iturbe e Porporato, 2004). Tuttavia, poiché la percolazione profonda non è una caratteristica determinante nell'idrologia dei sistemi aridi e semi aridi (spesso è meno dell'1% del quantitativo drena alla falda, si veda Scholes e Walker, 1993, e riferimenti al suo interno), si è fatta l'assunzione di linearità al fine di ottenere un modello trattabile analiticamente.

Il termine  $\varepsilon S(1 - T - G)$  è l'evaporazione dal suolo privo di vegetazione. Essa dipende dalla frazione del suolo non vegetato,  $(1 - T - G)$ , e l'umidità del suolo disponibile  $S$ . Il termine  $\tau_T ST$  rappresenta l'assorbimento di acqua da parte degli alberi e  $\tau_G SG$  quella assorbita dall'erba. Nell'Eq.(7.2), i parametri  $\varepsilon, \tau_T, \tau_G$  indicano: massimo tasso di evaporazione dal suolo non vegetato e rispettivamente il tasso di assorbimento degli alberi e dell'erba. I parametri sono tutti positivi ed hanno una dimensione [1/yr].

### 7.3.3 Modello di dinamica in assenza di incendi

La dinamica degli alberi e dell'erba sono collegate alla dinamica dell'umidità del suolo. Dunque, nell'Eq.(7.2), i tassi di colonizzazione degli alberi,  $c_T$ , e dell'erba,  $c_G$ , non sono costanti, ma sono funzioni dell'umidità del suolo nella zona dell'apparato radicale. Per semplicità, si assume una dipendenza lineare di  $c_T$  e  $c_G$  su  $S$ , ad esempio,  $c_T = \gamma_T S$  e  $c_G = \gamma_G S$  dove  $\gamma_T$  e  $\gamma_G$  sono i tassi di massima colonizzazione, aventi dimensioni [1/yr].

Dunque le dinamiche accoppiate di alberi, erba e umidità del suolo, in assenza di incendi, sono descritte dal sistema di tre equazioni differenziali:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = \frac{p}{w_1}(1 - S) - \varepsilon S(1 - T - G) - \tau_T ST - \tau_G SG \\ \frac{dT}{dt} = c_T T(1 - T) - \delta_T T \\ \frac{dG}{dt} = c_G G(1 - G - T) - c_T TG - \delta_G G \end{cases} \quad (7.3)$$

L'Eq.(7.3) è un modello minimale eco idrologico, caratterizzato da nove parametri:  $z, n$  ( $w_1 = z \times n$ ),  $\varepsilon, \tau_T, \tau_G, \gamma_T, \gamma_G, \delta_T, \delta_G$ . La pioggia si configura come una forzante ambientale.

---

Questo modello rappresentato dall'Eq.(7.3) è un'estensione del modello proposto da De Michele et al. (2007), e da Vezzoli et al. (2008) per la dinamica accoppiata di umidità del suolo e un gruppo di piante funzionali in ecosistemi aridi e semi aridi.

### 7.3.4 Valore dei parametri

Il valore dei parametri nell'Eq. (7.3) sono stati determinati in Accatino et al. (2010) in base ai tempi scala e sono riportati in Tabella 7.1. La profondità della zona radicale  $z$  è nell'intervallo 0.1-1 m, mentre la porosità  $n$  è nel range 0.05-0.55 (Scholes a Walker, 1993). I tassi di colonizzazione e quelli di perdita sono stati ottenuti considerando la scala di tempo necessaria ad ottenere lo stato stazionario. Per i tassi di perdita si consideri un gruppo funzionale di piante in un solo tempo, in assenza di fuoco e di umidità del suolo. Sotto tali condizioni, la vegetazione declina a zero esponenzialmente, ad esempio  $\propto \exp(-\delta t)$ . Facendo delle ipotesi circa il tempo necessario impiegato da ogni tipo funzionale per raggiungere l'estinzione partendo dal suo massimo valore, si possono stimare il tasso di mortalità  $\delta$ . Inoltre gli alberi presenti nella zona Sudafricana hanno una vita lunga mediamente 10-100 anni, conseguentemente  $\delta_T \approx 0.03-0.3 \text{ yr}^{-1}$  (ad esempio il valore di 0.0255 è utilizzato in Bampfylde et al., 2005). I cespi d'erba, vivono da 1 a 3 anni, quindi  $\delta_G \approx 1-3 \text{ yr}^{-1}$ . Per i tassi di colonizzazione, una volta fissati i valori per i tassi di perdita, si stima l'intervallo necessario alla vegetazione per ottenere lo steady state, con risorse illimitate ( $S=1$ ) e in assenza di competitori. Si assume che gli alberi impieghino 5-100 anni, quindi  $\gamma_T \approx 0.15-2.5 \text{ yr}^{-1}$ ; e per l'erba, 20-180 giorni e dunque  $\gamma_G \approx 20-200 \text{ yr}^{-1}$ . Il parametro  $\epsilon$  è determinato assumendo una condizione di suolo completamente nudo ( $T=0, G=0$ ) e assenza di precipitazione ( $p=0$ ). In queste condizioni  $S \rightarrow 0$  con attraverso una funzione esponenziale  $S(t)=\exp(-\epsilon t)$ , quindi utilizzando un tempo di essiccazione (il tempo per andare da  $S=1$  a 0) di 35-50 giorni (Wythers et al., 1999),  $\epsilon \approx 20-30 \text{ yr}^{-1}$ .

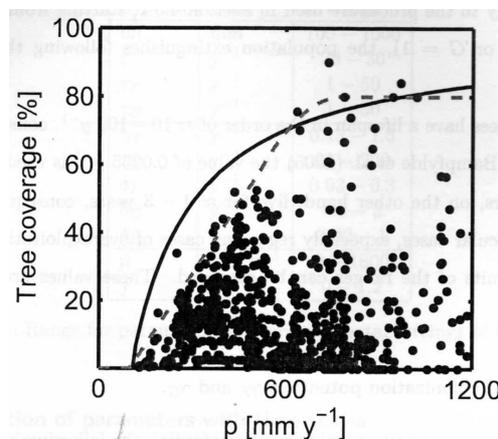


Figura 7.3 Variabilità della copertura arborea con la precipitazione.

I valori dei parametri di assorbimento,  $\tau_G$  e  $\tau_T$  sono determinati tramite fitting dell'Eq.(7.2), allo stato stazionario per il limite superiore dei dati copertura arborea raccolti da Sankaran et al. (2005), avendo fissato  $z=1$ ,  $n=0.345$ ,  $\varepsilon=20 \text{ yr}^{-1}$ ,  $\gamma_G=180 \text{ yr}^{-1}$ ,  $\delta_T=0.04 \text{ yr}^{-1}$ ,  $\delta_G=2.8 \text{ yr}^{-1}$ . In Figura 7.3 i punti rappresentano i dati sperimentali raccolti da Sankaran et al. (2007) in 854 savane in tutta l'Africa. In figura sono state riportate, per ogni sito di savana, la media annuale di precipitazione e la copertura arborea; la linea tratteggiata rappresenta la massima copertura arborea ottenuta interpolando i punti sperimentali tramite una regressione al 99esimo percentile (Sankaran et al., 2005). Dunque  $\tau_T$  e  $\tau_G$  sono stati determinati in maniera tale che, lungo il gradiente di precipitazione (da 0 a 1800 mm  $\text{yr}^{-1}$ ), la copertura calcolata con i valori di T all'equilibrio per il modello (Eq.(7.2)) sia il più possibile vicino alla regressione del limite superiore della copertura arborea costruita da Sakaran et al. (2005).

Si è ottenuto un intervallo 1-50  $\text{yr}^{-1}$  per  $\tau_T$  e  $\tau_G$ . Per ulteriori approfondimenti in merito alla taratura dei parametri si rimanda a Accatino et al. (2010).

Tabella 7.1. Parametri tarati modello minimale STG

<b><i>Simboli</i></b>	<b><i>Unità</i></b>	<b><i>Intervallo</i></b>
<b>z</b>	m	0.1-1
<b>n</b>	-	0.05-0.55
<b><math>\varepsilon</math></b>	$\text{yr}^{-1}$	20-30
<b><math>\tau_T</math></b>	$\text{yr}^{-1}$	1-50
<b><math>\tau_G</math></b>	$\text{yr}^{-1}$	1-50
<b><math>\gamma_T</math></b>	$\text{yr}^{-1}$	0.15-2.5
<b><math>\gamma_G</math></b>	$\text{yr}^{-1}$	20-200
<b><math>\delta_T</math></b>	$\text{yr}^{-1}$	0.03-0.3
<b><math>\delta_G</math></b>	$\text{yr}^{-1}$	1-3

### 7.3.5 Modello di dinamica con incendi

Per tenere conto esplicitamente della forzante fuoco nel suddetto modello, Eq. (7.3), il termini di rimozione per l'erba e per gli alberi vengono divisi in due:  $\delta_G G$  è diviso in  $f_G$  che descrive la distruzione dell'erba ad opera degli incendi, e  $\delta_{G0} G$  che rappresenta la riduzione dell'erba dovute ad altre cause come la mortalità e gli erbivori, come in Langevelde et al. (2003); mentre  $\delta_T$  è diviso in  $\delta_{T1}$  e  $\delta_{T2}$ , proporzionale all'accumulo del combustibile erba ( $f_G$ ), all'abbondanza degli alberi stessi (T), e alla loro vulnerabilità all'incendio ( $d_F$ ); tale modo di introdurre il fuoco è simile a come effettuato in van Langevelde et al. (2003).

---

Il sistema presentato nell'Eq. (7.4) diventa

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = \frac{p}{w_1}(1 - S) - \varepsilon S(1 - T - G) - \tau_T ST - \tau_G SG \\ \frac{dT}{dt} = c_T T(1 - T) - \delta_T T - \delta_F fGT \\ \frac{dG}{dt} = c_G G(1 - G - T) - c_T TG - \delta_{Go} G - fG \end{cases} \quad (7.4)$$

Nell'Eq. (7.4), il coefficiente  $f$  [1/t] può essere visto come termine rappresentativo della frequenza degli incendi, mentre il coefficiente  $\delta_F$  [-] è una funzione sia della frequenza, sia dell'intensità dell'incendio, mentre il combustibile dato dall'erba va ad incidere sull'intensità del fuoco. Nell'Eq.(7.4) non è presente nessuna differenziazione tra alberi adulti e giovani. Tuttavia, il valore del parametro  $d_F$  può offrire informazioni circa l'età media degli alberi. Un alto valore di  $\delta_F$  è rappresentativo di siti dove gli alberi sono giovani e quindi vulnerabili agli incendi, mentre bassi valori di  $\delta_F$  sono rappresentativi di siti dove sono gli alberi adulti e piccoli ad essere soggetti agli incendi. Per questo motivo il parametro  $\delta_F$  varia tra 0.02 se gli alberi sono molto resistenti al fuoco e 0.6 se, viceversa, sono facilmente soggetti agli incendi, in accordo con quanto asserito in Casagrandi e Rinaldi (1999). Secondo Belsky (1994), in Africa, l'occorrenza degli incendi nella savana umida è uno ogni 1-2 anni, mentre nella savana secca è uno ogni 3-10 anni. Per i cerrado Brasiliani e le regioni più umide dell'Africa (gli ecosistemi più umidi nel mondo) Bond e Keeley (2005) riportano valori di frequenza di incendi che raggiunge un massimo di 2 yr<sup>-1</sup>. In quest'analisi si considera un parametro  $f \approx 0-1.2$  yr<sup>-1</sup>.

## 7.4 Simulazioni di scenario

Dopo aver esposto la teoria del modello, si è proceduto a simulare l'andamento della copertura alberi-erba durante i 101 anni di simulazione in assenza e in presenza di incendi per entrambi i siti di analisi (Skukuza e Lesotho).

### 7.4.1 Simulazione in assenza di incendi

Per riuscire ad evidenziare in modo chiaro come l'andamento dell'erba sia fortemente legato all'umidità del suolo e quindi alla precipitazione, si è costruita una "precipitazione artificiale" ciclica per ognuno dei due siti in analisi, replicando il ciclo mensile riportato in Figura 4.8, relativamente allo scenario di precipitazione di Skukuza e Lesotho, tante volte quanti sono gli anni di simulazione, ovvero 101. Si è posta dunque tale serie ciclica di precipitazione in ingresso al modello implementato in Matlab 7.10 e si è studiato l'andamento dell'umidità del

suolo, della copertura arborea ed erbosa integrando le equazioni del sistema Eq.(7.5). I parametri utilizzati assumono valori riportati in Tabella 7.2 e rientrano negli intervalli di taratura presentati nel precedente paragrafo, mentre le condizioni iniziali di copertura, per permettere l'integrazioni delle variabili, sono: 0 per l'umidità del suolo per entrambi i siti, 66% di copertura erbosa e 20% di copertura arborea nel sito Skukuza, mentre 70% di copertura erbosa e 9% di copertura arborea per Lesotho. Le coperture di vegetazione all'anno 2000 sono state ottenute da dati satellitari MODIS.

Tabella 7.2. Parametri utilizzati nella simulazione del modello minimale STG

<b>Simboli</b>	<b>Unità</b>	<b>Valore</b>
<b>z</b>	m	0.628
<b>n</b>	-	0.55
<b>ε</b>	yr <sup>-1</sup>	20
<b>τ<sub>T</sub></b>	yr <sup>-1</sup>	30
<b>τ<sub>G</sub></b>	yr <sup>-1</sup>	10
<b>γ<sub>T</sub></b>	yr <sup>-1</sup>	2
<b>γ<sub>G</sub></b>	yr <sup>-1</sup>	200
<b>δ<sub>T</sub></b>	yr <sup>-1</sup>	0.02
<b>δ<sub>G</sub></b>	yr <sup>-1</sup>	2

Per il sito di Skukuza in Figura 7.4 è riportato l'andamento della copertura vegetale associato all'andamento ciclico della precipitazione, mentre in Figura 7.5 l'analoga analisi è effettuata per il sito Lesotho.

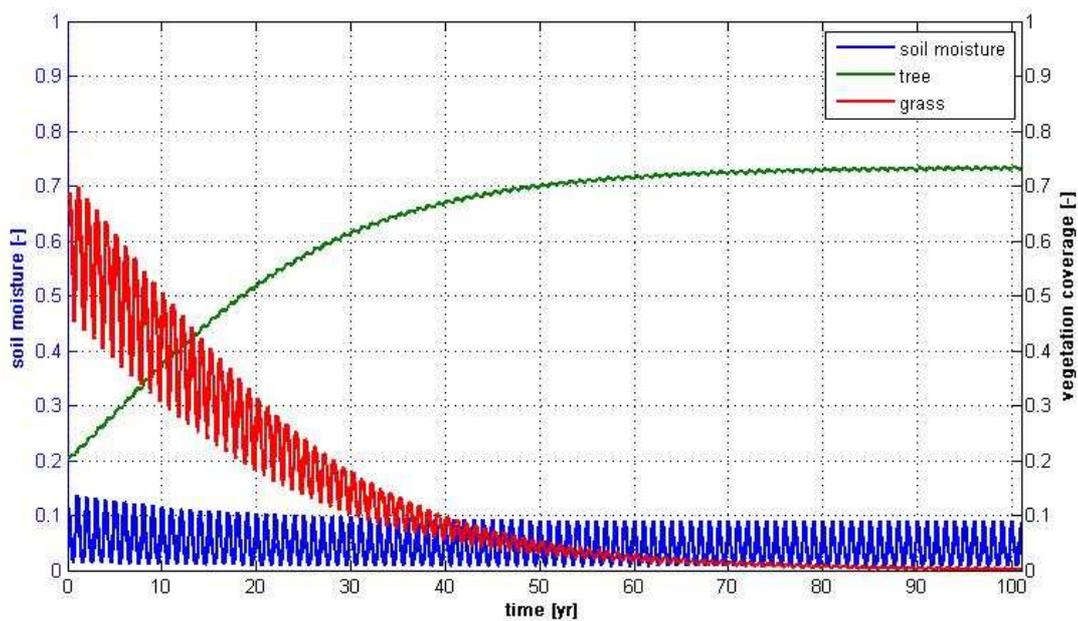


Figura 7.4 Andamento umidità del suolo-alberi-erba con precipitazione ciclica stagionale replicata per 101 anni in assenza della forzante fuoco nel sito di Skukuza. Modello STG.

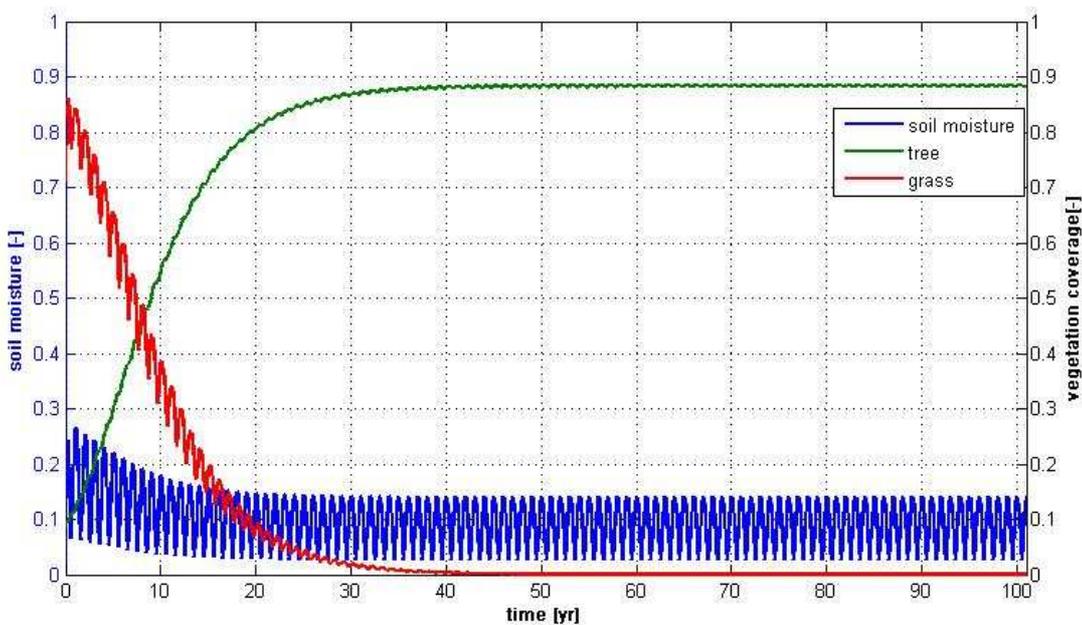


Figura 7.5 Andamento umidità del suolo-alberi-erba con precipitazione ciclica stagionale replicata per 101 anni in assenza della forzante fuoco nel sito di Lesotho. Modello STG.

Le medesime simulazioni sono state fatte ponendo come forzante al modello la precipitazione reale di scenario per entrambi i siti. Ciò che si è ottenuto è riportato in Figura 7.6 per il sito di Skukuza, 7.7 per il sito di Lesotho.

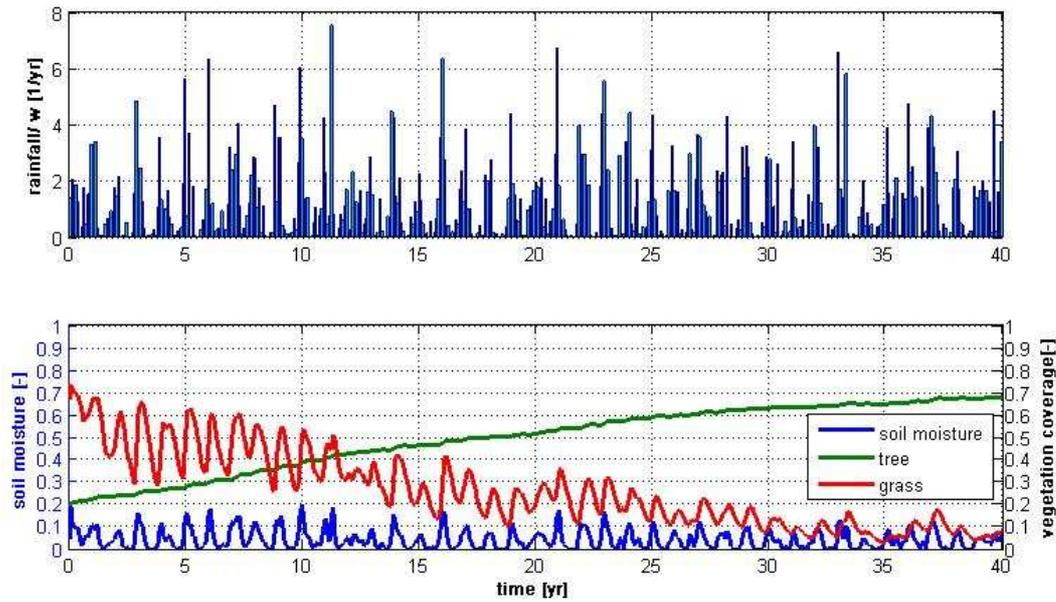


Figura 7.6 Andamento umidità del suolo-alberi-erba con precipitazione di scenario nel sito di Skukuza per i primi 40 anni di previsione in assenza di incendi. Modello STG. L'andamento della precipitazione normalizzata per il parametro w è riportata nel grafico sopra.

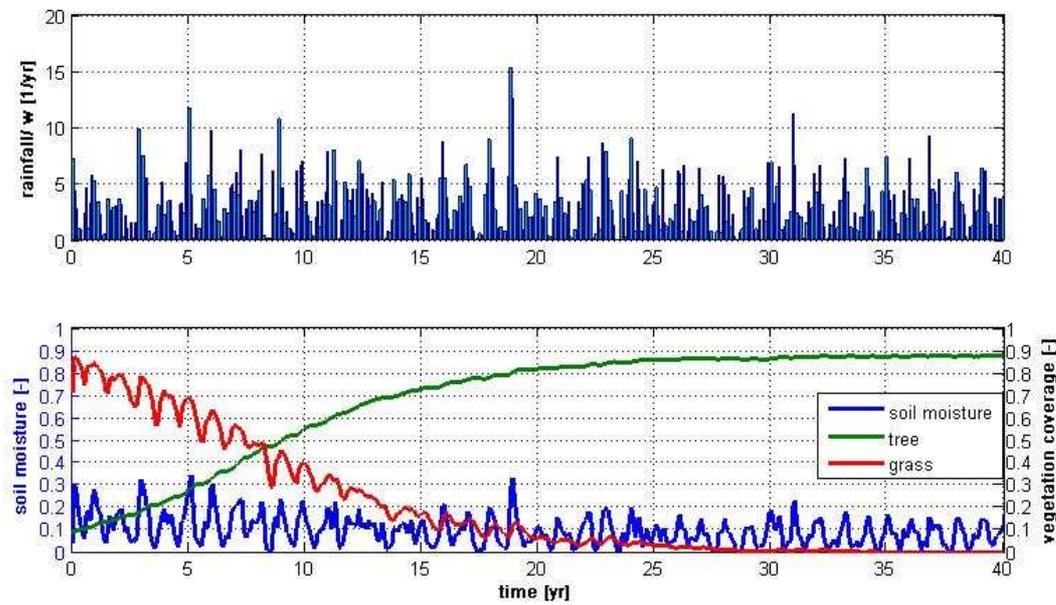


Figura 7.7 Andamento umidità del suolo-alberi-erba con precipitazione di scenario nel sito di Lesotho per i primi 40 anni di previsione in assenza di incendi. Modello STG. L'andamento della precipitazione normalizzata per il parametro w è riportata nel grafico sopra.

Come si può notare, sia nel caso di precipitazione “artificialmente” resa ciclica, sia nel caso di precipitazione reale, in entrambi i siti, dopo un breve transitorio, si giunge ad una traiettoria

---

ciclo stazionaria in cui gli alberi, pur partendo da una condizione iniziale di copertura più bassa, hanno il sopravvento sull'erba.

Il rimpiazzo dell'erba ad opera della copertura arborea avviene più velocemente in Lesotho in cui la precipitazione mantiene delle medie mensili più elevate, rispetto a Skukuza in cui le medie mensili sono più basse (Fig.7.6 e 7.7). Le simulazioni effettuate con precipitazioni reali di scenario indicherebbero, infatti, che dal 2020 per Skukuza e 2025 per Lesotho, l'ecosistema sarebbe caratterizzato da una presenza dominante di alberi. Tale analisi, seppur matematicamente corretta dal punto di vista dell'andamento delle traiettorie del modello, non è del tutto realistica in quanto non si tiene conto di un importante fattore che influenza i territori sudafricani: gli incendi. Nel seguente paragrafo verranno apportate delle modifiche al fine di cogliere anche questo importante aspetto.

Infine, è importante notare come l'andamento dell'erba sia sempre ciclico e fortemente correlato ai cicli dell'umidità del suolo (e dunque indirettamente anche con i cicli della precipitazione); ciò è ben evidente nel caso in cui la precipitazione è stata resa artificialmente ciclica, meno evidente, ma comunque intuibile, nel caso in cui è stata utilizzata la precipitazione di scenario come forzante al modello.

## **7.4.2 Simulazione con incendi**

Si è proceduto a simulare l'andamento della copertura alberi-erba durante i 101 anni di simulazione. Dapprima, come nella precedente analisi, si è posta la serie ciclica costruita "artificialmente" di precipitazione in ingresso al modello implementato in Matlab 7.10 e si è studiato l'andamento dell'umidità del suolo, della copertura arborea ed erbosa integrando le equazioni del sistema Eq.(7.4). I parametri utilizzati e le condizioni iniziali sono le stesse utilizzate nella precedente analisi.  $\delta_F$  è stato posto ad un valore di 0.35 mentre  $f$  è pari ad 1.

Per il sito di Skukuza in Figura 7.8 è riportato l'andamento della copertura vegetale associato all'andamento ciclico della precipitazione, mentre in Figura 7.9 l'analoga analisi per il sito di Lesotho.

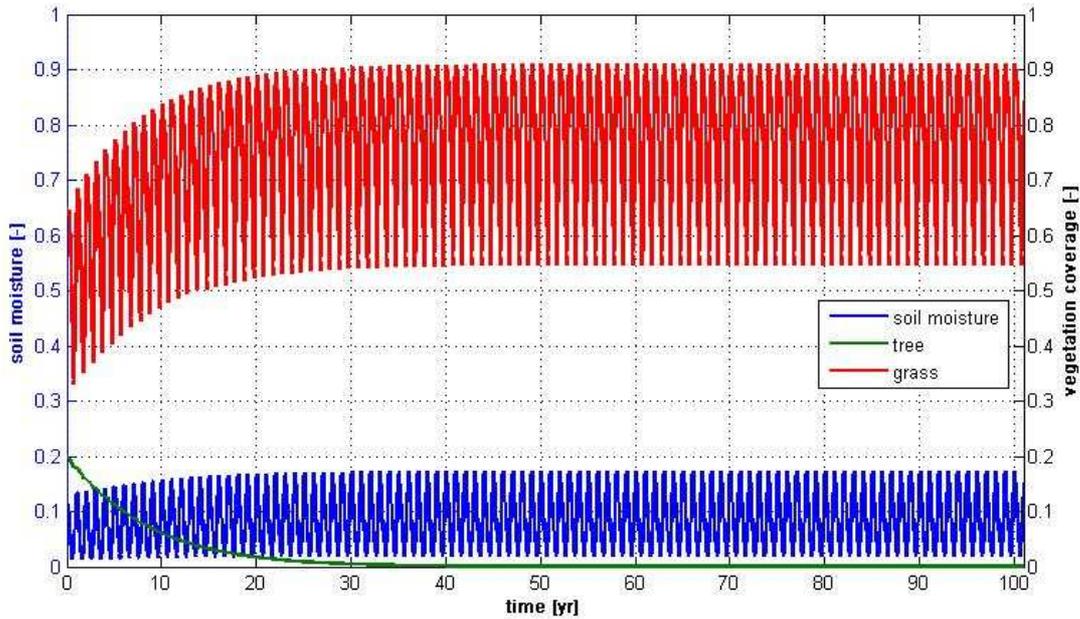


Figura 7.8 Andamento umidità del suolo-alberi-erba con precipitazione ciclica in presenza di incendi nel sito di Skukuza. Modello STG.

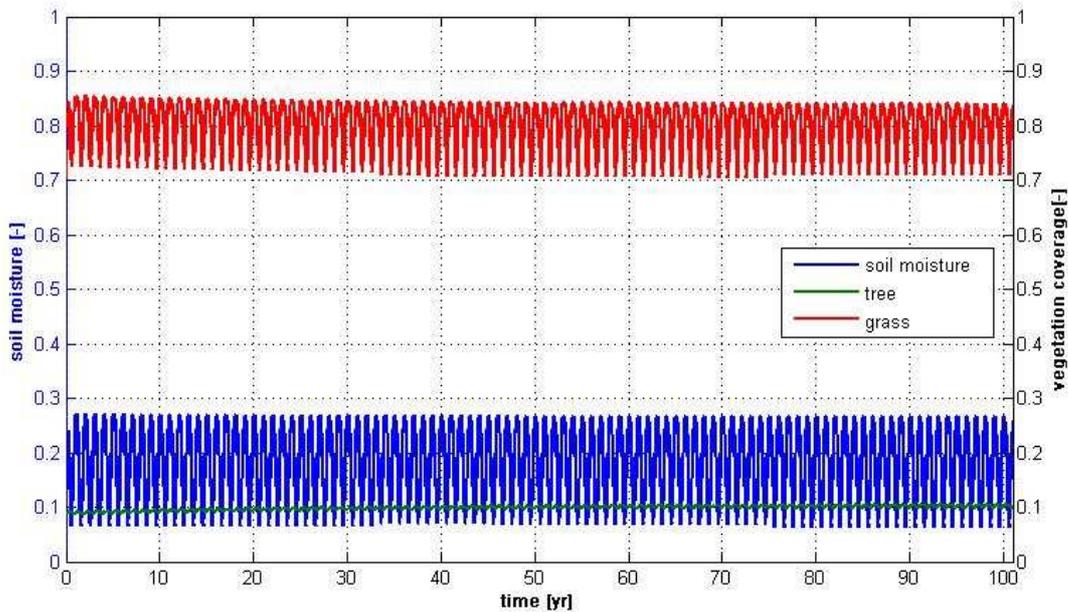


Figura 7.9 Andamento umidità del suolo-alberi-erba con precipitazione ciclica in presenza di incendi nel sito di Lesotho. Modello STG.

Le medesime simulazioni sono state fatte ponendo come forzante al modello la precipitazione reale di scenario per entrambi i siti. Ciò che si è ottenuto è riportato in Figura 7.10 e 7.11 rispettivamente per il sito di Skukuza e per il sito di Lesotho.

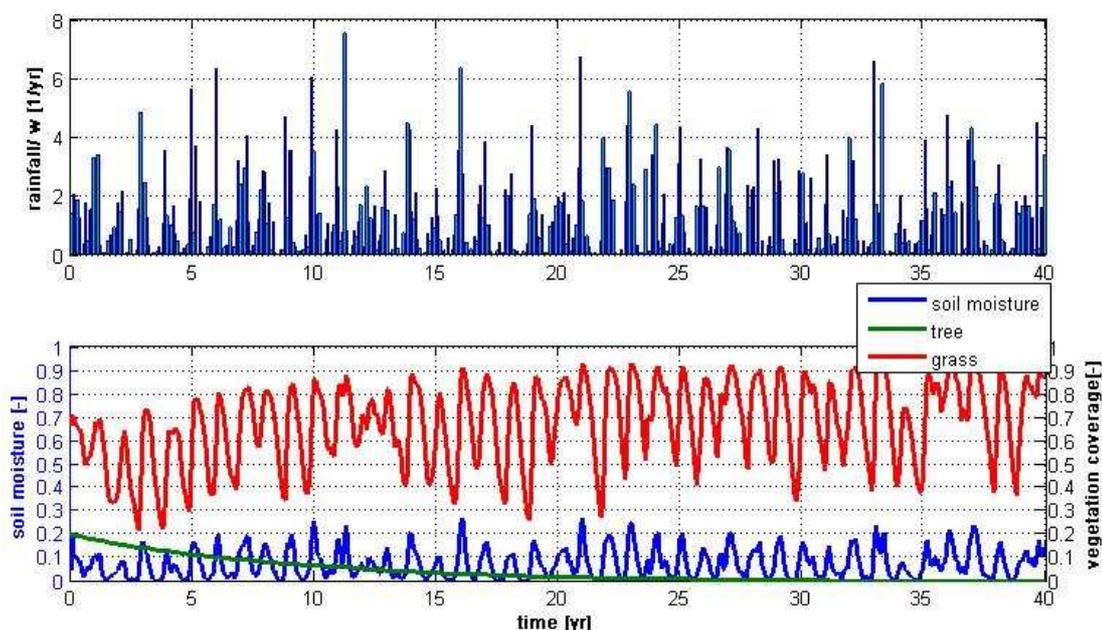


Figura 7.10 Andamento umidità del suolo-alberi-erba con precipitazione di scenario con incendi nel sito di Skukuza per i primi 40 anni di previsione. Modello STG. L'andamento della precipitazione normalizzata per il parametro  $w$  è riportata nel grafico sopra.

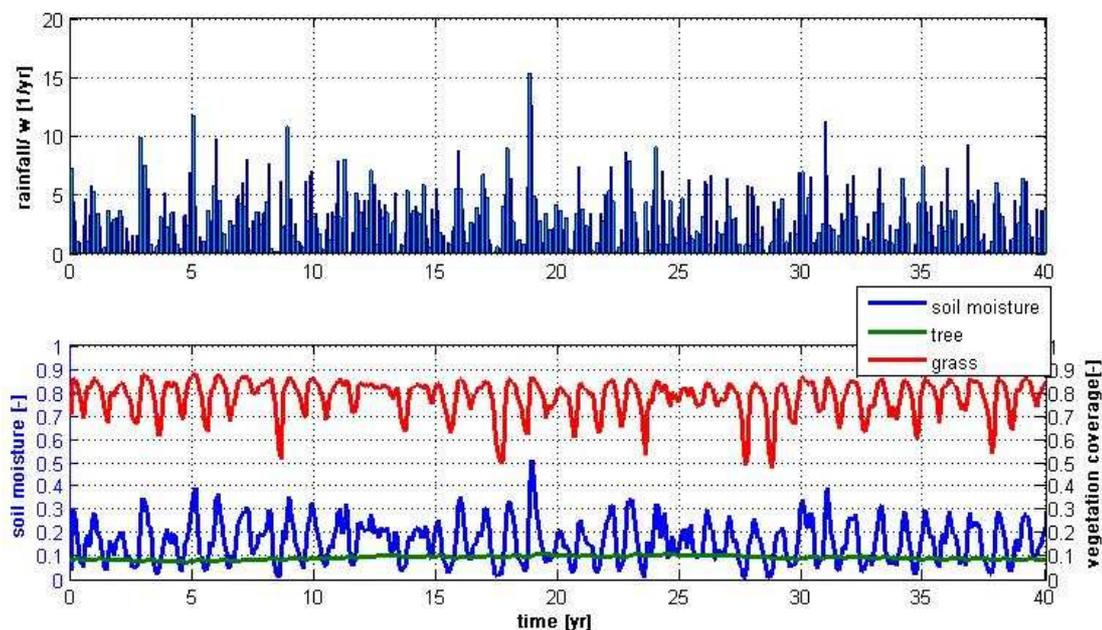


Figura 7.11 Andamento di umidità del suolo-alberi-erba con precipitazione di scenario con incendi nel sito di Skukuza per i primi 40 anni di previsione. Modello STG. L'andamento della precipitazione normalizzata per il parametro  $w$  è riportata nel grafico sopra.

Al contrario dell'analisi precedente eseguita in assenza di incendi, nella quale in entrambi i siti, gli alberi dopo un breve transitorio, avevano la meglio sull'erba, introducendo la

variabile “fuoco” la copertura arborea giunge ad un equilibrio più basso nel caso di Lesotho, o addirittura si estinguono nel caso di Skukuza, lasciando così spazio alla crescita dell’erba che si attesta, invece, ad un valore di copertura molto più elevato rispetto ai casi precedenti.

Si noti inoltre che, qualora si aumenti il valore di  $\delta_F$ , l’andamento copertura alberi-erba rimane pressoché uguale a quello riportato nelle figure 7.10 e 7.11, mentre se il valore viene diminuito fino al suo limite inferiore, ovvero 0.02, dopo un breve transitorio, gli alberi riescono ad avere la meglio sull’erba e tornano al loro equilibrio illustrato in assenza di incendi.

## 7.5 Pregi e difetti del modello STG

E’ dunque chiaro, dopo l’ultima analisi riportata, che gli incendi influenzino fortemente il bilancio tra alberi ed erba (e.g., Scholes e Walker, 1993). L’insorgenza di un incendio e la sua propagazione dipendono fortemente dalla presenza di sufficiente massa di piante secche che costituiscono una ricarica di combustibile. Il combustibile che alimenta l’incendio, specialmente per quanto riguarda la savana, è costituito prevalentemente da erba morta: l’incendio può infatti innescarsi solo dopo un adeguato numero di mesi caratterizzati da scarsa piovosità, cosicché si accumuli sufficiente biomassa derivante da erba secca (Bond e van Wilgen, 1996).

Conseguentemente, secondo la logica finora seguita, i periodi più soggetti ad incendio sono quelli a cui corrisponde maggiore biomassa accumulata, periodi che quindi coincidono con le stagioni secche, durante le quali, la presenza di “biomassa secca-combustibile” rende più facile la propagazione dell’incendio. Questo importante aspetto è in contraddizione con il modello finora utilizzato: nel modello STG non viene, infatti, distinta una stagione secca da una umida e il termine  $-fG$  dell’ultima equazione presente nel sistema 7.4, indica che la propagazione dell’incendio dipende fortemente dalla presenza di erba: secondo la formulazione del modello l’incendio si propaga tanto più facilmente, quanta più alta è la copertura erbosa. Ciò, come già detto è in contrasto con la realtà, nella quale gli incendi sono praticamente assenti nella stagione umida, in corrispondenza della quale l’erba cresce velocemente, mentre sono molto frequenti nella stagione secca, quando l’erba è quiescente, ma al suo posto domina biomassa secca accumulatasi durante la stagione precedente.

Dunque, nonostante il modello minimale finora descritto, sia adeguato se applicato allo stato stazionario (in cui è assente il concetto di stagionalità delle precipitazioni), diventa concettualmente errato se lo si utilizza per un’analisi di traiettoria.

Per questo motivo, nel prossimo capitolo verrà descritto un modo per ovviare al problema suddetto rendendo il modello minimale più coerente con la realtà.

---

# CAPITOLO 8

## ANALISI CON MODELLO STGD

Dopo l'ultima analisi riportata nel capitolo 7, risulta del tutto evidente che gli incendi influenzino fortemente il bilancio tra alberi ed erba (e.g., Scholes e Walker, 1993). Gli incendi hanno un profondo impatto sulla dinamica della vegetazione andando ad inficiare sulla produttività di quest'ultima e modificando la lettiera presente sulla superficie del suolo e dunque anche il combustibile vegetale (Cochrane, 2003; Whelan, 1995). Le condizioni per le quali gli incendi si possono propagare, sono determinate dal clima e dallo stato di vegetazione.

A questo proposito si è ritenuto opportuno, ai fini di superare i limiti del modello STG, modificarne la formulazione originaria, ideando un nuovo modello, chiamato per l'appunto *Soil moisture-Tree-Grass-Dead grass* (STGD), che contenga un'equazione dedicata alla dinamica della componente *erba secca* o "*dead grass*". Essa, infatti, come viene spiegato in modo approfondito nel paragrafo 8.1, ha un ruolo dominante nella propagazione degli incendi.

Si è, infine, analizzato l'andamento di dinamica della copertura vegetale in assenza e in presenza di incendio nei due siti di studio Skukuza e Lesotho confrontandone i risultati.

### **8.1 Il fenomeno in luce: formazione e ruolo della biomassa secca**

La biomassa secca ha un ruolo molto importante all'interno dell'ecosistema; per questo motivo è opportuno chiarire in che modo essa si formi e in che modo influenzi le dinamiche

della vegetazione, ripercorrendo brevemente il ciclo idrologico e la sua interazione con il manto erboso.

In seguito ad un evento di precipitazione, dopo che la percolazione si è arrestata, i pori più grandi del suolo sono riempiti di aria ed acqua, mentre i più piccoli pori rimangono pieni di acqua. In questa fase, si dice che il terreno è giunto alla capacità di campo. Alla capacità di campo, il contenuto d'acqua e di aria nel suolo sono considerati ideali per la crescita delle specie vegetali. A poco a poco, l'acqua immagazzinata nel suolo è assorbita dalle radici delle piante o evapora dal terriccio verso l'atmosfera. Più il suolo si essicca, più l'acqua restante tra i pori è trattenuta ad una pressione maggiore e più è difficile per le radici delle piante assorbirla. Ad un certo punto, l'assorbimento di acqua non è sufficiente a soddisfare le esigenze della pianta. L'assorbimento di acqua da parte delle radici, infatti, è un meccanismo passivo che dipende dalla differenza di potenziale: nel momento in cui il grado di saturazione del terreno si abbassa oltre un certo limite, l'apparato radicale, non è più in grado di "ricevere" acqua dal terreno e dunque la pianta perde la freschezza e appassisce, le foglie cambiano colore dal verde al giallo: la pianta muore. Il contenuto di acqua del suolo nella fase in cui la pianta muore, si chiama punto di appassimento permanente. Il suolo contiene ancora acqua, ma è troppo difficile per le radici attingere risorse idriche dal suolo.

Il punto di appassimento, o *wilting point*, ha un ruolo fondamentale nella dinamica della vegetazione, in quanto decreta la formazione della biomassa secca, o "dead grass", elemento importante nel meccanismo degli incendi.

L'insorgenza e la propagazione di un incendio, infatti, dipendono dalla presenza di uno strato continuo di sufficiente massa di piante secche che ne costituisce il combustibile.

L'incendio agisce in modo diverso su erba e alberi. Gli incendi sono più frequenti nella stagione secca, quando l'erba perenne è quiescente. Essi vanno a bruciare la parte più esterna della pianta ma non i bulbi presenti al di sotto della superficie del suolo. L'incendio intacca inoltre le foglie secche nella lettiera appartenenti agli alberi, ma se l'erba è completamente assente è molto difficile che il fuoco si propaghi.

La biomassa vivente degli alberi, invece, raramente viene bruciata, mentre gli arbusti legnosi morti e le foglie presenti nella lettiera e la biomassa vivente degli alberi appena sopra la superficie, possono essere colpiti dall'esposizione diretta all'incendio. Gli alberi piccoli sono più vulnerabili, dato che si trovano completamente nella zona in cui si sviluppa la fiamma. Gli alberi maturi sono investiti dall'incendio in misura minore, dal momento che le loro cortecce proteggono il nucleo principale della pianta e le gemme (le quali sono ancora quiescenti durante la stagione degli incendi) sono trattenute al di sopra della zona in cui si propaga la fiamma.

---

## 8.2 La struttura del modello: interazione alberi-erba-biomassa- fuoco

Per tener conto dunque della variabile *biomassa* o “*dead grass*” all’interno del modello minimale, è stata introdotta una nuova equazione differenziale al fine di modellizzarne la dinamica. L’erba verde e rigogliosa nella stagione umida, diventa gialla e secca nella stagione più calda, essiccandosi si riduce di volume e quindi solo una certa percentuale di copertura verde si trasforma in “*dead grass*”; al fine di modellizzare il suddetto passaggio da erba verde a erba secca, è stato introdotto il parametro “wilting point”,  $w_G$ : se l’umidità del suolo è al di sopra del punto di appassimento, l’erba non muore (si è nella stagione umida), viceversa se l’umidità del suolo è al di sotto del punto di appassimento, una quota parte di erba diventa biomassa secca. Nel modello è previsto che anche gli alberi si sfooltiscano (è infatti presente un parametro  $w_T$ ), ma essendo la loro dinamica più lenta di quella dell’erba, il  $w_T$  gioca un ruolo secondario nella dinamica complessiva del modello.

Quando l’erba diventa secca, costituisce combustibile per gli incendi. Poiché, come si è detto nel paragrafo precedente, la propagazione delle fiamme dipende dalla presenza di sufficiente massa di piante secche, si è deciso di non modellare la forzante fuoco con un parametro che agisca indistintamente su tutto il periodo di simulazione (ruolo che viene attribuito al parametro  $f$  nel paragrafo 7.2), bensì con una funzione che segua la dinamica della biomassa secca: solo dopo un ingente accumulo di biomassa-combustibile, l’incendio riesce a propagarsi.

Si assume che la probabilità di un incendio è nulla fino ad un certo valore di biomassa la ( $p_F = 0$ ), oltre tale valore la  $p_F$  risulta crescente linearmente con l’accumulo di biomassa secca. Se l’incendio ha luogo, la biomassa secca viene completamente consumata dalle fiamme, fatti salvi i bulbi appena sotto la superficie.

Inoltre si assume che una frazione della biomassa secca possa diventare nuovamente verde nella stagione umida successiva, andando ad incrementare il manto erboso. Ciò viene modellizzato attraverso il termine di rinascita di erba o “resprouting”,  $\phi$ , per la stagione successiva. Qualora l’incendio non si verifichi, il ciclo stagionale ricomincia, con la sola differenza di avere un accumulo di biomassa derivante dalla stagione precedente non ancora consumato dalle fiamme e che dunque determina una maggior probabilità di incendio per la stagione secca successiva.

## 8.3 Il modello

Come visto al paragrafo precedente, la struttura del modello del è analoga a quella del modello STG con l'introduzione però della variabile biomassa secca e della conseguente equazione che ne modella la dinamica. Nel proseguo verrà data una descrizione accurata di ogni parte del modello e verrà giustificato il valore dei parametri.

### 8.3.1 La dinamica della vegetazione

La dinamica della biomassa descritta nel paragrafo precedente, deve essere accoppiata alla dinamica dell'umidità del suolo, della copertura arborea e erbosa descritta nel capitolo 7. Le equazioni di dinamica, però, con l'introduzione della nuova variabile biomassa secca  $D$  [-] all'interno del sistema, necessitano modifiche relativamente ai feedback che la biomassa ha sull'andamento delle altre componenti dell'ecosistema. Si riporta il sistema completo nell'Eq.(8.1).

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = \frac{p}{w_1} (1 - S) - \varepsilon S (1 - T - G) - \tau_T ST - \tau_G SG - \tau_D SD \\ \frac{dT}{dt} = \gamma_T \max(0, S - w_T) T (1 - T) - \delta_T T \\ \frac{dG}{dt} = \gamma_G \max(0, S - w_T) (1 - G - T) - \gamma_T STG - \delta_G G - \delta_w G \frac{\min(0, S - w_G)}{S - w_G} + \varphi \max(0, S - w_G) D \\ \frac{dD}{dt} = k \delta_w G \frac{\min(0, S - w_G)}{S - w_G} - \delta_D D - \varphi \max(0, S - w_G) D - \gamma_T STD \end{cases} \quad (8.1)$$

L'equazione di umidità del suolo è stata modificata rispetto alla stessa presente nel modello minimale STG, aggiungendo il termine di assorbimento di acqua da parte della biomassa,  $\tau_D SD$ , in cui  $\tau_D$  è il tasso di assorbimento di acqua da parte della biomassa secca e ha una dimensione pari a 1/yr. Nella seconda equazione del sistema 8.1, relativa alla copertura arborea, è stata modificata la dinamica di crescita: gli alberi non crescono indefinitamente, ma, durante la stagione umida (ovvero quando  $S > w_T$ , dove  $w_T$  [-] è il punto di appassimento per gli alberi) essi hanno la possibilità di crescere proporzionalmente all'attuale copertura arborea e secondo il tasso di massima colonizzazione per gli alberi  $\gamma_T$  [1/yr], mentre durante la stagione secca, essi presentano una fase di stallo.

La terza equazione del sistema 8.1, relativa alla dinamica dell'erba, è stata arricchita con alcuni termini relativi alla trasformazione della stessa in biomassa secca; il primo termine indica la crescita dell'erba secondo il parametro  $\gamma_G$  [1/yr] durante la stagione umida e il suo annullamento durante la stagione secca. Il quarto termine, ovvero  $\delta_w G \frac{\min(0, S - w_G)}{S - w_G}$  indica

---

l'appassimento dell'erba in caso di stagione secca, dove  $\delta_w$  [1/yr] è il tasso di mortalità per insufficienza delle risorse idriche, mentre  $w_G$  [-] è il punto di appassimento per l'erba, ed infine l'ultimo termine  $\varphi \max(0, S - w_G) D$  rappresenta il "resprouting" ad opera dei bulbi o della parte di pianta appena sotto la superficie del suolo nel caso di stagione umida, proporzionalmente all'attuale copertura di biomassa e secondo il parametro  $\varphi$  [1/yr].

La quarta equazione del sistema 8.1, relativa alla biomassa secca, è costituita da un primo termine  $k\delta_w G \frac{\min(0, S - w_G)}{S - w_G}$  che indica la trasformazione di erba in biomassa secca solo se  $S < w_G$ , in cui  $k$  [-] è la quota parte di erba che eventualmente si trasforma in biomassa,  $\delta_w$  [1/yr] è il tasso di mortalità per insufficienza delle risorse idriche, mentre  $w_G$  [-] è il punto di appassimento per l'erba; il secondo termine,  $\delta_D D$ , dove  $\delta_D$  [1/yr] è il tasso di mortalità per la biomassa secca e  $D$  [-] è la frazione di area occupata dall'erba secca, indica la porzione di biomassa secca che muore per cause naturali (ad esempio senescenza); il terzo termine,  $\varphi \max(0, S - w_G) D$ , in cui parametro  $\varphi$  [1/yr] è il tasso di "resprouting", indica la ricrescita di erba nella stagione umida, ed è quindi un termine che decrementa la quantità di biomassa e incrementa, viceversa, la crescita dell'erba; infine l'ultimo termine,  $\gamma_T \text{STD}$ , che indica il "displacement" a danno della biomassa per opera degli alberi.

Per i termini dell'Eq.(8.1) non citati in questo paragrafo, si rimanda al paragrafo 7.3.3 del capitolo 7.

### 8.3.2 Valore dei parametri

L'Eq.(8.1) è un sistema di quattro equazioni differenziali in 15 parametri.

Per quanto riguarda il valore dei parametri si rimanda al paragrafo 7.3.4 e alla tabella Tab. 7.1, nonché alla procedura di taratura degli stessi descritta nel suddetto paragrafo.

I parametri di appassimento  $w_G$  e  $w_T$  sono assunti pari rispettivamente a 0.040 e 0.065 (Scanlon et al., 2005).

### 8.3.3 Forzante fuoco e dinamica alberi-erba-biomassa

Come detto nel paragrafo 8.2, il combustibile che alimenta l'incendio, specialmente per quanto riguarda la savana, è costituito prevalentemente da erba morta; per tale motivo si è deciso di non modellare la forzante fuoco con un parametro che agisca indistintamente su tutto il periodo di simulazione (ruolo che viene attribuito al parametro  $f$  nel paragrafo 7.2), bensì con una funzione che segua la dinamica della biomassa secca: solo dopo un ingente accumulo di biomassa-combustibile, l'incendio riesce a propagarsi.

Si è dunque costruita una funzione della biomassa che viene assimilata alla probabilità di incendio  $p_F$ : fino ad un certo valore di biomassa la  $p_F = 0$ , oltre tale valore la  $p_F$  risulta linearmente crescente con l'accumulo di biomassa secca.

Si è studiata una funzione per cui  $p_F$  sia nulla fino a che la biomassa secca non raggiunga il 40% di copertura, poi cresca linearmente con essa. Ovviamente sia  $p_F$  che la copertura di biomassa devono essere compresi nell'intervallo  $[0, 1]$ . Ad un valore di copertura da parte di biomassa secca del 100%, corrisponderà la probabilità di incendio pari ad 1. In Figura 8.1 è riportato l'andamento di  $p_F$  al variare della biomassa.

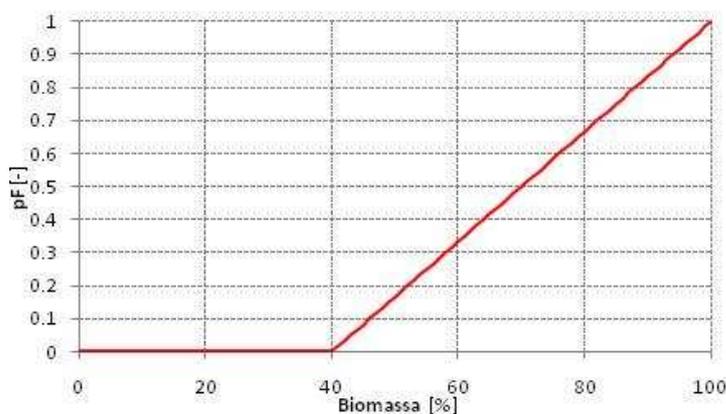


Figura 8.1. Andamento della probabilità di fuoco all'interno del modello minimale STGD

Qualora l'incendio si verifichi, la biomassa viene bruciata in toto ( $D=0$  nel codice) e la copertura arborea viene diminuita del 30% ( $T=kT_0$ ).

Si puntualizza che l'espressione che regola l'andamento della  $p_F$  è opinabile e anzi, nel paragrafo successivo verranno confrontati risultati di simulazioni caratterizzate da diversi coefficienti angolari della funzione  $p_F$  per mostrare la diversa dinamica del sistema che ne scaturisce.

## 8.4 Simulazioni di scenario

Dopo aver esposto la teoria del modello, si è proceduto a simulare l'andamento della copertura alberi-erba durante i 101 anni di simulazione in assenza e in presenza di incendi per entrambi i siti di analisi (Skukuza e Lesotho).

### 8.4.1 Simulazione in assenza di incendi

Dopo aver esposto la teoria del modello, si è proceduto a simulare l'andamento della copertura alberi-erba durante i 101 anni di simulazione. Nel riportare i risultati di tale analisi, è stato mantenuto lo stesso schema espositivo del paragrafo 7.4 ovvero dapprima, per riuscire ad evidenziare in modo chiaro come l'andamento dell'erba sia fortemente legato all'umidità del suolo e quindi alla precipitazione, si è costruita una "precipitazione artificiale" ciclica per ognuno dei due siti in analisi, replicando il ciclo mensile riportato in Figura 4.10 tante volte quanti sono gli anni di simulazione, ovvero 101. In seguito, si è posta dunque tale serie ciclica di precipitazione in ingresso al modello Eq. (8.1) implementato in Matlab 7.10 e si è studiato l'andamento dell'umidità del suolo, della copertura arborea ed erbosa integrando le equazioni del sistema. I parametri utilizzati assumono valori riportati in Tabella 8.1, mentre le condizioni iniziali di copertura, per permettere l'integrazioni delle variabili, sono state: 0 per l'umidità del suolo in entrambi i siti, 66% di copertura erbosa e 20% di copertura arborea nel sito Skukuza, mentre 70% di copertura erbosa e 9% di copertura arborea per Lesotho. I valori di copertura vegetale sono state ottenute da dati satellitari MODIS.

Tabella 8.1. Parametri utilizzati nella simulazione del modello minimale STGD

<b>Simboli</b>	<b>Unità</b>	<b>Valore</b>
<b>z</b>	m	0.628
<b>n</b>	-	0.55
<b><math>\epsilon</math></b>	yr <sup>-1</sup>	20
<b><math>\tau_T</math></b>	yr <sup>-1</sup>	50
<b><math>\tau_G</math></b>	yr <sup>-1</sup>	10
<b><math>\gamma_T</math></b>	yr <sup>-1</sup>	0.2
<b><math>\gamma_G</math></b>	yr <sup>-1</sup>	200
<b><math>\delta_T</math></b>	yr <sup>-1</sup>	0.02
<b><math>\delta_G</math></b>	yr <sup>-1</sup>	2.8
<b>w<sub>T</sub></b>	-	0.065
<b>w<sub>G</sub></b>	-	0.04
<b><math>\delta_w</math></b>	yr <sup>-1</sup>	20
<b><math>\phi</math></b>	yr <sup>-1</sup>	720
<b>k</b>	-	1
<b><math>\delta_D</math></b>	yr <sup>-1</sup>	0.2

Per il sito di Skukuza in Figura 8.2 è riportato l'andamento della copertura vegetale associato all'andamento ciclico della precipitazione, mentre in Figura 8.3 la medesima analisi è stata fatta anche sul sito di Lesotho.

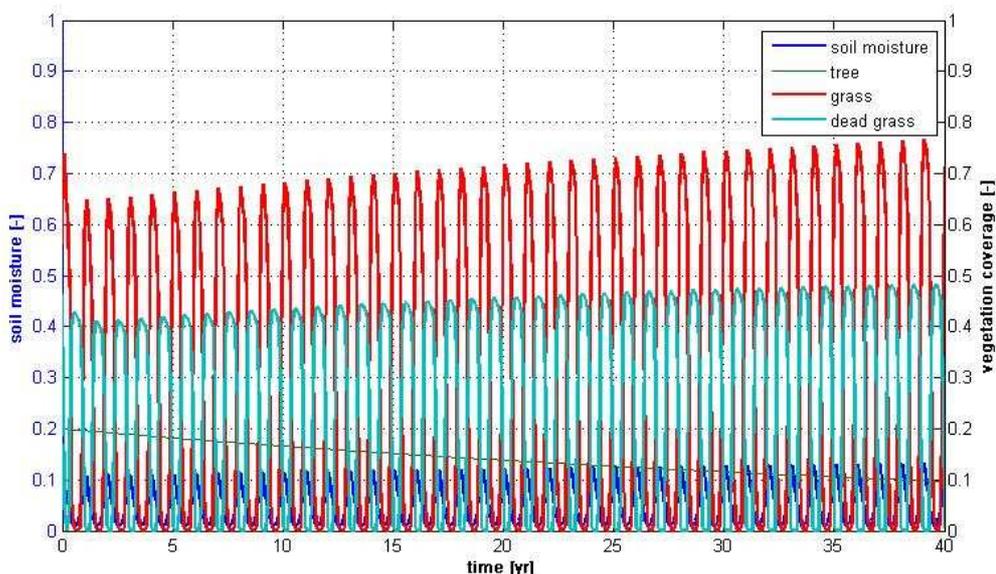


Figura 8.2 Andamento di umidità del suolo-alberi-erba-biomassa con precipitazione ciclica nel sito di Skukuza con modello STGD. Zoom da 0 a 40 anni di simulazione.

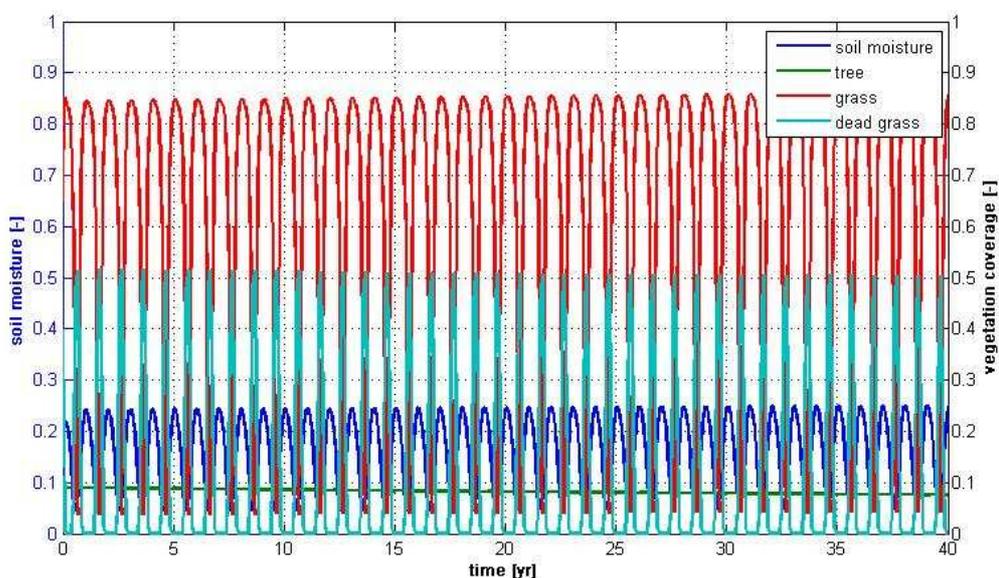


Figura 8.3 Andamento di umidità del suolo-alberi-erba-biomassa con precipitazione ciclica nel sito di Lesotho con modello STGD. Zoom da 0 a 40 anni di simulazione.

Quello che si può notare è evidentemente che, con l'inserimento dell'equazione relativa alla biomassa secca, è possibile seguire l'andamento stagionale della precipitazione e quindi la dinamica dell'umidità del suolo ad essa correlata. Si noti infatti come ai picchi positivi

dell'umidità del suolo corrispondano quelli dell'erba, mentre ai valori più bassi di umidità del suolo corrispondano alti valori di biomassa secca.

Le medesime simulazioni sono state fatte ponendo come forzante al modello la precipitazione reale di scenario per entrambi i siti. Ciò che si è ottenuto è riportato in Figura 8.4 per il sito di Skukuza, 8.5 per il sito di Lesotho.

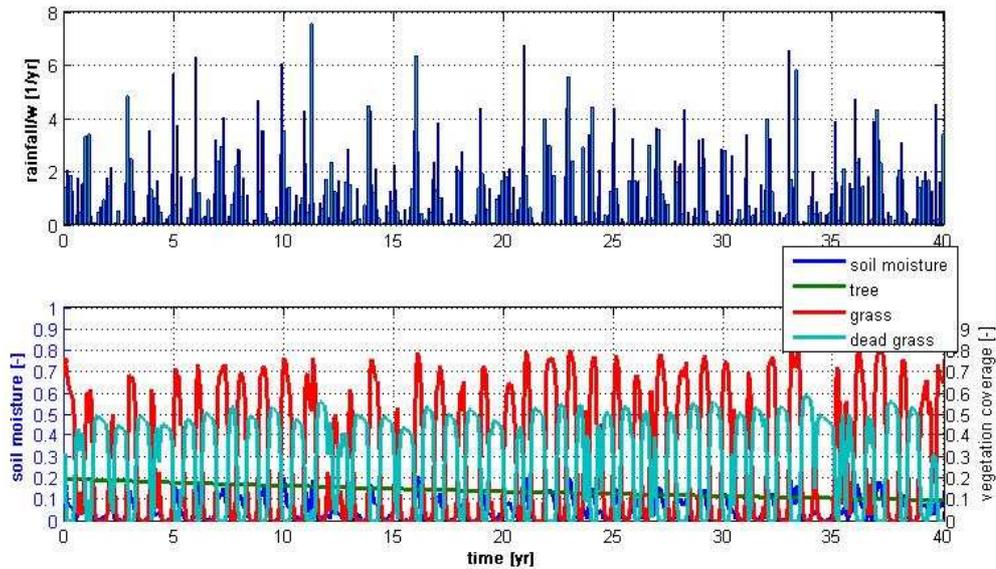


Figura 8.4 Andamento di umidità del suolo-alberi-erba-biomassa con precipitazione reale di scenario nel sito di Skukuza con modello STGD. Zoom da 0 a 40 anni di simulazione.

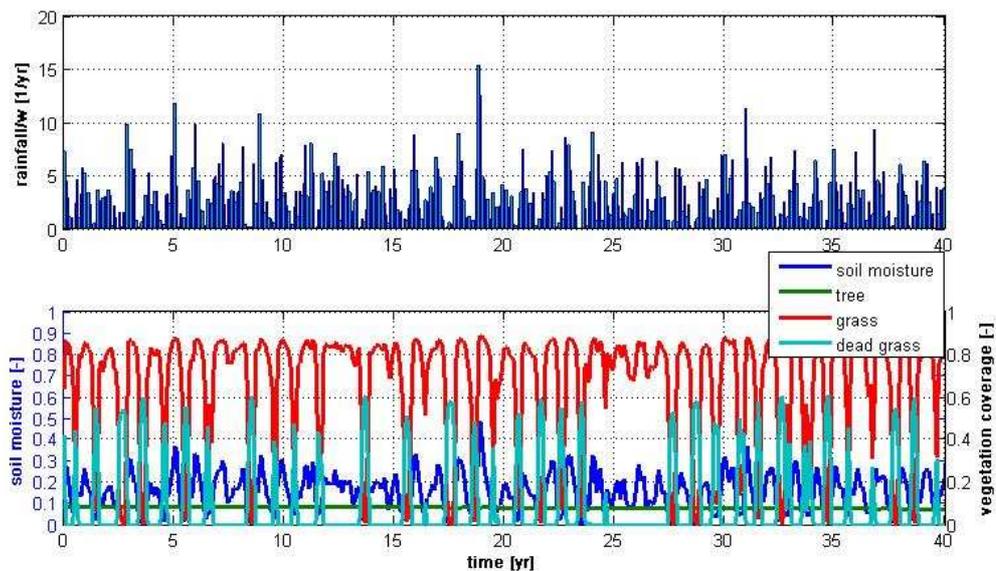


Figura 8.5 Andamento di umidità del suolo-alberi-erba-biomassa con precipitazione reale di scenario nel sito di Lesotho con modello STGD. Zoom da 0 a 40 anni di simulazione.

Questo tipo di analisi è sicuramente più coerente con la realtà: infatti il susseguirsi di cicli di erba e biomassa secca rispecchiano perfettamente l'alternarsi della stagione secca e di quella umida così evidenti nei climi sub tropicali. Tuttavia, si sono notate anomalie fisiche dovute ai "cicli mancati" da parte dell'erba: nel caso infatti che l'umidità del suolo nel corso della stagione secca non assuma valori inferiori al punto di appassimento, l'erba non diventa secca. Questo di fatto non si verifica nella realtà.

Inoltre, manca ancora l'inserimento di una forzante naturale importantissima: gli incendi. Nel prossimo paragrafo si inserisce tale forzante che entra in gioco però solo quando si è accumulata abbastanza biomassa.

### **8.4.2 Simulazione con incendi**

Come detto nell'introduzione di questo capitolo, l'insorgenza di un incendio e la sua propagazione dipendono fortemente dalla presenza di sufficiente massa erba secca che costituisce una ricarica di combustibile : l'incendio può infatti innescarsi solo dopo un adeguato numero di giorni caratterizzati da scarsa piovosità e bassa presenza di erbivori, cosicché si accumuli sufficiente biomassa derivante da erba (Bond e van Wilgen, 1996).

Si è proceduto alla simulazione del modello inserendo la forzante fuoco all'interno del codice implementato in Matlab. Dapprima si è utilizzata una funzione di  $p_F$  come in Fig. 8.1 e lo stesso set di parametri riportato in Tab. 8.1 e con le stesse condizioni iniziali utilizzate nelle precedenti simulazioni. Le simulazioni che utilizzano come forzante la precipitazione artificiale ciclica sono riportate in Fig.8.6 per il sito di Skukuza e in Fig. 8.7 per il sito di Lesotho.

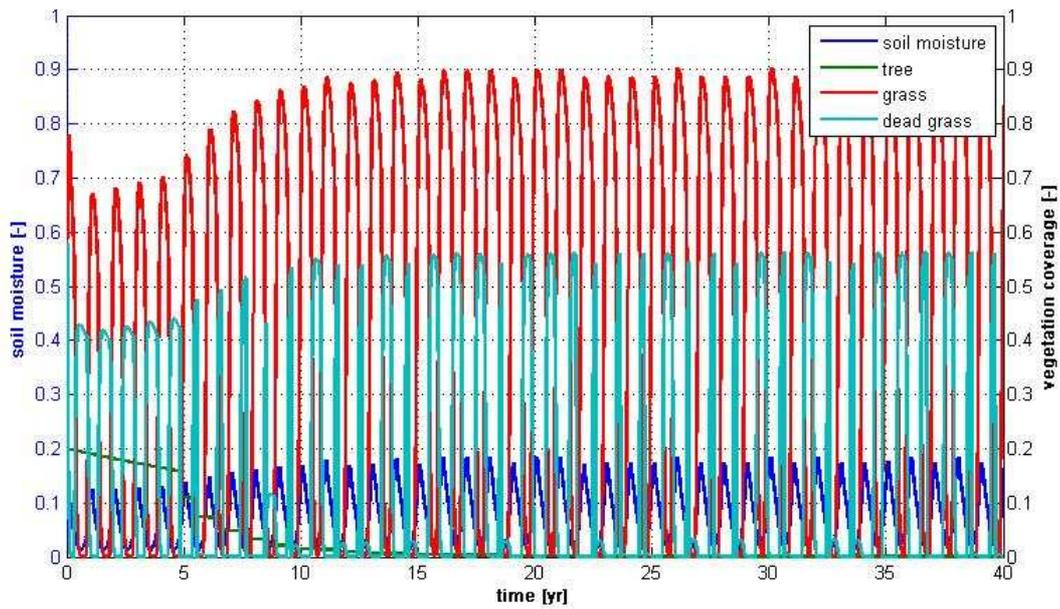


Figura 8.6 Andamento di umidità del suolo-alberi-erba-biomassa con precipitazione ciclica nel sito di Skukuza con modello STGD.  $p_F$  è assunta nulla fino a che la biomassa non raggiunge il 40% di copertura. Poi cresce linearmente con essa. Zoom da 0 a 40 anni di simulazione.

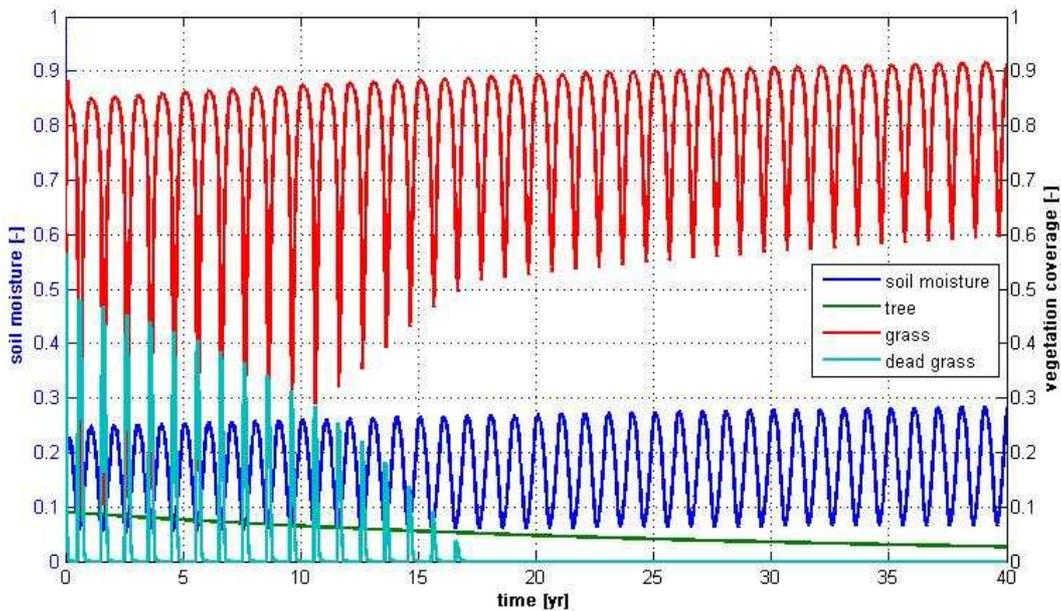


Figura 8.7 Andamento di umidità del suolo-alberi-erba-biomassa con precipitazione ciclica nel sito di Lesotho con modello STGD.  $p_F$  è assunta nulla fino a che la biomassa non raggiunge il 40% di copertura. Poi cresce linearmente con essa. Zoom da 0 a 40 anni di simulazione.

La medesima analisi è stata effettuata forzando il modello con la precipitazione reale di scenario. In Fig.8.8 sono riportate le dinamiche delle varie componenti nel sito Skukuza, mentre in Fig. 8.9 quelle relative a Lesotho.

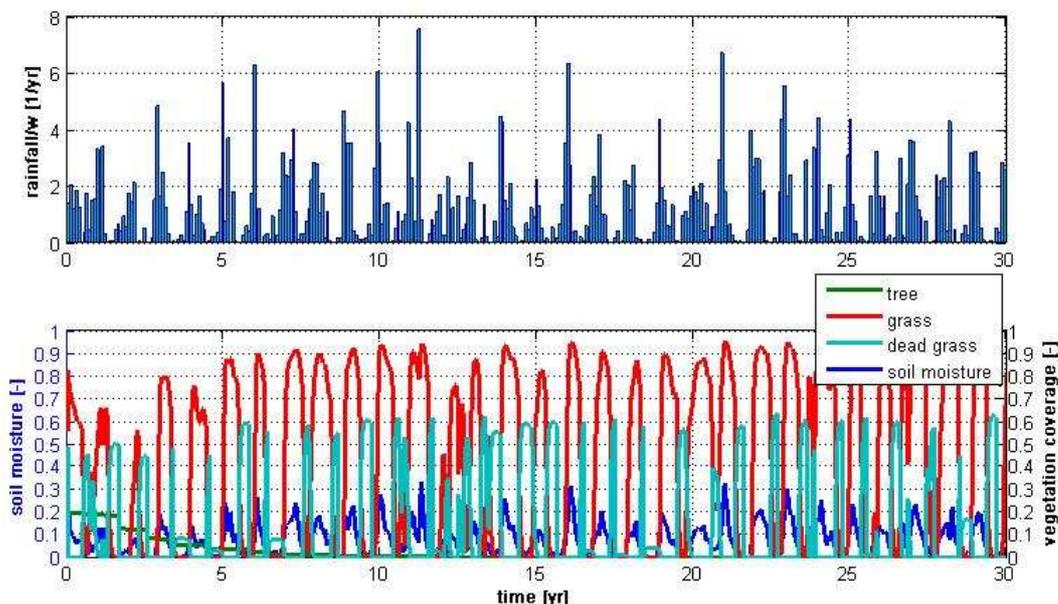


Figura 8.8 Andamento di umidità del suolo-alberi-erba-biomassa con precipitazione reale di scenario nel sito di Skukuza con modello STGD.  $p_F$  è assunta nulla fino a che la biomassa non raggiunge il 40% di copertura. Poi cresce linearmente con essa. Zoom da 0 a 30 anni di simulazione.

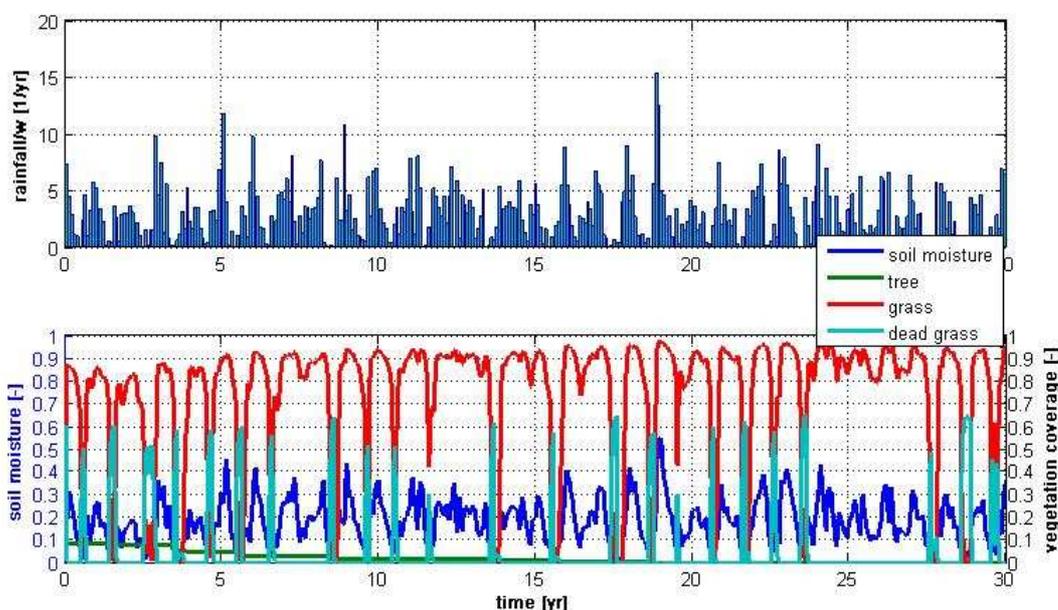


Figura 8.9 Andamento di umidità del suolo-alberi-erba-biomassa con precipitazione reale di scenario nel sito di Lesotho con modello STGD.  $p_F$  è assunta nulla fino a che la biomassa non raggiunge il 40% di copertura. Poi cresce linearmente con essa. Zoom da 0 a 30 anni di simulazione.

---

Nel caso di precipitazione resa artificialmente ciclica nel sito Skukuza, si nota un andamento piuttosto regolare di alternanza erba e biomassa con sporadici incendi. Il termine che sembra essere più inficiato dalla presenza di incendi è quello relativo alla copertura arborea: la presenza degli incendi si riscontra nella traiettoria decrescente che descrive la dinamica degli alberi nel tempo.

Per quanto riguarda invece il sito Lesotho, si nota un andamento molto differente dal precedente: dopo i primi 15 anni durante i quali l'erba ha un andamento ciclico alternato con quello della biomassa secca, la copertura erbosa oscilla intorno al suo valore di ciclo limite stazionario avendo nettamente la meglio sugli alberi (Fig.8.7). Ciò avviene perché l'umidità del suolo è caratterizzata da un andamento crescente: inizialmente, durante la stagione secca, tocca valori più bassi del punto di appassimento e dunque sono visibili cicli alternati di erba e biomassa, poi, poiché l'umidità del suolo si assesta su valori sempre più elevati del punto di appassimento dell'erba, non è più possibile secondo la logica del modello la trasformazione dell'erba in biomassa secca. Non essendoci più biomassa, non sono possibili incendi.

Ciò è fisicamente errato: la precipitazione infatti, pur essendo artificialmente costruita, presenta cicli marcati, così come di conseguenza, anche l'umidità del suolo; dunque i cicli di erba rigogliosa e biomassa secca dovrebbero essere sempre presenti costituendo l'essenza naturale della dinamica degli ecosistemi tropicali e sub tropicali. Tale problematica verrà ripresa in conclusione del capitolo e si proporrà un possibile approccio risolutivo.

Nel caso, infine, della precipitazione reale di scenario (Fig.8.8 e Fig.8.9) si potrebbero ripetere le medesime osservazioni dei casi precedenti, con l'unica differenza che i cicli sono più irregolari data l'irregolarità naturale della serie di precipitazione.

Al fine di analizzare le dinamiche delle varie componenti dei biomi in presenza di maggiore probabilità di incendi, si è modificata opportunamente la funzione di soglia, affinché la  $p_F$  fosse nulla fino a che la biomassa non copra il 20% della superficie, per poi crescere linearmente con essa. I risultati di tale analisi sono riportate in Figura 8.10 per il sito Skukuza, nel caso di modello forzato da precipitazione ciclica artificiale, mentre in Figura 8.11 per sito di Lesotho. I risultati del modello forzato da precipitazione reale di scenario sono riportate in Figura 8.12 per Skukuza e in Figura 8.13 per Lesotho

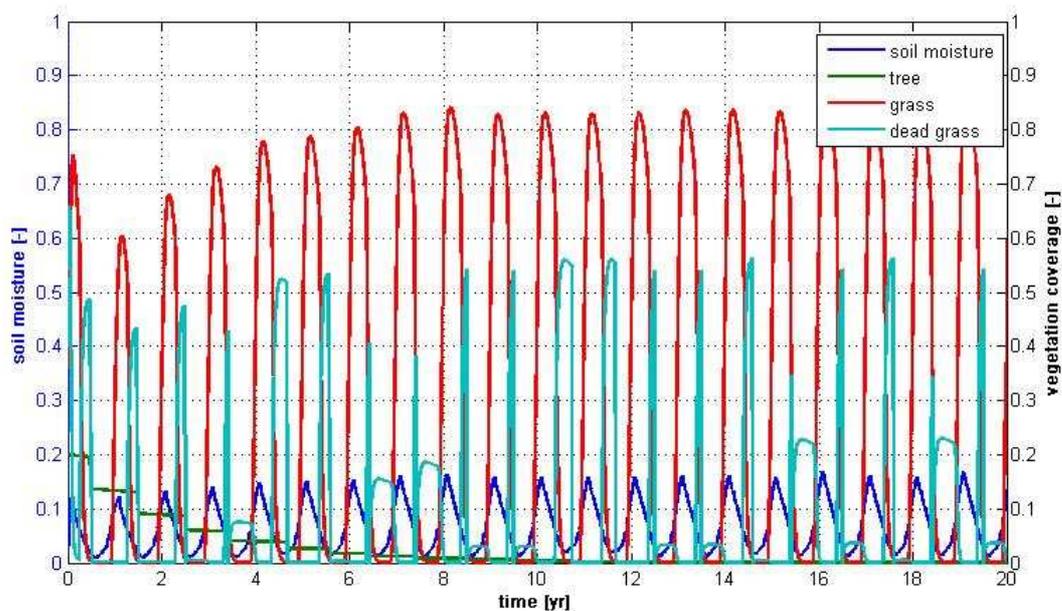


Figura 8.10 Andamento di umidità del suolo-alberi-erba-biomassa con precipitazione reale di scenario nel sito di Skukuza con modello STGD.  $p_F$  è assunta nulla fino a che la biomassa non raggiunge il 20% di copertura. Poi cresce linearmente con essa. Zoom da 0 a 20 anni di simulazione.

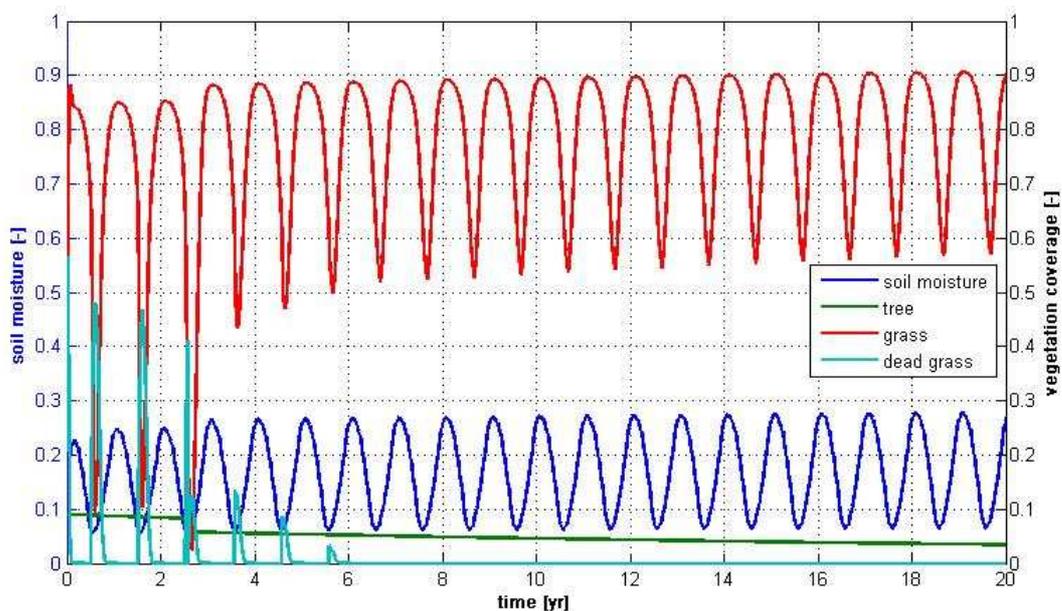


Figura 8.11 Andamento di umidità del suolo-alberi-erba-biomassa con precipitazione reale di scenario nel sito di Lesotho con modello STGD.  $p_F$  è assunta nulla fino a che la biomassa non raggiunge il 20% di copertura. Poi cresce linearmente con essa. Zoom da 0 a 20 anni di simulazione.

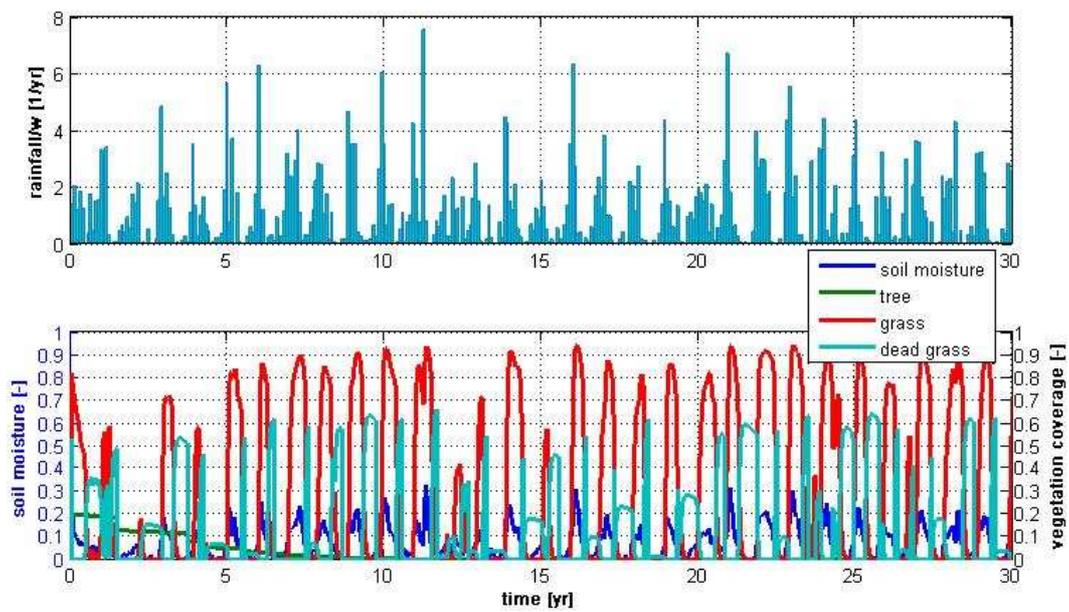


Figura 8.12 Andamento di umidità del suolo-alberi-erba-biomassa con precipitazione reale di scenario nel sito di Skukuza con modello STGD.  $p_F$  è assunta nulla fino a che la biomassa non raggiunge il 20% di copertura. Poi cresce linearmente con essa. Zoom da 0 a 20 anni di simulazione.

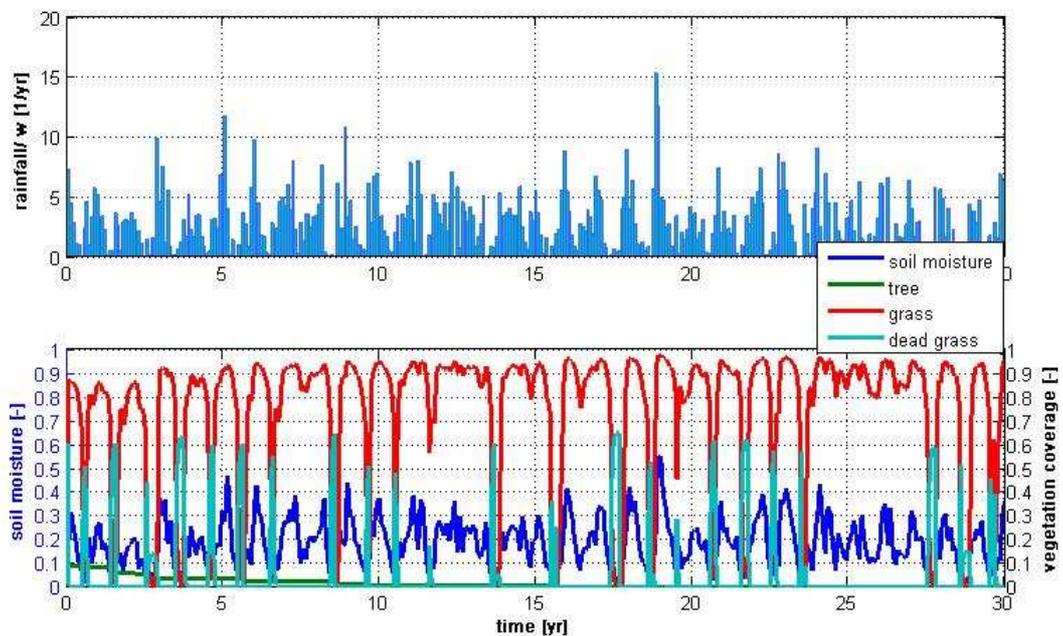


Figura 8.13 Andamento di umidità del suolo-alberi-erba-biomassa con precipitazione reale di scenario nel sito di Lesotho con modello STGD.  $p_F$  è assunta nulla fino a che la biomassa non raggiunge il 20% di copertura. Poi cresce linearmente con essa. Zoom da 0 a 20 anni di simulazione.

Come si può notare, nonostante la soglia di biomassa che alimenta gli incendi sia stata abbassata, la dinamica di alberi ed erba rimane la stessa descritta nei casi precedenti (ovvero con la soglia di  $p_F$  era posta al 40% di biomassa). Si nota, com'è naturale, una maggior presenza di incendi, dato che per la propagazione di quest'ultimo è sufficiente un accumulo di biomassa di minor "quantità" rispetto al caso precedente. Infine, anche in questa casistica di analisi, permane il problema di "mancata ciclicità" evidente soprattutto per il sito Lesotho (si veda ad esempio Fig 8.13).

## 8.5 Pregi e difetti del modello STGD

Il modello descritto in questo capitolo è indubbiamente più completo e realistico del modello minimale SGT: tramite l'inserimento dell'equazione relativa alla biomassa secca, infatti, è possibile trattare in modo più adeguato la forzante fuoco. Infatti non si simula più una presenza costante di incendio durante tutto l'anno, ma la forzante agisce solamente in presenza di sufficiente biomassa secca accumulata e dunque solo nella stagione secca. In questo modo dovrebbe essere possibile risolvere il problema di incongruenza tra modello minimale originario e realtà (si veda paragrafo 7.4), cogliere bene l'andamento stagionale della precipitazione e conseguentemente dell'umidità del suolo. Ciononostante, come è stato rilevato anche nel paragrafo 8.4, in alcune simulazioni si sono notate anomalie fisiche dovute ai "cicli mancati" da parte dell'erba. Questo problema dipende, principalmente, dalla difficile calibrazione dei parametri di appassimento  $w_G$  e  $w_T$  che determinano la soglia tra stagione secca e stagione umida: se essi assumono valori troppo elevati si rischia che l'umidità del suolo sia per la gran parte del tempo al di sotto del punto di appassimento e ciò implica un continuo accumulo di biomassa senza possibilità di ciclicità tra erba verde e erba secca; qualora siano posti ad un valore troppo basso, la biomassa non si genera quasi mai in quanto l'umidità del suolo rimane sempre al di sopra di tale soglia. In entrambi i casi non si coglie bene la giusta e corretta dinamica ciclica dell'ecosistema che segue l'alternarsi delle stagioni. E' dunque evidente la presenza di un'incongruenza tra i parametri utilizzati nel modello:  $w_G$  e  $w_T$  misurabili in campo e fisicamente basati, e il resto del set dei parametri calibrati come spiegato in paragrafo 8.3.4.

Per questo motivo, nel capitolo 9 si prospetta una possibile soluzione alla problematica appena esposta, tramite la formulazione di un modello discreto.

---

# CAPITOLO 9

## MODELLO MINIMALE

### DISCRETO

In questo capitolo si tenterà di dare una soluzione alle problematiche esposte in conclusione ai capitoli 7 e 8 relativamente all'utilizzo dei modelli minimali STG e STGD. Al fine di porre rimedio alle anomalie fisiche dovute ai "cicli mancati" da parte dell'erba evidenziate nelle simulazioni del modello STGD, si forzerà stagionalmente il modello, considerando le dinamiche di erba e alberi giunte al loro equilibrio e dunque trattabili secondo una logica discreta. Data la semplicità delle equazioni, sembra essere un modello facilmente trattabile analiticamente e che possa risolvere la troppa aleatorietà dei parametri da calibrare per il modello descritto nel capitolo 8. Certamente la forma facilmente trattabile del modello implica delle semplificazioni e assunzioni di base che però a modesto avviso non rendono il modello totalmente avulso dalla realtà.

Tale tipo di modello, è idoneo per l'analisi delle *savane umide* all'interno delle quali il fuoco ha notevole importanza: se gli incendi fossero assenti, esse tenderebbero trasformarsi in foreste, viceversa con la presenza di incendi si preclude alla popolazione arborea la possibilità di colonizzare il territorio ad alte densità permettendo la coesistenza tra erba ed alberi. Poiché in tale logica, il fuoco diventa il "motore" dell'ecosistema, è lecito trascurare il legame tra precipitazione e dinamiche della vegetazione.

### 9.1 Il fenomeno in luce: la stagionalità

La marcata stagionalità che caratterizza il regime pluviometrico nei biomi tropicali e subtropicali, ha come diretta conseguenza una netta distinzione tra la dinamica della vegetazione durante la stagione umida e dinamica della stessa durante la stagione secca. In

particolare, come rilevato nel Capitolo 8, la copertura erbosa, durante la stagione umida, è caratterizzata da una forte crescita, mentre, durante la stagione secca, ingiallisce convertendosi in biomassa secca. Gli alberi, sono anch'essi caratterizzati da una crescita durante la stagione umida, mentre durante la stagione secca la crescita subisce una fase di arresto.

Per questo motivo, si è deciso di discretizzare l'anno in 2 stagioni che si alternano: la stagione umida e la stagione secca. Uno schema esemplificativo del modello è riportato in Figura 9.1.

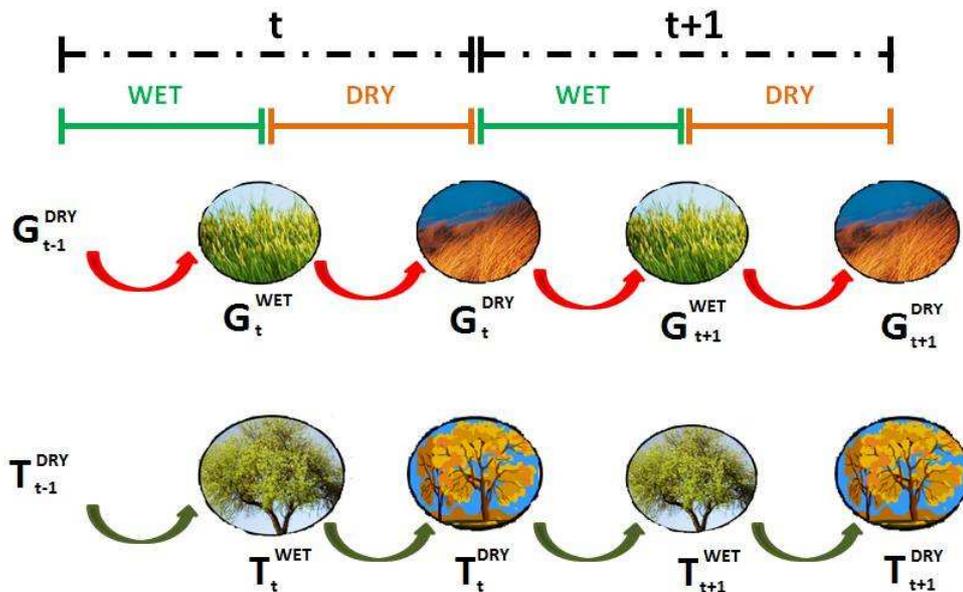


Figura 9.1 Schema del modello discreto. A titolo esemplificativo è mostrata la dinamica di alberi ed erba per 2 anni ma l'analoga sequenza può essere ripetuta per un qualsivoglia numero di anni.  $G_0$  e  $T_0$  sono le condizioni iniziali rispettivamente di copertura erbosa e arborea,  $G$  sta per "Grass",  $D$  per "Dead Grass" e  $T$  per "Tree".

Come nei modelli minimali STG e STGD, anche nel meccanismo del suddetto modello discreto la forzante fuoco ha un ruolo determinante. Come si è detto, infatti, l'erba, nella stagione secca, ingiallisce e diventa biomassa secca, ottimo combustibile per la propagazione degli incendi. Proprio per questa ragione, si è deciso ragionevolmente di inserire la forzante fuoco solo durante la stagione secca.

La probabilità di innesco di un incendio,  $p_F$ , è stata modellizzata attraverso una funzione della biomassa analogamente a quanto fatto nel Capitolo 8 (Fig.8.1).

Dunque, in sintesi, la stagione umida è caratterizzata da crescita sia di copertura erbosa che di quella arborea, viceversa durante la stagione secca si prospettano due diverse situazioni: se non avvengono incendi, l'erba convertita in biomassa si accumula incrementando così la probabilità di propagazione dell'incendio durante la stagione secca successiva mentre la crescita degli alberi subisce una fase di stallo, se invece l'incendio riesce a propagarsi, la

---

biomassa secca viene completamente bruciata mentre si ipotizza che la copertura arborea, a causa delle fiamme, diminuisca di una certa percentuale ( $T=qT_0$  con  $q=0.7$  nel modello).

## 9.2 Il modello

Nei seguenti paragrafi, verrà analizzato il modello nella sua formulazione analitica.

Le ipotesi assunte dal modello sono le seguenti:

- Precipitazione costante all'interno della stagione umida e secca
- La copertura erbosa giunge allo stato stazionario nella stagione umida
- Alberi ed erba sono caratterizzati da un andamento logistico
- Nella stagione umida predomina la crescita
- Nella stagione secca predomina la decrescita e l'appassimento

Il modello è implementato in Matlab 7.10 attraverso la stesura di un apposito codice.

### 9.2.1 Le equazioni del modello

Come detto nelle ipotesi, si assume che la dinamica della copertura arborea abbia andamento di tipo logistico, descritta dunque dall'Eq.(9.1):

$$T_t^{WET} = (r + 1)(T_{t-1}^{DRY} - \left(\frac{r}{r+1}\right) \frac{1}{k} T_{t-1}^{DRY^2}) \quad (9.1)$$

Per giungere all'equazione che regoli la dinamica erbosa, si faccia riferimento all'equazione di Tilman (1994) riportata in Eq.(9.2):

$$\frac{dG}{dt} = \gamma_G G(1 - G - T) - gG \quad (9.2)$$

Poiché in Eq (9.1)  $T$ , che è il competitore superiore, è considerato costante a fine stagione, è possibile calcolare la copertura erbosa ad ogni passo temporale discreto come illustrato in Eq.(9.3) :

$$\frac{dG}{dt} = 0 \quad \rightarrow \quad \gamma_G G(1 - G - T) - gG = 0 \quad \rightarrow \quad G(\gamma_G - \gamma_G G - \gamma_G T - g) = 0 \quad (9.3)$$

Si ottengono così i due stati stazionari:

$$\begin{cases} G = 0 \\ G = \frac{\gamma_G - \gamma_G T - g}{\gamma_G} \end{cases} \quad (9.4)$$

Dalla seconda equazione del sistema (9.4) si ottiene infine l'equazione utilizzata per modellizzare la dinamica dell'erba:

$$G = 1 - T - \frac{g}{\gamma_G} \quad (9.5)$$

In Eq. (9.5),  $T$  [-] rappresenta la frazione di area occupata dagli alberi,  $g$  [1/yr] indica il tasso di mortalità dell'erba e infine  $\gamma_G$  [1/yr] è il tasso di massima colonizzazione per l'erba.

Il passo temporale con il quale di volta in volta il modello simula l'andamento della vegetazione, è costituito dalla stagione. Limitando, in un certo senso, la validità delle equazioni ad un intervallo ben preciso, confinato temporalmente e caratterizzato da proprietà simili e omogenee (ad esempio temperatura, precipitazione, ecc.), si pensa sia possibile seguire con maggior precisione le dinamiche della vegetazione.

Più specificatamente, per la stagione umida, l'equazioni per valutare l'andamento della copertura erbosa ed arborea sono riportate nell'Eq.(9.6)

$$\begin{cases} T_t^{WET} = (r + 1)(T_{t-1}^{DRY} - \left(\frac{r}{r+1}\right) \frac{1}{k} T_{t-1}^{DRY^2}) \\ G_t^{WET} = 1 - T_t^{WET} - \frac{g}{\gamma_G} \end{cases} \quad (9.6)$$

Mentre per la stagione secca, viene introdotta la forzante "incendio" con una probabilità di accadimento  $p_F$  descritto da una funzione come riportato in Figura 8.1. Dunque si hanno due diversi set di equazioni:

- in presenza di incendio

$$\begin{cases} T_t^{DRY} = 0.7 T_t^{WET} \\ G_t^{DRY} = 0 \end{cases} \quad (9.7)$$

- in assenza di incendio

$$\begin{cases} T_t^{DRY} = B_d T_t^{WET} \\ G_t^{DRY} = D \end{cases} \quad (9.8)$$

Nell'Eq.(9.8),  $D$  [-] indica la frazione d'area coperta da biomassa secca ed è ottenuta pari al valore di copertura erbosa presente nella stagione umida immediatamente precedente moltiplicata per un fattore riduttivo  $k$  ( $D = kG_t^{WET}$ ).

Un'ulteriore annotazione riguarda la precipitazione: essa, come detto nell'introduzione al capitolo, non viene espressamente introdotta come forzante del suddetto modello, ma verrà simulata la dinamica della vegetazione utilizzando come unica forzante il "fuoco". L'introduzione della precipitazione nella logica del modello potrebbe costituire uno sviluppo futuro come verrà spiegato nel paragrafo 9.5.

## 9.2.2 Valore dei Parametri

Nella Tabella 9.1 si riportano i parametri utilizzati per le simulazioni descritte nel paragrafo 9.4. Le condizioni iniziali di copertura dell'area analizzata sono state fissate al 10% di copertura da parte degli alberi e 40% da parte dell'erba.

Tabella 9.1 Valori dei parametri utilizzati nel modello discreto

<b>Simboli</b>	<b>Unità</b>	<b>Valori</b>
<b>g</b>	1/yr	4
<b><math>\gamma_G</math></b>	1/yr	200
<b>k</b>	-	0.9
<b>B<sub>D</sub></b>	-	0.99

## 9.3 Simulazioni

Si sono simulate le dinamiche di copertura erbosa ed arborea per 101 anni, utilizzando quattro differenti simulazioni corrispondenti a quattro diverse funzioni soglia per la probabilità di incendio  $p_F$ . In Figura 9.2 è mostrato l'andamento delle funzioni che descrivono le diverse  $p_F$ . Ciascuna simulazione è stata replicata mutando le condizioni iniziali: Nelle Figure 9.3, 9.5, 9.7, 9.9 sono rappresentati i risultati delle differenti simulazioni corrispondenti rispettivamente alla  $p_{F1}$ ,  $p_{F2}$ ,  $p_{F3}$  e  $p_{F4}$  con condizioni iniziali di copertura arborea pari al 20% ed erbosa al 66% (Skukuza), mentre le figure 9.4, 9.6, 9.8, 9.10 rappresentano i risultati delle differenti simulazioni corrispondenti rispettivamente alla  $p_{F1}$ ,  $p_{F2}$ ,  $p_{F3}$  e  $p_{F4}$  con condizioni iniziali di copertura arborea pari al 9% ed erbosa al 70% (Lesotho).

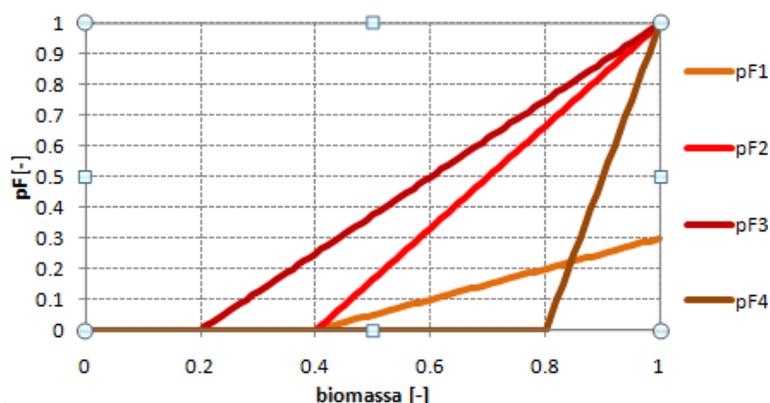


Figura 9.2 Andamento delle differenti  $p_F$  utilizzate nelle simulazioni.

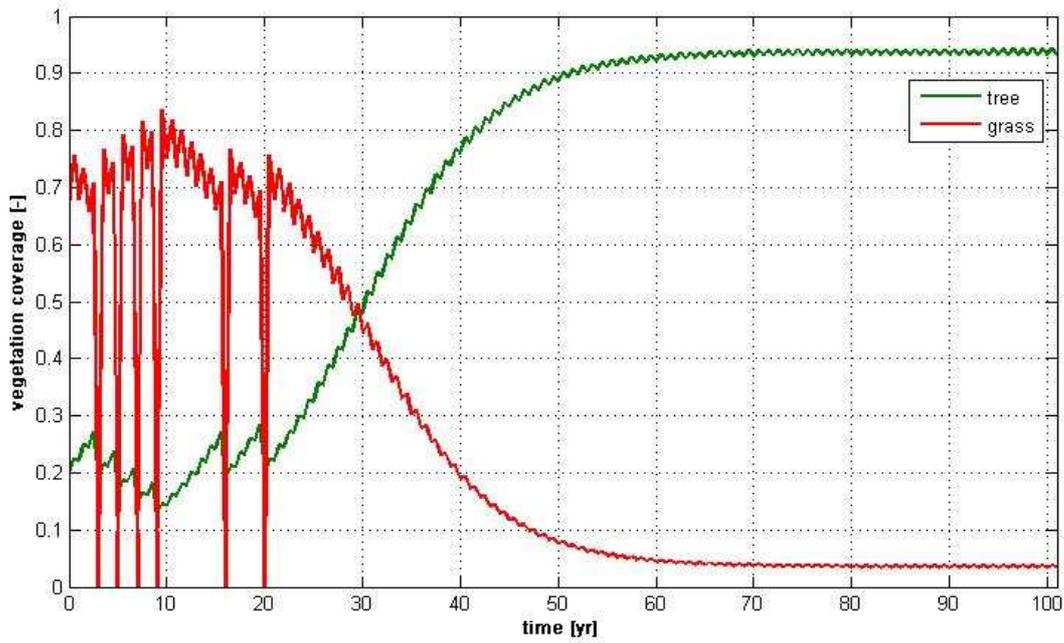


Figura 9.3 Andamento della dinamica alberi-erba in presenza di incendi con probabilità descritta dalla funzione  $p_{Fi}$  rappresentata in Fig.9.2. Modello discreto. Condizioni iniziali:  $T=0.2$  e  $G=0.66$ .

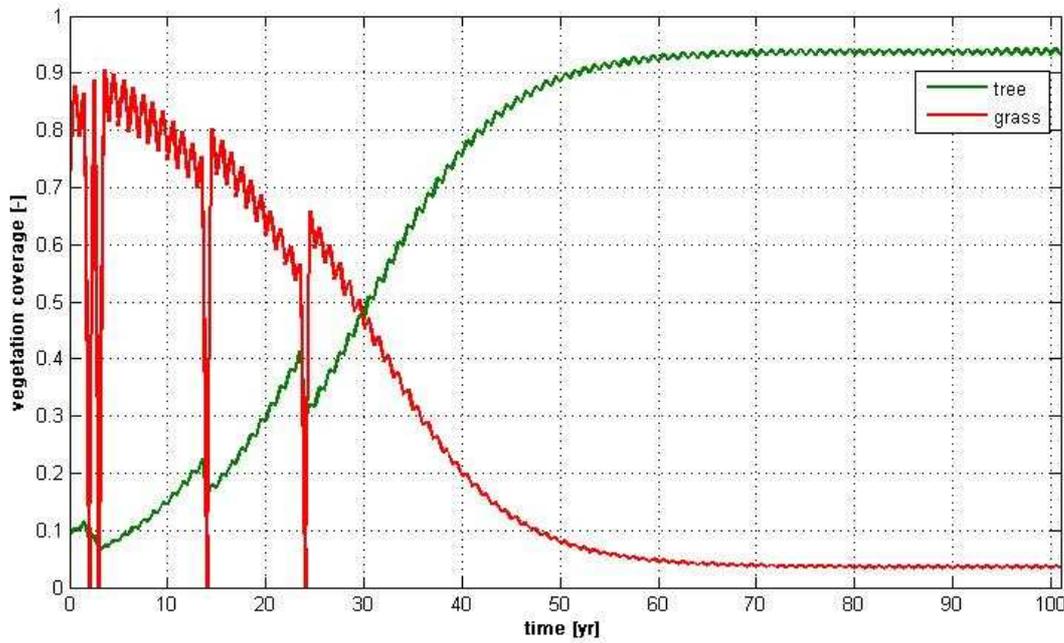


Figura 9.4 Andamento della dinamica alberi-erba in presenza di incendio con probabilità descritta dalla funzione  $p_{Fi}$  rappresentata in Fig.9.2. Condizioni iniziali:  $T=0.09$  e  $G=0.7$ .

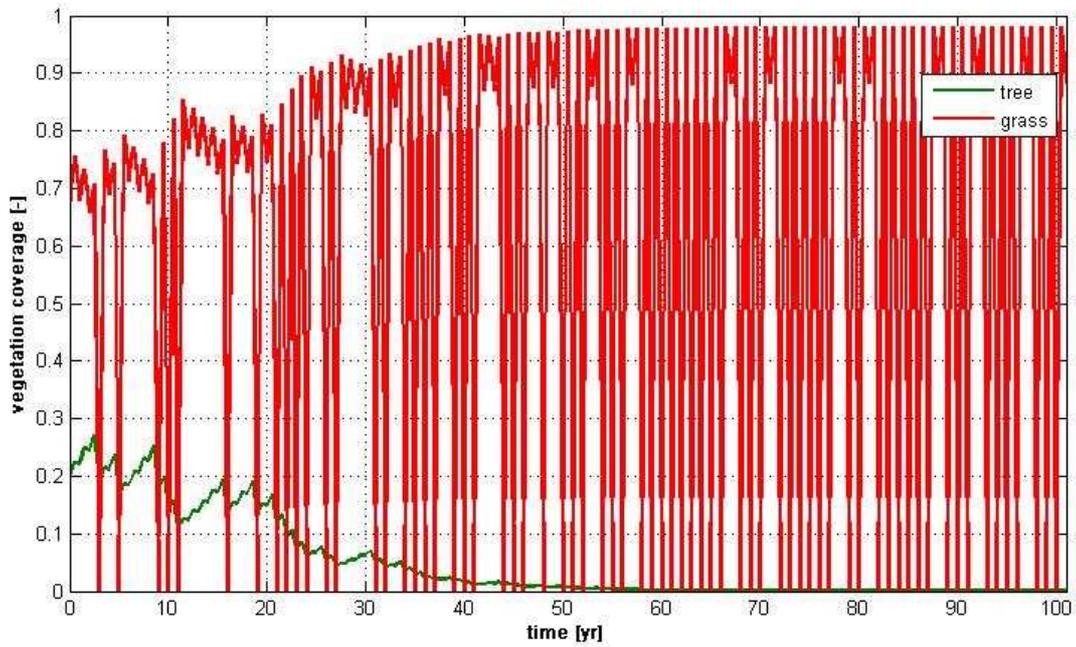


Figura 9.5 Andamento della dinamica alberi-erba in presenza di incendio con probabilità descritta dalla funzione  $p_{F_2}$  rappresentata in Fig.9.2. Modello discreto. Condizioni iniziali:  $T=0.2$  e  $G=0.66$ .

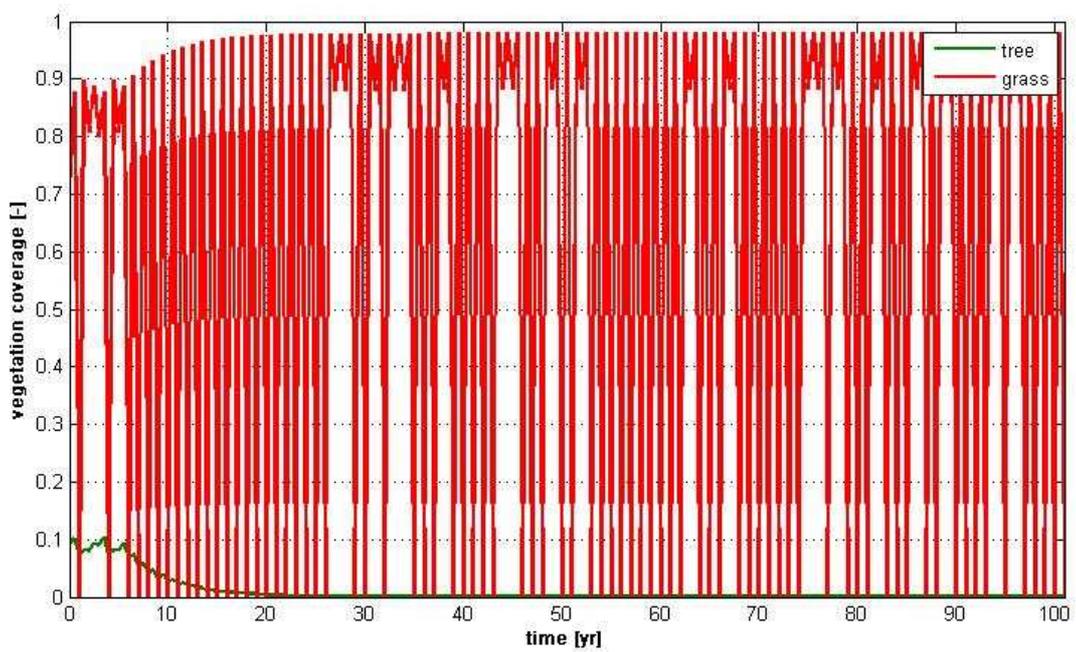


Figura 9.6 Andamento della dinamica alberi-erba in presenza di incendio con probabilità descritta dalla funzione  $p_{F_2}$  rappresentata in Fig.9.2. Condizioni iniziali:  $T=0.09$  e  $G=0.7$ .

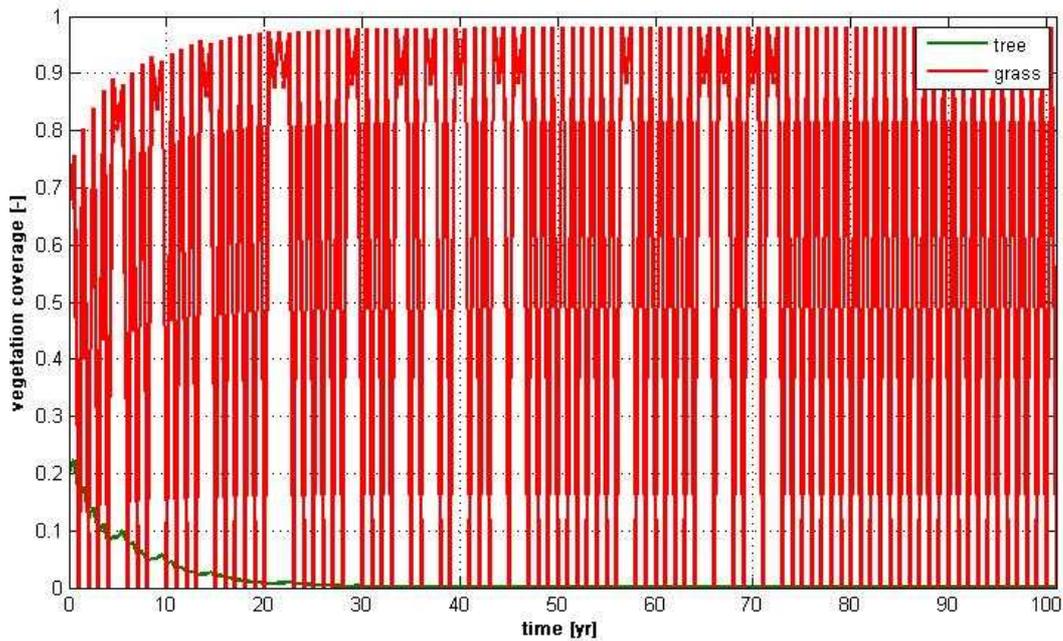


Figura 9.7 Andamento della dinamica alberi-erba in presenza di incendio con probabilità descritta dalla funzione  $p_{F3}$  rappresentata in Fig.9.2. Modello discreto. Condizioni iniziali:  $T=0.2$  e  $G=0.66$ .

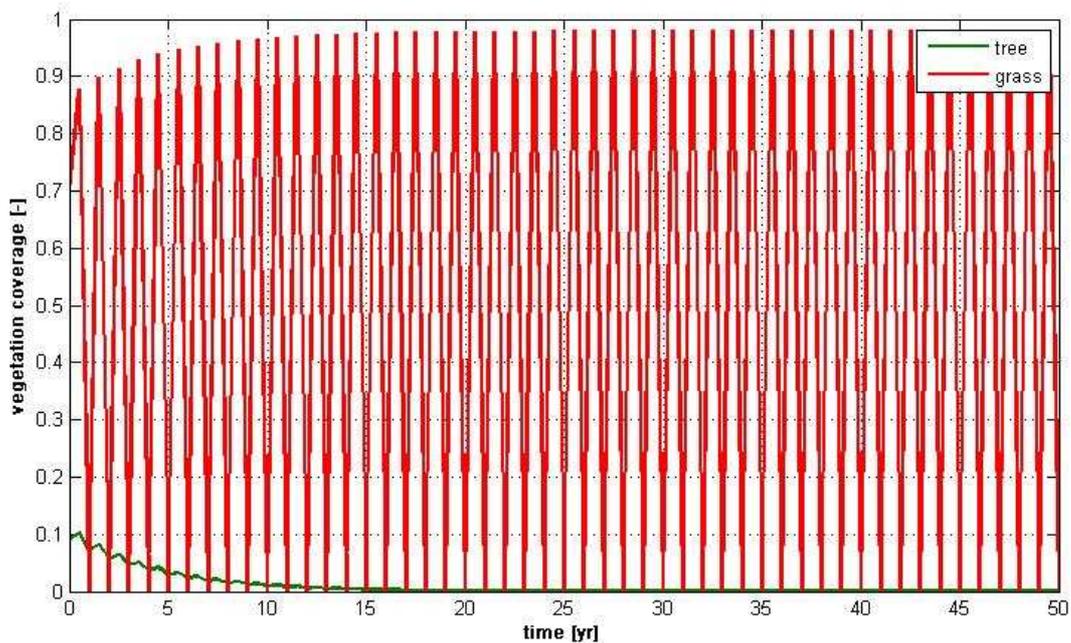


Figura 9.8 Andamento della dinamica alberi-erba in presenza di incendio con probabilità descritta dalla funzione  $p_{F3}$  rappresentata in Fig.9.2. Modello discreto. Condizioni iniziali:  $T=0.09$  e  $G=0.7$ . Zoom fino a 50esimo anno di simulazione.

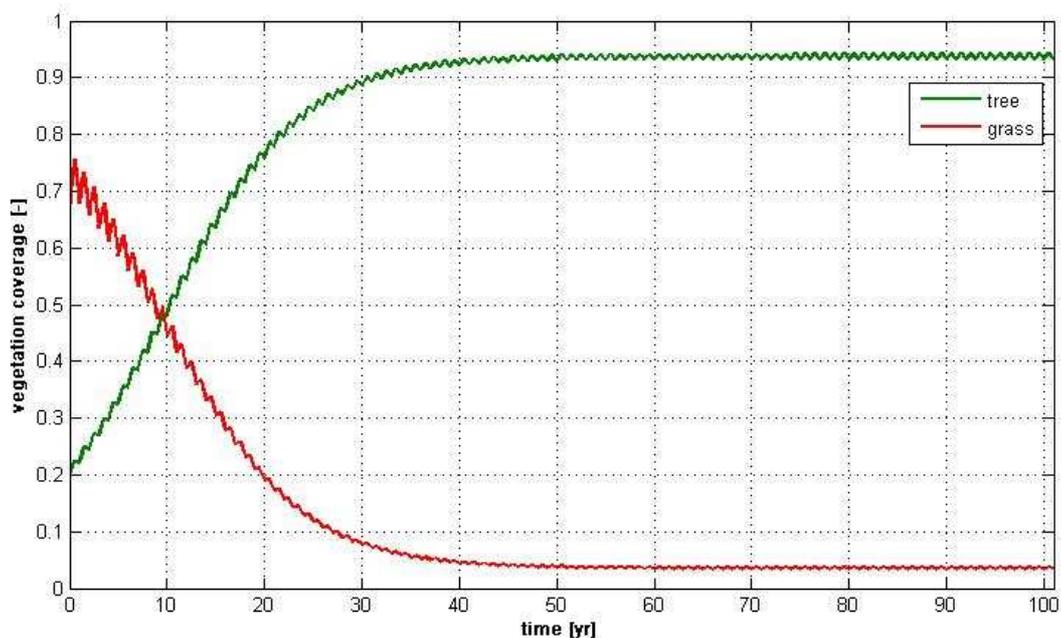


Figura 9.9 Andamento della dinamica alberi-erba in presenza di incendio con probabilità descritta dalla funzione  $p_{FA}$  rappresentata in Fig.9.2. Modello discreto. Condizioni iniziali:  $T=0.2$  e  $G=0.66$ .

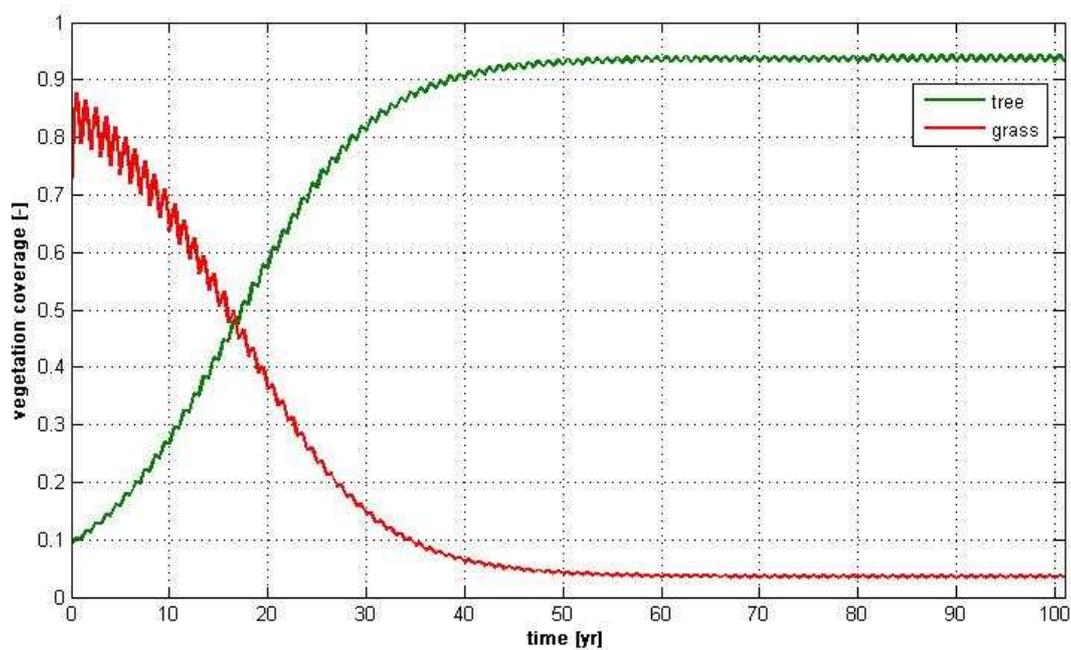


Figura 9.10 Andamento della dinamica alberi-erba in presenza di incendio con probabilità descritta dalla funzione  $p_{FA}$  rappresentata in Fig.9.2. Modello discreto. Condizioni iniziali:  $T=0.09$  e  $G=0.7$ .

Le Figure 9.3 e 9.4 rappresentano la dinamica della copertura del suolo in presenza di una probabilità di incendio con soglia di un valore medio (infatti la  $p_F$  è nulla fino ad un valore pari a 0.4 )per poi crescere con una bassa pendenza in funzione della biomassa secca presente: questo potrebbe essere verosimile per siti in cui nonostante l'incendio potrebbe propagarsi con relativa facilità per la presenza della biomassa, si instaurano delle condizioni che rendono più difficoltoso l'innescò dell'incendio (ad esempio temperatura, umidità, ecc..). In questo caso, si contano 6 incendi in Figura 9.3 e 4 incendi in Figura 9.4 in simulazione di 101 anni; a causa dell'incendio, l'erba viene totalmente "abbattuta", mentre la copertura arborea è ridotta, secondo i parametri utilizzati nella simulazione del 30%. Per questo motivo nella stagione umida successiva, la copertura dovuta all'erba sarà caratterizzata da un valore maggiore rispetto alla stagione umida precedente a causa dell'abbattimento parziale di parte della copertura arborea, che quindi "lascia spazio" all'erba.

Le Figure 9.5 e 9.6, 9.7 e 9.8 mostrano una dinamica erba-alberi fortemente influenzata dagli incendi, viceversa la Figura 9.9 rappresenta la una dinamica in cui, essendo la probabilità di propagazione di incendio molto bassa (soglia posta ad un valore di 0.8), gli incendi sono praticamente assenti e la copertura arborea ha la meglio sulla copertura erbosa.

Infine un'ulteriore osservazione può essere fatta circa le condizioni iniziali: come si può notare da tutto il set di simulazioni effettuate, le condizioni iniziali non influenzano in modo determinante le dinamiche della vegetazione; ovviamente il transitorio è più breve nel sito in cui la copertura arborea ha un valore molto più basso (Lesotho).

## 9.4 Pregi e difetti del modello discreto

Come si è potuto notare dalle simulazioni svolte, un modello siffatto permette sicuramente di seguire al meglio la dinamica della vegetazione, riuscendo a modellizzarne bene i periodi di crescita, limitati entro la stagione umida, e le fasi di stallo, nella stagione secca. Inoltre, la formulazione discretizzata per stagioni, permette di confinare la forzante "fuoco" solo ed esclusivamente in un intervallo limitato di tempo all'interno dell'anno, ovvero nella stagione secca, consentendo così una maggiore verosimiglianza del fenomeno così per come accade nella realtà.

Per contro, si deve però rilevare che non è stata inserita nel modello una relazione che legghi la dinamica di crescita di erba ed alberi nella stagione umida alla precipitazione in situ. Questo tema, potrebbe costituire sicuramente un possibile input per sviluppi futuri del modello stesso.

Infine, nel modello si ipotizza che la copertura arborea sia costituita da alberi appartenenti alla stesso stadio di sviluppo; quest'ipotesi semplifica sicuramente la formulazione

---

matematica del modello ma può essere ulteriormente migliorata in futuro. Gli alberi piccoli, infatti, sono più vulnerabili agli incendi, dato che si trovano completamente nella zona in cui si sviluppa la fiamma. Viceversa gli alberi maturi sono investiti dall'incendio in misura minore, dal momento che le loro cortecce proteggono il nucleo principale della pianta e le gemme (le quali sono ancora quiescenti durante la stagione degli incendi) sono trattenute al di sopra della zona in cui si propaga la fiamma.

Per questo motivo si è pensato di modificare il modello discreto in modo tale da contemplare all'interno della componente arborea una verosimile suddivisione in classi d'età degli alberi.

## **CAPITOLO 10**

# **MODELLO MINIMALE DISCRETO A CLASSI D'ETÁ**

In questo capitolo si tenterà di dare una soluzione alle problematiche esposte in conclusione al capitolo 9 relativamente all'utilizzo del modello minimale discretizzato stagionalmente. L'approccio utilizzato è analogo a quello esposto nel capitolo 9 (ovvero si adotta sempre una discretizzazione temporale a livello stagionale), ma attraverso alcune modifiche nelle equazioni, si è cercato di rendere più verosimile l'interazione tra dinamica degli alberi e incendi. Poiché, infatti, gli incendi agiscono in misura diversa a seconda se gli alberi siano allo stadio di crescita avanzata oppure siano ancora giovani, si è pensato di suddividere la popolazione arborea in 3 classi d'età in modo tale da evidenziare, per ciascuno stadio di sviluppo, quale sia la corretta dinamica di interazione albero-fuoco.

### **10.1 Il fenomeno in luce: popolazioni strutturate in classi**

Le analisi sulla dinamica delle popolazioni di organismi con cicli di vita complessi è stato grandemente facilitato dallo sviluppo di modelli costituiti da matrici di proiezione, chiamate matrici di Leslie (Leslie 1945, 1948), per popolazioni strutturate in età e più in generale il modello di Lefkovitch (Lefkovitch, 1965, 1967) per popolazioni strutturate in classi o in taglie. Questi modelli sono applicati ad una grande varietà di popolazioni naturali (van Groenendael, 1988; Caswell, 1989). Tuttavia, la maggior parte di questi studi sono basati su modelli deterministici che assumono invarianza nel tempo e tassi di crescita costanti,

---

nonostante gli effetti delle variazioni temporale siano apparentemente significative in alcuni casi (Huenneke e Marks, 1987).

La teoria della demografia stocastica è stata sviluppata nelle scorse due decadi (Cohen, 1976, 1977a, 1977b, 1979a, 1979b, 1979c; Tuljapurkar 1982a, 1982b, 1986, 1989; Tuljapurkar e Orzack, 1980; Cohen 1987; Caswell, 1989; Tuljapurkar 1989, 1990b; Andersen, 1994), ed è stato così possibile esaminare gli effetti di variazione stocastica all'interno degli ecosistemi sulle dinamiche di popolazioni strutturate in classi d'età o in taglie distinte. La teoria è stata applicata alle popolazioni naturali in molti casi (Bierzychudek, 1982; Cohen et al., 1983; Heyde e Cohen, 1985; Silva et al. 1991; Canales et al., 1994). Tuttavia, non esistono studi che riassumano le proprietà generali delle dinamiche della popolazione derivanti dal confronto delle differenti analisi presenti in bibliografia.

Nel caso in analisi, la popolazione arborea è stata suddivisa in 3 classi d'età nominate rispettivamente in ordine crescente di maturità, *seedling*, *sapling* e *adult*, in accordo con la struttura demografica ritenuta importante per i modelli di savana da Sankaran et al. (2004). Tale suddivisione, si è resa utile al fine di ottenere un modello discreto che sia verosimile nell'interazione tra incendi e copertura arborea. Infatti, come detto nel paragrafo 9.5, l'incendio ha un effetto diverso su alberi giovani e alberi maturi: gli alberi piccoli, infatti, sono più vulnerabili agli incendi, dato che si trovano completamente nella zona in cui si sviluppa la fiamma, viceversa gli alberi maturi sono investiti dall'incendio in misura minore, dal momento che le loro cortecce proteggono il nucleo principale della pianta e le gemme (le quali sono ancora quiescenti durante la stagione degli incendi) sono trattenute al di sopra della zona in cui si propaga la fiamma.

Non si esclude che si possa estendere la logica del modello ad un numero maggiore di classi d'età.

## **10.2 La struttura del modello: copertura arborea strutturata in classi**

Il modello discreto in classi di età viene proposto in due differenti varianti, entrambe verosimili: nella prima si assume che la probabilità di germinazione dei semi sia indipendente dalla copertura arborea stessa, mentre nel secondo caso essa diventa funzione dello spazio occupato dagli alberi appartenenti alle varie classi di età. Per entrambe le versioni del modello, si assume, inoltre, che ciascun individuo appartenente alla stessa classe abbia pari probabilità di passare, la stagione successiva, nella classe d'età successiva.

### 10.2.1 Modello discreto a classi d'età con frazione colonizzata costante

In questa variante del modello, un'ulteriore ipotesi viene fatta sulla probabilità di germinazione dei *seedling*,  $p_0$ : in prima approssimazione si considera che tale probabilità sia indipendente dalla copertura delle 3 classi, ovvero si assume che i semi vengano portati dall'esterno dell'area di studio grazie al contatto della suddetta area con volatili, insetti ecc. (Staver et al., 2009). Sotto tale assunzione la dinamica della copertura arborea si assume sia determinata da 4 parametri:  $\alpha$ , ovvero la probabilità di transizione di un individuo dalla *seedling* a *sapling*,  $\beta$ , ovvero la probabilità di transizione dalla classe *sapling* alla classe *adult* e  $\gamma$ , ovvero la probabilità di ciascun individuo di rimanere nella classe *adult* e infine  $p_0$ , che è stata già commentata precedentemente. Conseguentemente i complementari di ciascun parametro, ovvero  $1-\alpha$ ,  $1-\beta$  e  $1-\gamma$ , rappresentano la probabilità di morte di ciascun individuo in ciascuna classe. Poiché la transizione da una classe d'età alla successiva dipende in qualche modo, per il principio di esclusione competitiva intra-specifica (May, 1981), dallo spazio occupato di ciascuna classe, i parametri  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  sono considerati funzioni esponenzialmente decrescenti della somma della copertura dovuta a ciascuna classe d'età, ognuna moltiplicata per un opportuno coefficiente. Per la trattazione analitica del modello si rimanda al Paragrafo 10.2. Nel modello, come si è già accennato nell'introduzione di questo capitolo, permane la discretizzazione stagionale dell'anno: dunque la dinamica sarà diversa a seconda che si stia trattando la stagione umida o la stagione secca.

Per la stagione umida, quindi, come nel modello esposto nel capitolo 9, non sono previsti incendi e la dinamica di copertura erbosa è analoga a quella esposta nel capitolo 9. Viceversa la dinamica degli alberi è sintetizzata nella Figura 10.1, nella quale  $T_1$  [-] si riferisce alla frazione d'area coperta dai *seedlings*,  $T_2$  [-] si riferisce alla frazione d'area coperta dai *saplings* e  $T_3$  [-] si riferisce alla frazione d'area coperta dagli *adults*.

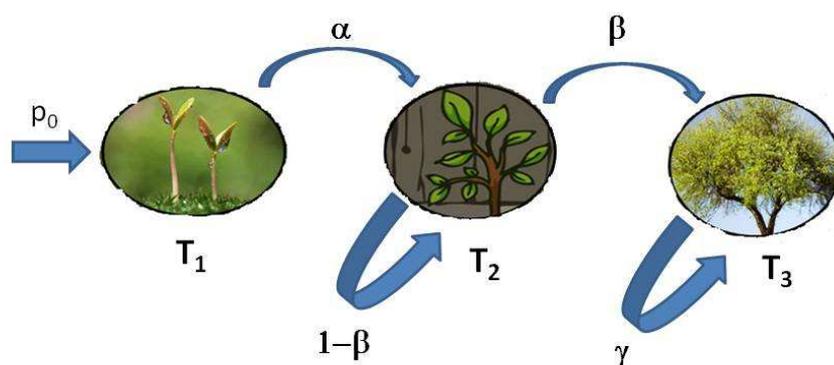


Figura 10.1 Modello discreto a classi di età: grafo delle possibili transizioni da una classe d'età all'altra nella stagione umida e sotto l'ipotesi di  $p_0$  costante.

Per la stagione secca, il modello a classi d'età, prevede la possibilità di propagazione di incendi, con modalità analoga a quanto esposto nel paragrafo 9.2. Per quanto riguarda la dinamica dell'erba, essa viene trattata in modo analogo a quanto fatto con il modello discretizzato stagionalmente nel paragrafo 9.2, viceversa per quanto riguarda la copertura arborea, le due possibili situazioni che possono generarsi durante la stagione secca sono le seguenti:

- assenza di incendi: la dinamica arborea dipende dai 4 parametri  $d_{11}$ ,  $d_{12}$ ,  $d_{22}$  e  $d_{33}$  che sono rispettivamente la probabilità dei *seedlings* di rimanere nella stessa classe d'età la stagione successiva, la probabilità che i *saplings* ritornino *seedlings*, la probabilità degli *adults* di rimanere nella stessa classe d'età la stagione successiva. Inoltre  $p_o$  diventa nulla in quanto nel modello non è prevista la possibilità di nuove nascite nella stagione secca. Infine è da notare che deve essere soddisfatta la relazione  $d_{12}+d_{22}=1$ .

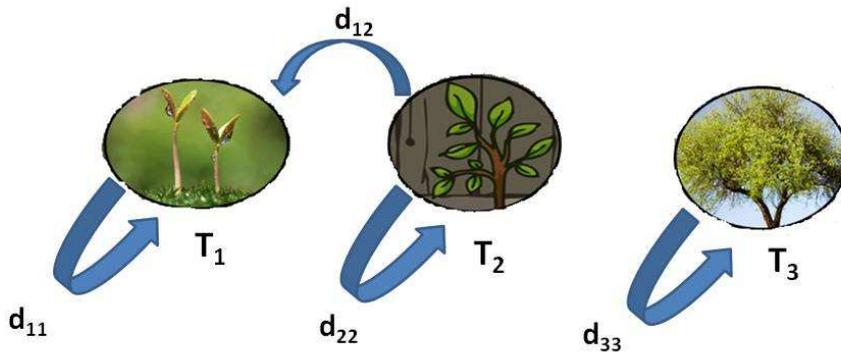


Figura 10.2 Modello discreto a classi di età: grafo delle possibili transizioni da una classe d'età all'altra nella stagione secca in assenza di incendi.

- presenza di incendi: la dinamica arborea dipende dai 4 parametri  $df_{11}$ ,  $df_{12}$ ,  $d_{22}$  e  $df_{33}$  che hanno lo stesso significato degli omologhi  $d_{11}$ ,  $d_{12}$ ,  $d_{22}$  e  $d_{33}$  descritti sopra, ma sono caratterizzati da valori diversi. In particolare, in questa situazione deve essere soddisfatta la relazione  $df_{12}+df_{22}<1$ .

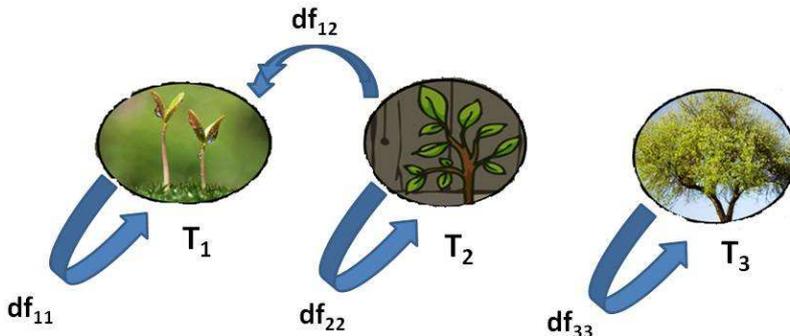


Figura 10.3 Modello discreto a classi di età: grafo delle possibili transizioni da una classe d'età all'altra nella stagione secca in presenza di incendi.

Per i valori dei parametri della matrice di transizione, e in generale, per la formulazione matematica del modello, si rimanda al paragrafo 10.3.

### 10.2.2 Modello discreto a classi d'età con frazione colonizzata dipendente dall'abbondanza di alberi maturi

In un questa seconda variante del modello, la probabilità di germinazione dei *seedling*,  $p_0$ , si ipotizza esponenzialmente decrescente con l'aumento della copertura dovuta ai *saplings* e agli *adults* ciascuna opportunamente moltiplicata per un tasso di fertilità.

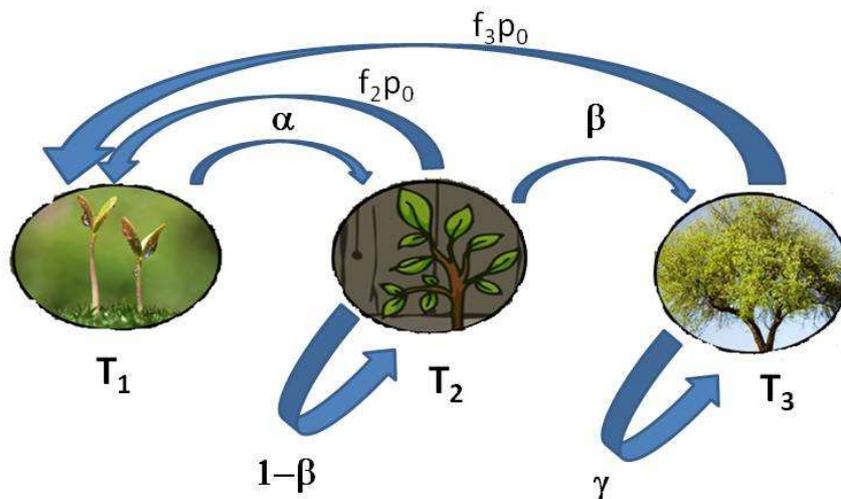


Figura 10.4 Modello discreto a classi di età: grafo delle possibili transizioni da una classe d'età all'altra nella stagione umida sotto l'ipotesi di  $p_0$  funzione di  $T_2$  e  $T_3$ .

La dinamica sia nella stagione umida, dunque, è analoga a quella descritta nel paragrafo 10.2.1, eccezion fatta per l'introduzione della funzione con la quale varia  $p_0$ , descritta pocanzi. In Figura 10.4 si è riportato uno schema dell'andamento della copertura arborea nella stagione umida.

La dinamica della copertura arborea nella stagione secca, sia nel caso si verifichino incendi sia nel caso non si verifichino, è analoga a quella descritta nel paragrafo 10.2.1.

Anche in questo caso, per la trattazione analitica, si rimanda al paragrafo 10.3.

## 10.3 Il modello

In questo paragrafo verranno presentate le equazioni che reggono il modello nonché le matrici di transizione ed i parametri utilizzati in simulazione.

### 10.3.1 Le equazioni del modello

Per quanto riguarda la dinamica della copertura erbosa, l'equazione che ne regola l'andamento è la seconda equazione del sistema (9.6) riportata nel capitolo 9, con la sola modifica che la copertura arborea all'interno della suddetta equazione sarà data dalla somma delle frazioni di terreno occupata da ciascuna delle tre classi di età. Dunque, l'equazione per l'erba nella stagione umida diventa:

$$G_t^{WET} = 1 - (T_{1t}^{WET} + T_{2t}^{WET} + T_{3t}^{WET}) - \frac{g}{\gamma_G} \quad (10.1)$$

Mentre per l'equazione dell'erba in stagione secca si rimanda all'Eq.(9.7) e (9.8). Per la procedura analitica che porta a tale equazione si rimanda al paragrafo 9.3.1.

Viceversa, per quanto riguarda la copertura arborea, la suddivisione in classi d'età comporta delle modifiche nelle equazioni rispetto al modello descritto al capitolo 9.

In particolare per la stagione umida il modello prevede due possibilità:

- Probabilità di germinazione dei *seedlings*,  $p_0$ , costante

Dunque l'Equazione che regola il modello è la (10.2):

$$\begin{cases} T_{1t}^{WET} = (1 - T_{1t-1}^{DRY} - T_{2t-1}^{DRY} - T_{3t-1}^{DRY})p_0 \\ T_{2t}^{WET} = \alpha_{t-1}T_{1t-1}^{DRY} + (1 - \beta_{t-1})T_{2t-1}^{DRY} \\ T_{3t}^{WET} = \beta_{t-1}T_{2t-1}^{DRY} + \gamma_{t-1}T_{3t-1}^{DRY} \end{cases} \quad (10.2)$$

In cui  $\alpha$  [-] è la probabilità di transizione da *seedling* a *sapling*,  $\beta$  [-] è la probabilità di transizione da *sapling* ad *adult*,  $\gamma$  [-] è la probabilità di rimanere la stagione successiva nella classe *adult*.

$T_1$  [-],  $T_2$  [-] e  $T_3$  [-] indicano rispettivamente la copertura dovuta ai *seedlings*, ai *saplings* e quella dovuta agli *adults*.

La (10.2) scritta in forma matriciale diventa:

$$\begin{bmatrix} T_{1t}^{WET} \\ T_{2t}^{WET} \\ T_{3t}^{WET} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p_0 & -p_0 & -p_0 \\ \alpha_{t-1} & (1 - \beta_{t-1}) & 0 \\ 0 & \beta_{t-1} & \gamma_{t-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{1t-1}^{DRY} \\ T_{2t-1}^{DRY} \\ T_{3t-1}^{DRY} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10.3)$$

Ponendo  $M = \begin{bmatrix} -p_0 & -p_0 & -p_0 \\ \alpha_{t-1} & (1 - \beta_{t-1}) & 0 \\ 0 & \beta_{t-1} & \gamma_{t-1} \end{bmatrix}$  chiamata anche matrice di transizione, il sistema

(10.2) può essere riscritto come:

$$\mathbf{T}_{it}^{WET} = \mathbf{M} \mathbf{T}_{it-1}^{DRY} \quad (10.4)$$

I coefficienti  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  dipendono da  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$  secondo le seguenti funzioni:

$$\begin{cases} \alpha_t = \alpha_0 e^{-[\alpha_1 T_1^{DRY} + \alpha_2 T_2^{DRY} + \alpha_3 T_3^{DRY}]} \\ \beta_t = \beta_0 e^{-[\beta_2 T_2^{DRY} + \beta_3 T_3^{DRY}]} \\ \gamma_t = \gamma_0 e^{-[\gamma_3 T_3^{DRY}]} \end{cases} \quad (10.5)$$

dove  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$  e  $\gamma_0$ , adimensionali, sono definiti come la probabilità di transizione di un individuo in assenza di individui di qualsiasi classe d'età, mentre  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\gamma_3$  sono coefficienti correttivi adimensionali.

➤ Probabilità di germinazione dei *seedlings*,  $p_0$ , funzione di  $T_2$  e  $T_3$

La trattazione analitica in questo caso è analoga alla precedente, a patto di porre  $p_0$  in funzione dello spazio occupato dai *saplings* ( $T_2$ ) e dagli *adults* ( $T_3$ ). Dunque si è ipotizzato che  $p_0$  sia pari a:

$$p_0 = 1 - e^{-(f_2 T_2^{DRY} + f_3 T_3^{DRY})} \quad (10.6)$$

Dove  $f_2$  [-] e  $f_3$  [-] sono i tassi di fecondità rispettivamente di *saplings* e *adults* espressi in, e  $T_2$  [-] e  $T_3$  [-] indicano rispettivamente la copertura dovuta ai *saplings* e quella dovuta agli *adults*. In questo modo la probabilità di germinazione si configura come compromesso tra spazio disponibile (lasciato libero dagli individui appartenenti a ciascuna classe d'età) e presenza di individui fertili.

Per la trattazione delle dinamiche durante la stagione secca, il modello prevede, invece, una distinzione a seconda che ci sia o meno l'incendio.

- In assenza di incendi, la relazione che lega copertura arborea alla stagione umida a quella secca è, analogamente all'Eq. (10.3),

$$T_{it}^{DRY} = S T_{it}^{WET} \quad (10.7)$$

Dove  $S$  è matrice di transizione pari a:

$$S = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \quad (10.8)$$

In cui  $d_{11}$  [-],  $d_{12}$  [-],  $d_{22}$  [-] e  $d_{33}$  [-] che sono rispettivamente la probabilità dei *seedlings* di rimanere nella stessa classe d'età la stagione successiva, la probabilità che i *saplings*

ritornino *seedlings*, la probabilità degli *adults* di rimanere nella stessa classe d'età la stagione successiva.

- In presenza di incendi, la relazione che lega copertura arborea al passo temporale  $t$  e quella presente al tempo  $t+1$  è, analogamente all'Eq. (10.4),

$$\mathbf{T}_{it}^{DRY} = \mathbf{S}_f \mathbf{T}_{it}^{WET} \quad (10.9)$$

Dove  $\mathbf{S}_f$  è matrice di transizione pari a:

$$\mathbf{S}_f = \begin{bmatrix} df_{11} & df_{12} & 0 \\ 0 & df_{22} & 0 \\ 0 & 0 & df_{33} \end{bmatrix} \quad (10.10)$$

In cui  $df_{11}$  [-],  $df_{12}$  [-],  $df_{22}$  [-] e  $df_{33}$  [-] che sono rispettivamente la probabilità dei *seedlings* di rimanere nella stessa classe d'età la stagione successiva, la probabilità che i *saplings* ritornino *seedlings*, la probabilità degli *adults* di rimanere nella stessa classe d'età la stagione successiva.

Anche per questo tipo di modello, gli incendi vengono modellizzati attraverso una funzione nulla fino ad un certo valore di biomassa e crescente linearmente con essa oltre tale valore (Fig.8.1).

### 10.3.2 Valore dei parametri

I valori dei parametri introdotti nel modello in questione e che sono rimasti costanti nella simulazione sono riportati nella tabella 10.1. Per i parametri relativi alla dinamica dell'erba si rimanda alla tabella 9.1.

Tabella 10.1 Parametri fissi utilizzati nella simulazione del modello discreto in classi d'età per gli alberi.

<b>Simboli</b>	<b>Unità</b>	<b>Valore</b>
$\alpha_0$	-	1
$\beta_0$	-	1
$\gamma_0$	-	1
$\gamma_3$	-	0.05
$d_{11}$	-	0.8
$d_{12}$	-	0.2

$d_{22}$	-	0.8
$d_{33}$	-	0.99
$df_{11}$	-	0.01
$df_{12}$	-	0
$df_{22}$	-	0.01
$df_{33}$	-	0.99

## 10.4 Simulazioni

Dopo aver esposto la teoria e le espressioni analitiche del modello, si procede con il mostrare alcune simulazioni utilizzate per testare il funzionamento del modello analizzato. Poiché non viene introdotta la precipitazione come ingresso al modello, l'orizzonte di simulazione è, di fatto, indipendente dai 101 anni di scenario caratterizzanti i modelli STG e STGD. Inoltre, poiché il modello è stato costruito al fine di mettere in luce in modo particolare l'interazione tra la forzante fuoco e le dinamiche di crescita delle diverse classi di alberi, si è ritenuto opportuno utilizzare una funzione per la probabilità di propagazione dell'incendio che implichi la presenza di incendi frequenti all'interno dell'area ipoteticamente analizzata. La  $p_f$  ha dunque un andamento analogo alla  $pf_3$  di Figura 9.2.

Le condizioni iniziali sono state mantenute uguali per ogni simulazione. La copertura arborea iniziale è stata posta ad un valore praticamente nullo (diversa da 0 è solo lo 0.1% di copertura di *saplings*), al fine di mostrarne più chiaramente la dinamica.

### 10.4.1 Simulazione con frazione colonizzata costante

Le simulazioni proposte per questo tipo di variante del modello sono state ottenute ponendo  $p_0=0.3$ .

Viceversa i parametri  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_2, \beta_3$ , sono stati cambiati di volta in volta per mostrare la sensibilità del modello ed i differenti risultati.

Il primo set di parametri utilizzati è riportato in tabella 10.2. I risultati della simulazione sono riportati in Fig.10.5.

Tabella 10.2 Parametri utilizzati nella simulazione di Fig. 10.5 del modello discreto in classi d'età per gli alberi.

Simboli	Unità	Valore
$\alpha_1$	-	0.1
$\alpha_2$	-	1
$\alpha_3$	-	50
$\beta_2$	-	10
$\beta_3$	-	50

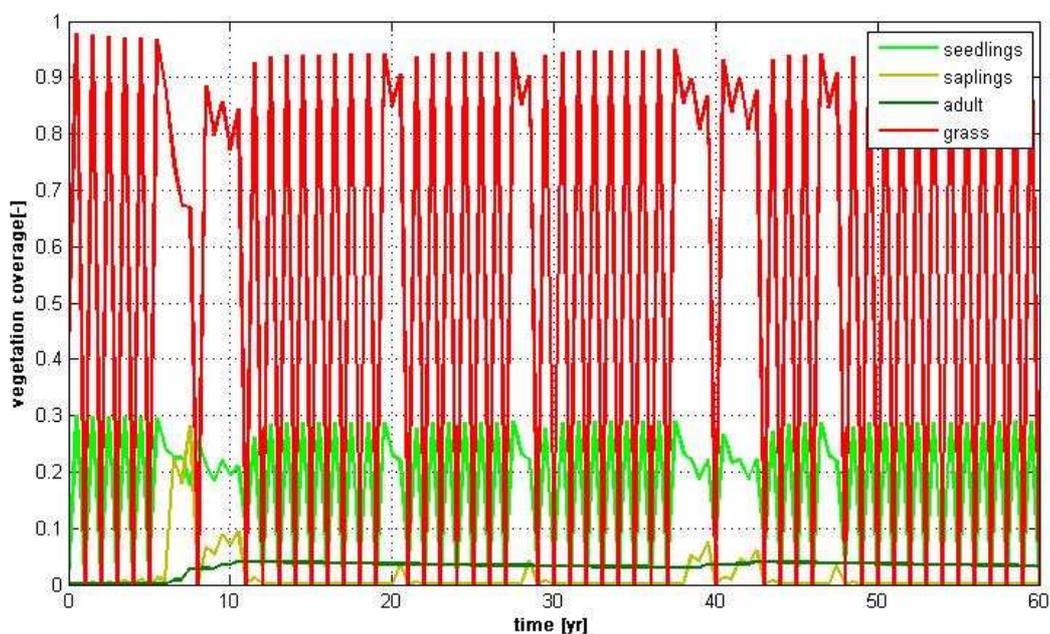


Figura 10.5 Simulazione del modello discreto a classi d'età per gli alberi con set di parametri di Tabella 10.2

Il secondo set di parametri utilizzati per la simulazione è riportato in Tabella 10.3. I risultati della simulazione sono riportati in Fig.10.6.

Tabella 10.3 Parametri utilizzati nella simulazione di Fig. 10.6 del modello discreto in classi d'età per gli alberi

Simboli	Unità	Valore
$\alpha_1$	-	0.001
$\alpha_2$	-	0.001

$\alpha_3$	-	0.5
$\beta_2$	-	1
$\beta_3$	-	5

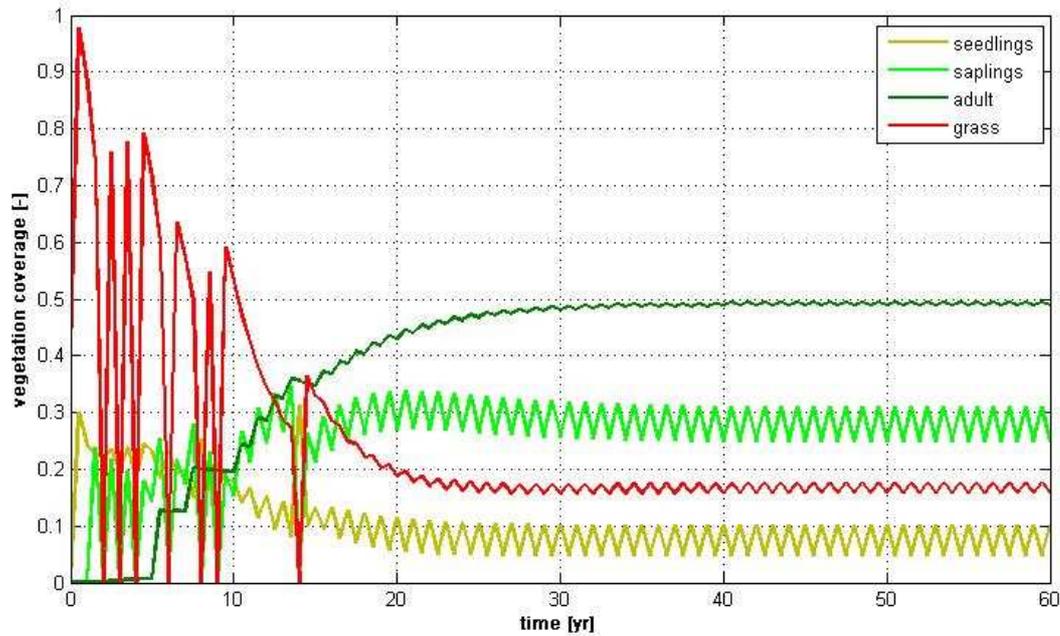


Figura 10.6 Simulazione del modello discreto a classi d'età per gli alberi con set di parametri di Tabella 10.3.

A titolo d'esempio si sono prese le simulazioni che hanno dato due risultati opposti: nella prima la copertura erbosa ha la meglio su quella arborea (Fig.10.5), viceversa nella seconda simulazione (Fig. 10.6) la copertura arborea, e in particolare quella dovuta agli *adults*, raggiunge uno ciclo stazionario corrispondente ad un valore più elevato di quello che caratterizza l'erba. Questo principalmente per il fatto che nella seconda simulazione, essendo  $\beta_2$  e  $\beta_3$  caratterizzati da valori abbastanza bassi, nel complesso  $\beta$ , (funzione esponenzialmente decrescente di  $\beta_2$  e  $\beta_3$ ) probabilità di passaggio dalla classe dei *saplings* a quella degli *adults*, decresce più lentamente al crescere della copertura arborea; in questo modo, potendo gli alberi più facilmente entrare nella classe degli *adults*, saranno influenzati in maniera minore dalla forzante "fuoco", come già detto nell'introduzione di questo capitolo.

Si noti, infine, che sono sempre presenti i cicli stagionali di crescita nella stagione umida e decrescita o stallo nella stagione secca in entrambe le simulazioni.

## 10.4.2 Simulazione con frazione colonizzata dipendente dall'abbondanza di alberi maturi

Anche per questa variante del modello, a titolo d'esempio, è riportata una simulazione significativa per la dinamica di crescita degli alberi. Per la simulazione sono stati utilizzati i parametri in Tabella 10.4.

Tabella 10.4 utilizzati nella simulazione di Fig. 10.7 del modello discreto in classi d'età per gli alberi.

Simboli	Unità	Valore
$\alpha_1$	-	0.1
$\alpha_2$	-	1
$\alpha_3$	-	2
$\beta_2$	-	1
$\beta_3$	-	2
$f_2$	-	2
$f_3$	-	3

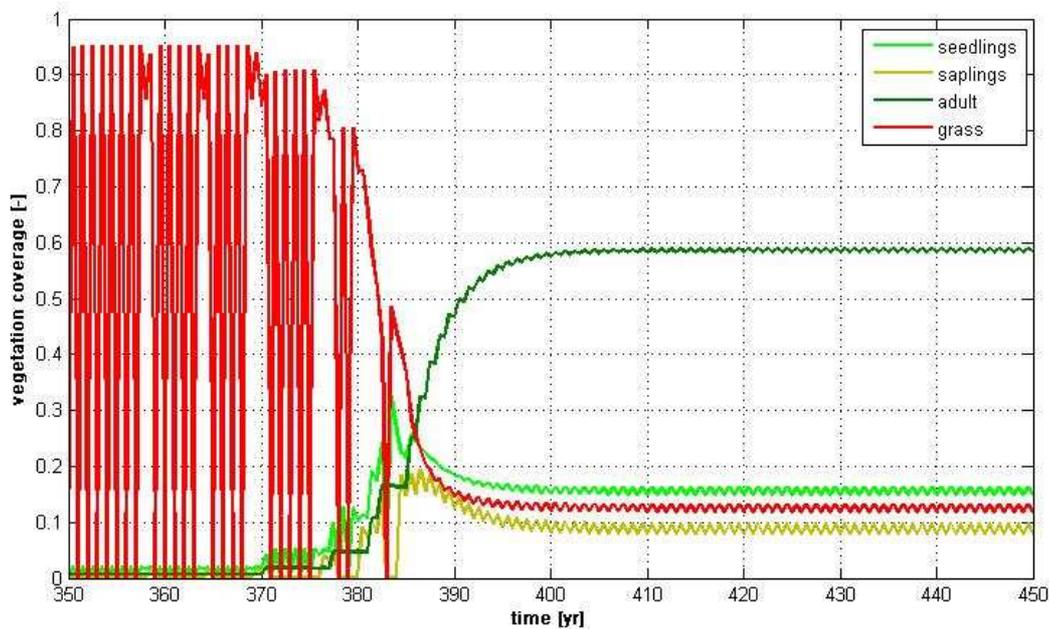


Figura 10.7 Ingrandimento dall'anno 350 all'anno 450 della simulazione del modello discreto a classi d'età per gli alberi con set di parametri di Tabella 10.4.

Dalla Figura 10.7 si capisce bene come, nonostante la copertura erbosa parta avvantaggiata in termini di frazione d'area coperta, venga alla fine "superata" dalla dinamica degli alberi adulti. Questo perché la dinamica arborea è molto lenta ma è anche meno influenzata dagli incendi rispetto a quella erbosa; dunque, come si può notare in corrispondenza dell'anno 370 in figura, l'assenza di incendio permette agli alberi di crescere senza disturbo, togliendo spazio all'erba e accumulandosi così di anno in anno ("storage effect"). Tale fenomeno è fondamentale per la crescita della copertura arborea: gli alberi nei primi stadi di crescita difficilmente riescono a non subire danni a causa degli incendi, ma se questi sono assenti per alcuni anni consecutivi, essi possono superare gli stadi d'età più vulnerabili e diventare adulti: una volta diventati adulti non è più possibile che vengano rimpiazzati dalla copertura erbosa. Il tipico andamento decrescente in modo brusco degli alberi, mostra evidenza in modo chiaro l'alternanza tra stagioni secche colpite da incendio e stagioni secche prive di incendi. L'anno fondamentale per la crescita degli alberi adulti, e che ha decretato in definitiva il superamento della copertura arborea su quella erbosa è il 385° : si noti infatti come dopo un periodo particolarmente fortunato caratterizzato da più stagioni prive di incendi, la copertura arborea ha potuto avere la meglio sull'erba.

## **10.5 Pregi e difetti del modello discreto a classi d'età**

Le simulazioni mostrate nei paragrafi precedenti hanno sicuramente mostrato come attraverso un modello discreto temporalmente (dove l'unità di simulazione è la stagione) e che prevede una suddivisione in classi d'età per gli alberi, possa fornire un'analisi più verosimile per quanto riguarda l'interazione tra crescita degli alberi e fuoco. Tuttavia, la maggior verosimiglianza del modello è stata ottenuta a discapito della complicazione analitica del modello stesso; infatti, come si può evincere leggendo il paragrafo 10.3, il modello si basa su parecchi parametri, legati tra loro da funzioni non più lineari. La trattazione analitica del modello potrebbe in questo modo diventare più difficoltosa e dispendiosa in termini di tempo.

Inoltre, le simulazioni effettuate con il suddetto modello, mettono in luce anche l'importanza della storia del sistema: è chiaro, infatti, come sia fondamentale per la crescita degli alberi, il susseguirsi di anni privi di incendi; essi permettono che gli alberi possano crescere e passare agli stadi di crescita più maturi così da essere meno vulnerabili al fuoco.

Secondo la logica del modello, dunque, sarebbe improprio parlare di periodo di ritorno del fuoco (tematica trattata frequentemente in bibliografia) poiché la frequenza degli incendi risulta regolata dall'ecosistema stesso.

---

Si conclude ricordando che, come già accennato precedentemente, un possibile sviluppo del modello potrebbe essere costituito da una relazione che legghi una siffatta dinamica di vegetazione con la forzante precipitazione. Questo potrebbe permettere di inserire in ingresso al modello precipitazioni di scenario, come è stato fatto per i modelli STG e STGD, e simulare dinamiche di vegetazione per il futuro.

## CAPITOLO 11

# CONCLUSIONI

Il presente elaborato di tesi, ha messo in luce come sia possibile analizzare gli impatti del cambiamento climatico sugli ecosistemi in un modo originale: i modelli minimali STG, STGD e in particolare quello discreto con o senza suddivisione in classi di età per gli alberi, hanno mostrato notevoli potenzialità nella simulazione delle complesse dinamiche della vegetazione, offrendo risultati coerenti e verosimili. Essi sembrano costituire il giusto compromesso tra semplicità analitica della struttura del modello e aderenza ai processi che si verificano nella realtà.

Al fine di mostrare la veridicità di quanto detto, nel capitolo 5 del presente elaborato, è stato presentato un modello che, per struttura e ottica di lavoro, funziona in maniera completamente diversa dai modelli minimali: il CLM, infatti, essendo un modello spazialmente distribuito capace di generare più di trecento variabili in uscita, ha grandi potenzialità per simulazioni globali, dalle quali ci si aspetta di ottenere dei valori numerici con i quali poter fare delle stime più o meno opinabili; questo però avviene a discapito della comprensione della complessa rete di dinamiche ed effetti di retroazione che possono aver condotto a tale risultato numerico. Il confronto con i dati di letteratura (possibile solo per Skukuza con il sito Nylsvley) ha evidenziato, inoltre, un buon accordo per il modello biogeochimico CN ma una forte tendenza del CNDV (modello CLM con dinamica della vegetazione attiva) a sottostimare le variabili, quasi sempre inferiori di un ordine di grandezza rispetto al modello biogeochimico CN. Ciò indurrebbe alcune criticità nel suo utilizzo in simulazioni rappresentanti scenari di cambiamento climatico. A questo proposito è opportuno citare il lavoro di Scheiter e Higgins (2009) sull'incapacità dei principali modelli di vegetazione di riprodurre le condizioni peculiari degli ecosistemi tropicali e subtropicali.

---

Per questo motivo, essendo le aree d'interesse (Skukuza per il bioma savana e Lesotho per il bioma prateria) relativamente limitate dal punto di vista dell'estensione spaziale, si è ritenuto più opportuno effettuare le analisi degli andamenti futuri delle dinamiche di vegetazione attraverso modelli minimali, riservandosi di utilizzare, a titolo d'esempio, il CLM per simulazioni delle serie annuali di alcune delle variabili più importanti, solo per l'anno 2003. Tuttavia, non si preclude la possibilità, di poter simulare scenari di proiezione futura anche con l'utilizzo del CLM.

Con l'utilizzo dei modelli minimali nei capitoli 7, 8, 9 e 10, è stato possibile cogliere al meglio in che modo degli importanti fattori, quali ad esempio la precipitazione, gli incendi e gli erbivori, influenzino la dinamica della vegetazione al fine di permettere la coesistenza tra copertura arborea ed erbosa.

Come si è detto nel capitolo introduttivo, la presentazione dei modelli minimali in questo elaborato si succede secondo una logica di progressivo avanzamento secondo la somiglianza con il fenomeno osservato: il modello STG, infatti, si presenta abbastanza completo nella trattazione della dinamica della vegetazione ma sembra semplificare eccessivamente l'interazione tra la vegetazione e gli incendi. A ciò si cerca dunque di porre rimedio con l'introduzione della variabile biomassa secca nel sistema di equazioni (modello STGD); tuttavia, nonostante si carpisca bene la dinamica degli incendi, anche in questo caso permangono dei problemi per via dei "cicli mancati" dell'erba a causa della difficile calibrazione dei parametri  $w_G$  e  $w_T$  di derivazione sostanzialmente empirica. Si passa dunque ad una discretizzazione temporale del modello in modo tale da ottenere una maggiore coerenza con l'andamento stagionale della precipitazione e dei fenomeni ecologici. Si perfeziona inoltre il modello introducendo una distinzione in classi d'età per gli alberi, elemento molto importante al fine di simulare la corretta interazione tra vegetazione e incendi.

Nonostante si ottenga un effettivo miglioramento del modello originario, ulteriori perfezionamenti sono sicuramente possibili e, anzi, fortemente auspicabili.

Per quanto riguarda i risultati ottenuti in simulazione si sottolineano i seguenti aspetti: innanzitutto si fa notare come il cambiamento climatico influisca negativamente sul regime pluviometrico di Skukuza: dalla proiezione di scenario B1 scelta per le simulazioni, si evince un netto abbassamento del livello medio annuale di precipitazione, indicando come la preoccupazione per l'avanzamento della desertificazione in questo luogo sia scientificamente basata. In secondo luogo, si può però notare come le simulazioni effettuate con il modello minimale STGD mettano in luce che non è solo la precipitazione ad influenzare la dinamica della vegetazione, bensì anche gli incendi e gli erbivori hanno un ruolo determinante: nelle simulazioni fatte in Skukuza, in particolar modo, si nota come introducendo la forzante fuoco, la copertura arborea tenda a decrescere in modo molto rapido.

In conclusione si ritiene opportuno segnalare quali siano i possibili sviluppi futuri dell'analisi svolta in tale elaborato; innanzitutto, per un perfezionamento del modello STGD, sarebbe sicuramente auspicabile una relazione studiata ad hoc per ciascun sito in questione, che legghi la propagazione degli incendi con la crescita di biomassa secca.

Infine per quanto riguarda i modelli discreti, dei quali si sono messi in luce i punti di forza in conclusione al capitolo 10, sono certamente prospettabili svariati sviluppi futuri soprattutto in merito al perfezionamento e all'approfondimento analitico lo studio di una funzione legghi la dinamica della vegetazione con la precipitazione per renderli ancora più verosimili.

## Riferimenti bibliografici

F. Accatino, C. De Michele, R. Vezzoli, D. Donzelli, R. J. Scholes. Tree-grass co-existence in savanna: Interactions of rain and fire. *Journal of Theoretical Biology*, 267: 235-242, 2010.

J.P.H. Acoks. Veld types of South Africa. *Memoirs of the Botanical Survey of South Africa*, 28: 1-192, 1953.

P. Amarasekare. Competitive coexistence in spatially structured environment: a synthesis. *Ecol. Lett.*, 6: 1109-1122, 2003.

M. Andersen. Stochastic models of age-structured population. *Comments of Theoretical Biology*, 3:365-395, 1994.

S. Archibald, D.P. Roy, B. W. van Wilgen and R.J. Scholes. What limits fire? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa. *Global Change Biology*, 2008. Doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01754.x

D. Baldocchi et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 82:2415-2433. 2001.

C.J. Bampfyld, N.D. Brown, D.J. Gavaghan and P.K. Maini. Modelling rain forest diversity: the role of competition. *Ecol. Model.*, 188(2-4): 253-278, 2005.

B. Beckage, W.J. Platt and L.J. Gross. Vegetation, fire and feedbacks: a disturbance-mediated model of savannas. *The American Naturalist*, 174(6), 2009.

K.J. Beven and M.J. Kirkby. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 24:43-69, 1979.

---

Bierzychudek P. The demography of Jack-in-the-pulpit, a forest perennial that changes sex. *Ecological Monographs*, 52:335-351, 1982.

G.B Bonan. *A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and user's guide*. NCAR Technical Note NCAR/TN-417+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 150 pp., 1996.

G.B. Bonan, S. Levis, L. Kergoat and K.W. Oleson. Landscapes as patches of plant functional types: An integrating concept for climate and ecosystem models. *Global Biogeochem. Cycles* 16: 5.1-5.23, 2002.

G.B Bonan and S. Levis. Evaluating aspects of the Community Land and Atmosphere Models (CLM3 and CAM3) using a dynamic global vegetation model. *J. Climate* 19:2290-2301, 2006.

W.J. Bond and J.E. Keeley. Fire as global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends Ecol. Evol.*, 20(7):387-394, 2005. DOI: 10.1016/j.tree.2005.04.025.

W.J. Bond and B.W. van Wilgen. *Fire and Plants*. Chapman Hall, London, 1996.

W.J. Bond, G.F. Midgley and F.I Woodward. What controls South African vegetation-climate or fire? *S. Afr. J. Bot.*, 69(1):1-13, 2003.

J. R. Brown and S. Archer. Shrub Invasion of Grassland: Recruitments Continuous and not regulated by herbaceous biomass or density. *Ecology*, 80: 2385–2396, 1999.

J. Canales, M.C. Trevisan, J.F. Silva and H. Caswell. A demographic study of an annual grass (*Andropogon brevifolius* Shwartz) in burnt and unburnt savanna. *Acta Ecologica*, 15: 261-273.

H.Caswell. *Matrix population models*. Sinauer Associates, Sunderland, 1989.

R. Casagrandi and R. Rinaldi. A minimal model for forest fire regimes. *Am. Nature*, 153: 527-539, 1999.

M.A. Cochrane. Fire science for rainforests. *Nature*, 421: 913-919, 2003.

---

J.E.Cohen. Ergodicity of age structure in populations with Markovian vital rates, I: countable rates. *Journal of the American Statistical Association*, 71:335-339, 1976.

J.E.Cohen. Ergodicity of age structure in populations with Markovian vital rates, II: general states. *Advances in Applied Probability*, 9:18-37, 1977a.

J.E.Cohen. Ergodicity of age structure in populations with Markovian vital rates, II: finite state moments and growth rate; an illustration. *Advances in Applied Probability*, 9:462-475, 1977b.

J.E.Cohen. Comparative statistics and stochastic dynamics of age-structured populations. *Theoretical Population Biology*, 16:159-171, 1979a.

J.E.Cohen. Contractive inhomogeneous products of non negative matrices. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 86: 351-364, 1979b.

J.E.Cohen. Ergodic theorems in demography. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 1:275-295, 1979c.

J.E.Cohen. Stochastic demography. *Encyclopedia of Statistical Sciences* 8: 789-801, 1987.

P. Choler, W. Sea, P. Briggs, M. Raupach and R. Leuning. A simple ecohydrological model captures essentials of seasonal leaf dynamics in semi-arid tropical grassland. *Biogeoscience*, 7: 907-920, 2010.

R. Condit, R. Sukumar, S.P. Hubbel and R.B. Foster. Predicting population trends from size distributions: a direct test in a tropical tree community. *The American Naturalist*, 152(4): 495-509, 1998.

C. De Michele, R. Vezzoli, H. Pavlopoulos and R.J. Scholes. A minimal model of soil water-vegetation interactions forced by stochastic rainfall in water- limited ecosystems. *Ecol. Model.*, 212:397-404, 2007. DOI: 10.1016/j.ecomodel.2007.10.035.

C.De Michele and R.J Scholes . *Biodescesa:BIODiversity and DEsertification SCEnarios in South Africa under climate change projections* . Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Idraulica Ambientale Rilevamento. CSIR, South Africa, 2009.

---

R.E Dickinson, K.W. Oleson, G. Bonan, F. Hoffman, P. Thornton, M. Vertenstein, Z.-L. Yang and X. Zeng. The Community Land Model and its climate statistics as a component of the Community Climate System Model. *J. Climate* 19:2302-2324, 2006.

C.P. Fernandez-Illescas and I. Rodriguez-Iturbe. The impact of interannual rainfall variability on the spatial and temporal patterns of vegetation in a water-limited ecosystem. *Advances in Water Resources*, 27:83:95, 2004. DOI: 10.1016/j.advwatres.2003.05.001.

P.G.H. Frost and Robertson. The ecological effect of fire in savannas. In B.H. Walker, editor, *Determinants of tropical savannas*, pages 93-141. Int. Union Biol. Sci., Paris, 1987.

C.C. Heyde and J.E. Cohen. Confidence intervals for demographic projections based on products of random matrices. *Theoretical Population Biology* 27:120:153, 1985.

S.I. Higgins, W.J. Bond and W.S.W. Trollope. Fire, resprouting and variability: a recipe for grass-tree coexistence in savanna. *J. Ecol.*, 88:313-229, 2000.

L.F. Hunneke and P.L. Marks. Stem dynamics of the shrub *Alnus incana* spp. *Rugosa*: transition matrix models. *Ecology*, 68:1234-1242, 1987.

IPCC, *IPCC Special Report on Emission Scenarios*, 2000

IPCC, *IPCC Fourth Assessment on Climate Change Report*, 2007.

IPCC, *IPCC Climate Change Synthesis report*, 2007.

F. Jeltsch, G.E. Weber and V. Grimm. Ecological buffering mechanisms in savannas: A unifying theory of long-term tree-grass coexistence. *Plant Ecol.*, 161:161-171, 2000.

C.O. Justice, L. Giglio, S. Korontzi, J. Owens, J.T. Morissette, D. Roy, J. Descloitres, S. Alleaume, F. Petitcolin and Y. Kaufman. The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, 83:244 – 262, 2002.

J. E. Keeley, C. J. Fotheringham and M. Morais. Reexamining Fire Suppression Impacts on Brushland Fire Regimes. *Science*, 284 (5421): 1829-1832. DOI: 10.1126/science.284.5421.1829.

---

E. Kluzek. *CESM Research Tools: CLM4.0.10 User's Guide Documentation*. NCAR, Boulder, Colorado, 2010. <http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/clm/index.shtml>.

P.J Lawrence and T.N Chase. Representing a MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0). *J. Geophys. Res.* 112:G01023, 2007. DOI:10.1029/2006JG000168.

L.P. Lefkovitch. The Study of Population Growth in Organisms Grouped by Stages. *Biometrics*, 21( 1):1-18, 1965.

L. P. Lefkovitch. A theoretical evaluation of population growth after removing individuals from some age groups. *Bulletin of Entomological Research*, 57: 437-445, 1967. DOI: 10.1017/S0007485300050173.

P. H. Leslie. On the Use of Matrices in Certain Population Mathematics. *Biometrika*, 33(3):183-212, 1945.

P. H. Leslie. Some Further Notes on the Use of Matrices in Population Mathematics. *Biometrika*, 35(3/4):213-245, 1948.

H. Lieth and R.H. Chase. Primary Productivity of the Biosphere. *Ecological Studies* 14, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1975.

R.M. May. *Theoretical ecology: principles and applications*. 2<sup>nd</sup> ed. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1981.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. "Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends. Findings of the Condition and Trends Working Group". Island Press, Washington, DC.

R.B. Myneni et al. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sens. Environ.*, 83:214-231, 2002.

M. Nakaoka. Dynamics of Age- and Size-Structured Populations in Fluctuating Environments: Applications of Stochastic Matrix Models to Natural Populations. *Res. Popul. Ecol.* 38(2): 141-152, 1996.

---

G.-Y Niu, Z.-L. Yang, R.E. Dickinson and L.E. Gulden. A simple TOPMODEL-based runoff parameterization (SIMTOP) for use in global climate models. *J. Geophys. Res.*, 2005. DOI: 10.1029/2005JD006111.

G.-Y. Niu, Z.-L. Yang, R.E. Dickinson, L.E. Gulden and H. Su. Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with Gravity Recovery and Climate Experiment data". *J. Geophys. Res.* 112:DO7103., 2007. DOI:10.1029/2006JD007522.

I. Noy- Meir. Stability of grazing ecosystems, an application of predator-prey graphs. *J. Ecol.*, 63:459-481, 1975.

K.W. Oleson, D.M. Lawrence, G.B. Bonan, M.G. Flanner, E. Kluzek, P.J. Lawrence, S. Levis, S.C. Swenson, P.E. Thornton, A. Dai, M. Decker, R. Dickinson, J. Feddema, C.L. Heald, F. Hoffman, J.-F. Lamarque, N. Mahowald, G.-Y. Niu, T. Qian, J. Randerson, S. Running, K. Sakaguchi, A. Slater, R. Stockli, A. Wang, Z.-L. Yang, Xi. Zeng, and Xu. Zeng. *Technical Description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM)*. NCAR Technical Note NCAR/TN-478+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 257 pp., 2010 <http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/clm/index.shtml>

R.A.P. Pellew. The impacts of elephants, Giraffe and fire upon the acacia tortilis woodlands of the Serengeti. *Afr. J. Ecol.*, 21(1):41-74, 1983. DOI: 10.1111/j.1365-2028.1983.tb00311.

H. T. Prins and H.P. van Der Jeugd. Herbivore population crashes and woodland structure in East Africa. *Journal of Ecology*, 81: 305-314, 1993.

G.A. Polis. Why are the parts of the world green? Multiple factors control productivity and the distribution of biomes. *Oikos*, 86:3-15, 1999.

Qian, T., Dai, A., Trenberth, K., and Oleson, K.W., 2006. "Simulation of Global Land Surface Conditions from 1948 to 2004. Part I: Forcing Data and Evaluations". NCAR, Boulder, Colorado.

J. Roughgarden. A Simple model for population dynamics in stochastic environments. *American Naturalist*, 109:713-736, 1975.

---

J.C. Sanclan. A model of woody-herbaceous biomass relationship in eucalypt and mesquite communities. *J. Range Manage.*, 45:75-80, 1992.

M. Sankaran, J. Ratnam e N.P. Hanan Tree-grass coexistence in savannas revisited – insights from an examination of assumptions and mechanisms invoked in existing models. *Ecology Letters*, 7: 480–490, 2004.

M. Sankaran, N.P. Hanan, R.J. Scholes, J. Ratnam, D.J. Augustine, B.S. Cade and et al. Determinants of woody cover in African savannas. *Nature*, 438(7069):846-849, 2005. DOI:10.1038/nature04070.

M. Sankaran, J. Ratnam and N.P. Hanan. Woody cover in African savannas: the role of resources, fire and herbivory. *Global Ecol. Biogeogr.*, 17:236-245, 2008.

T. Scanlon, K.Caylor, S. Manfreda, S. Levin, I. Rodriguez-Iturbe. Dynamic response of grass cover to rainfall variability: implications for the function and persistence of savanna ecosystems. *Advances in Water Resources*, 28: 291-302, 2005.

C. Skarpe, P.A. Aarrestad, H.P. Andreassen, S.S. Dhillion, T. Dimakatso, J.T. du Toit, and et al. The return to the giants: ecological effects of an increasing elephant population. *Ambio*, 33:276-282, 2004.

M. Scheffer, S. Carpenter, J. A. Foley<sup>3</sup>, C. Folkes and B. Walker. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413 (591-596), 2001.

Scheiter, S., S.I. Higgins, 2009: “Impacts of climate change on the vegetation of Africa: an adaptive dynamic vegetation modelling approach”. *Global Change Biology*, 15(9), 2224-2246.

A. Shmida and L. Burgess. *Plant growth-form strategies and vegetation types in arid environments*. In M.J.A. Werger, P.J.M.V.D. Aart, H. J. During and J.T.A. Verhoeven, editors, *Plant Form and vegetation Structure.*, pages 211-241. SPB Academic Pub, The Hague, 1988.

R.J. Scholes and B.H. Walker. *An African Savanna: Syntesis of the Nylsvey Study*. Cambridge University Press, Cambridge, 1993.

---

R. J. Scholes and S.R. Archer. Tree-grass interaction in savannas. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 28:517-544, 1997.

J.F. Silva, J. Raventos, H. Caswell and M.C. Trevisan. Population responses to fire in a tropical savanna grass, *Andropogon semiberbis*: a matrix model approach. *Journal of Ecology*, 79:345-356, 1991.

P. Smouse and K. M. Weiss. Discrete demographic models with density-dependent vital rates. *Oecologia*, 21: 205-218, 1975.

C. Staver, W. J. Bond, W. D. Stock, S. J. van Rensburg and M. S. Waldram. Browsing and fire interact to suppress tree density in an African savanna. *Ecological Applications*, 19(7): 1909-1919, 2009.

K.Thonicke, S.Venevsky, S. Sitch and W.Cramer. The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model. *Global Ecology and Biogeography* 10:661-667, 2001.

P.E. Thornton, B.E. Law, H.L. Gholz, K.L.Clark, E. Falge, D.S. Ellsworth, H. Goldstein, R.K. Monson, D. Hollinger, M. Falk, J. Chen and J.P.Sparks. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agric. For. Meteorol.*113:185-222, 2002.

P.E. Thornton and N.A. Rosenbloom. Ecosystem model spin-up: estimating steady state conditions in a coupled terrestrial carbon and nitrogen cycle model. *Ecological Modelling* 189:25-48, 2005.

D. Tilman. Competition and biodiversity in spatially structured habitats. *Ecology*, 75 (1): 2-16, 1994.

D. Tilman, D. Wedin and J. Knops. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature*, 379: 718-720, 1996.

D. Tilman, J. Knops, D. Wedin, P. Reich, M. Ritchie and E. Siemann. The Influence of Functional Diversity and Composition on Ecosystem Processes. *Science*, 277: 1300-1302, 1997. DOI: 10.1126/science.277.5330.1300.

---

C.G. Trapnell. Ecological results of woodland burning experiments in Northern Rhodesia. *J. Ecol.*, 47: 129-168, 1959.

S.D. Tuljapurkar. Population dynamics in variable environments. II. Correlated environments, sensitivity analysis and dynamics. *Theoretical Population Biology*, 21:114-140, 1982a.

S.D. Tuljapurkar. Population dynamics in variable environments. II. Evolutionary dynamics of r-selection. *Theoretical Population Biology*, 21:141-165, 1982b.

S.D. Tuljapurkar. Population dynamics in variable environments. II. Growth and convergence rates. *Journal of Mathematical Biology*, 24:569-581, 1986.

S.D. Tuljapurkar. In uncertain life: demography in random environments. *Theoretical Population Biology*, 35:227-294, 1989.

S.D. Tuljapurkar and H. Orzack. Population dynamics in variable environments. I. Evolutionary. Long-run growth rates and extinction. *Theoretical Population Biology*, 18:314-342, 1980.

United States Global Research Program, *U.S. Climate Change Science Program report*, 2009

F. van Langevelde, C. van de Vijver, L. Kumar, J. van de Koppel, N. de Ridder and J. van Andel et al. Effects of fire and herbivory on the stability of savanna ecosystems. *Ecology*, 84(2):337-350, 2003.

J. van Groenendael, H. de Kroon and H. Caswell. Projection matrices in population biology. *Trends in Ecology & Evolution*, 3:264-269, 1988. doi:10.1016/0169-5347(88)90060-2.

M. Vertenstein, T. Craig, A. Middleton, D. Feddema, C. Fischer. *CESM1.0 User's Guide*. NCAR, 131 pp. <http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/clm/index.shtml>

R. Vezzoli, C. De Michele, H. Pavlopoulos and R.J. Scholes. Dryland ecosystems: The coupled stochastic dynamics of soil water and vegetation and the role of rainfall seasonality. *Phys. Rev. E*, 77(1):051908, 2008. DOI: 10.1103/PhysRevE.77.051908.

P. M. Vitousek, H. A. Mooney, J. Lubchenco and J. M. Melillo. Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*, 277 (5325): 494-499, 1997. DOI: 10.1126/science.277.5325.494.

---

B.H. Walker and I. Noy-Meir. *Ecology of Tropical Savannas*. Ed. By B.J. Huntley and B.H. Walker, Springer-Verlag, Berlin, 1982.

H. Walter. *Ecology of Tropical and Subtropical Vegetation*. Oliver and Boyd, Edinburgh, UK, 1971.

M. Westoby. Elements of a theory of vegetation dynamics in arid rangelands. *Israel J. Bot.*, 38:169-194, 1979.

R. J. Whelan. *The ecology of fire*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1995.

K.R. Wythers, W.K. Lauenroth and J.M. Paruelo. Bare-soil evaporation under semi arid field condition. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63(5):1341-1349, 1999.

X. Zeng, M. Shaikh, , Y. Dai, R.E Dickinson and R. Myneni. Coupling of the Common Land Model to the NCAR Community Climate Model. *J. Climate* 15:1832-1854, 2002.

# APPENDICE A

## CONSTANTI FISICHE

### A.1 Costanti fisiche condivise da tutte le componenti del modello

Tabella A.1. Costanti fisiche.

Pi	$\pi$	3.14159265358979323846	-
Acceleration of gravity	g	9.80616	m s <sup>-2</sup>
Standard pressure	P <sub>std</sub>	101325	Pa
Stefan-Boltzmann constant	$\sigma$	5.67x10 <sup>-8</sup>	W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup>
Boltzmann constant	$\kappa$	1.38065x10 <sup>-23</sup>	J K <sup>-1</sup> molecule <sup>-1</sup>
Avogadro's number	N <sub>A</sub>	6.02214x10 <sup>26</sup>	molecule kmol <sup>-1</sup>
Universal gas constant	R <sub>gas</sub>	N <sub>A</sub> $\kappa$	J K <sup>-1</sup> kmol <sup>-1</sup>
Molecular weight of dry air	MW <sub>da</sub>	28.966	kg kmol <sup>-1</sup>
Dry air gas constant	R <sub>da</sub>	R <sub>gas</sub> / MW <sub>da</sub>	J K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup>
Molecular weight of water vapor	MW <sub>wv</sub>	18.016	kg kmol <sup>-1</sup>
Water vapor gas constant	R <sub>wv</sub>	R <sub>gas</sub> / MW <sub>wv</sub>	J K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup>
Von Karman constant	k	0.4	-
Freezing temperature of fresh water	T <sub>f</sub>	273.15	K
Density of liquid water	$\rho_{liq}$	1000	kg m <sup>-3</sup>
Density of ice	$\rho_{ice}$	917	kg m <sup>-3</sup>
Specific heat capacity of dry air	C <sub>p</sub>	1.00464x10 <sup>3</sup>	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

---

Specific heat capacity of dry water	$C_{liq}$	$4.188 \times 10^3$	$J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Specific heat capacity of ice	$C_{ice}$	$2.11727 \times 10^3$	$J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Latent heat of vaporization	$\lambda_{vap}$	$2.501 \times 10^6$	$J \text{ kg}^{-1}$
Latent heat of fusion	$L_f$	$3.337 \times 10^5$	$J \text{ kg}^{-1}$
Latent heat of sublimation	$\lambda_{sub}$	$\lambda_{vap} + L_f$	$J \text{ kg}^{-1}$
<sup>1</sup> Thermal conductivity of water	$\lambda_{liq}$	0.6	$W \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
<sup>1</sup> Thermal conductivity of ice	$\lambda_{ice}$	2.29	$W \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
<sup>1</sup> Thermal conductivity of air	$\lambda_{air}$	0.023	$W \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Radius of the earth	$R_e$	$6.37122 \times 10^6$	m

---

<sup>1</sup>Non condivisa dalle altre componenti del sistema di modellazione accoppiato.