



MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO
Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira



Modelos Matemáticos para Simular a Introdução e Dispersão da Monilíase do Cacaueiro no Brasil

Relatório de Pós Doutorado realizado na ESALQ/USP
Setembro/2007-Setembro/2009

Ricardo Sgrillo
CEPLAC/CEPEC
MAPA

Brasília, DF
Março de 2010

Conteúdo

Agradecimentos

Resumo e conclusões

1. Introdução

2. Análise da dispersão apresentada na América Central e Peru

2.1. Métodos

2.2. Resultados

3. Modelo Estocástico Simplificado para Introdução no Brasil

3.1. Métodos

3.2. Resultados

4. Modelo Gaussiano (de pluma)

4.1. Métodos

4.2. Resultados

5. Dispersão aérea a longa distância: Fundamentos

5.1. Avaliação da distância e trajetória média de dispersão

5.1.1. Métodos

5.1.2. Parametrização

5.1.3. Resultados e discussão

6. Dispersão aérea a longa distância: Modelo HYSplit

6.1.1. Métodos

6.1.1. Trajetórias reversas

6.1.2. Deposição de esporos

6.2. Parâmetros usados no modelo

6.2.1. Dados Climáticos

6.2.2. Fonte de esporos

6.3. Resultados e discussão

6.3.1. Trajetórias reversas

6.3.2. Deposição de esporos

6.4. Agradecimentos

7. Dispersão por via fluvial

7.1. Introdução

7.2. Metodologia

7.2.1. Velocidade e duração do transporte

7.2.1. Probabilidade de sobrevivência dos frutos

7.3. Parâmetros e constantes

7.4. Resultados e discussão

7.4.1. Velocidade e duração do transporte

7.4.5. Probabilidade de sobrevivência dos frutos

8. Modelo determinístico

8.1. Descrição do sistema real

8.2. Desenvolvimento do modelo

8.3. Valores das variáveis utilizadas

8.4. Avaliação do modelo

8.5. Simulações

9. Modelo espacialmente explícito

9.1. Introdução

9.2. O modelo

9.2.1. Descrição geral e hipóteses

9.2.2 O programa

9.2.3 Interface Principal

9.2.3.1. Definição dos parâmetros para simulação

9.2.3.2. Representação gráfica da dispersão/distribuição

9.2.3.3. Botões de comando

9.2.3.4. Apresentação dos resultados

9.2.3.5. Outras opções

9.3. Avaliação do Modelo/Programa

9.4. Simulações

9.4.1. Densidade de Hospedeiro

9.4.2. Intensidade do foco inicial

9.4.3. Agentes de dispersão

9.4.4. Barreiras

Agradecimentos

Bibliografia

RESUMO E CONCLUSÕES

Dispersão apresentada na América Central e Peru

Neste capítulo foi analisado o padrão e velocidade de dispersão que a Monilia apresentou na América Central, de 1956 a 2005 e no Peru de 1988 a 1998. Na América Central a velocidade de dispersão foi de cerca de 40 km/ano enquanto no Peru de 106.

Analisando-se alguns fatores que poderiam influenciar a velocidade de dispersão da praga, como direção dos ventos dominantes, densidade de cacau (hectares de cacau por km² de área arável), Densidade populacional (hab./km²), etc., concluiu-se que as características dos ventos dominantes e a facilidade de locomoção (numero de fronteiras internacionais em cada região) seriam os fatores mais importantes no condicionamento da dispersão da Monilia.

Modelo Simplificado para Introdução no Brasil

Neste item se desenvolveu um modelo estocástico simplificado, tipo Monte Carlo, para estimar as probabilidades de introdução da Monilia no Brasil, em cada ano. Escolheu-se distribuição de probabilidades para gerar números ao acaso que representassem distancias de disseminação anual coerentes com as informações disponíveis dos padrões de dispersão na América Central e Peru. Estas distancias foram utilizadas para calculo das probabilidades de ingresso nos cacauais de Rondônia.

O modelo indica que, se for mantido o mesmo padrão de dispersão que a Monilia apresentou no Peru, as probabilidades de ingresso no Brasil aumentam a partir de 2002, chegando ao máximo em 2016 e então diminuindo até 2040.

Modelo Gaussiano

Neste capítulo se desenvolveu um modelo algébrico para avaliar a dispersão a curta distancia de esporos da Monilia por via aérea, no interior do cacaual. O modelo tem base na distribuição normal ou de Gauss para partículas liberadas no ar que se dispersam nas direções horizontais e verticais sob condições de equilíbrio dinâmico.

Os resultados mostram que, em condições de insolação leve e de ventos com baixa velocidade, como as do interior da cabruca ou da mata, a concentração de esporos é elevada até cerca de 20 metros do ponto de liberação, declinando então exponencialmente e atingindo baixos valores a partir de 150 metros.

Dispersão aérea a longa distância

Desenvolveu-se neste capítulo modelos para avaliar a distancia e trajetória de esporos da *M. roreri* na atmosfera, com base nas características físicas dos esporos, como forma, tamanho e densidade e nas condições de vento.

Conclui-se que os conídios elipsóides maiores da *M. roreri* podem se deslocar na atmosfera até 4 km de distancia, atingindo uma altitude de 10 m e levando até meia hora neste deslocamento. No entanto, os conídios globosos de menor tamanho podem atingir a 780 km de distancia a uma altitude de mais de 100 metros, levando cerca de quatro dias neste deslocamento, considerando velocidades de vento media de 2.5 m/s. Esta distancia de deslocamento é suficiente para o ingresso no Brasil, nos meses do ano que apresentam direção de ventos favorável, como junho. No entanto seria necessário examinar as condições topográficas da trajetória e avaliar se as elevações poderiam ser superadas pelos esporos.

Modelo HYSPLIT

O modelo **HYSPLIT** (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) foi desenvolvido para modelar o transporte de massas de ar pelo Air Resources Laboratory (ARL) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) dos Estados Unidos. HYSPLIT pode ser usado para estimar a trajetória progressiva ou reversa de uma massa de ar. A análise reversa da trajetória ajuda a determinar as origens e as fontes de partículas, enquanto a análise da trajetória progressiva ajuda a determinar a dispersão das partículas.

Verificou-se, através de simulações, que a introdução da Monilia do Panamá, em 1956 e no Peru em 1988 poderia ter sido por via aérea, pois naqueles locais e épocas houve condições favoráveis de direção e intensidade dos ventos, pelo menos em alguns períodos. A introdução no Panamá teria origem na Colômbia e no Peru a origem teria sido o Equador.

Verificou-se igualmente, pela análise de trajetórias reversas, que para haver infecção dos cacauais de Rondônia, por esporos de Monilia transportados pela atmosfera, a fonte deste inóculo deveria estar ao Norte e Noroeste do estado de Rondônia, o que não ocorre na atualidade.

Concluiu-se que a intensidade de dispersão de esporos é maior nos meses do meio do ano. No entanto a probabilidade dos esporos que se dispersam causarem novas infecções deve ser mais reduzida nesta época, devido a menor precipitação pluviométrica. Concluiu-se igualmente que a probabilidade de introdução da Monilia no Brasil por disseminação aérea deve ser maior nos meses de março/abril quando os ventos e a chuva ainda não diminuíram excessivamente e setembro/outubro, com o reinício das chuvas e aumento da velocidade dos ventos. Observou-se também que, mesmo nos meses do meio do ano, na maioria das vezes, a direção dos ventos não foi favorável a disseminação dos esporos para o território Brasileiro.

Considerando também a baixa densidade populacional dos hospedeiros da Monilia na mata Amazônica se conclui que a introdução da doença em território brasileiro, por disseminação aérea a longa distância, embora sendo possível apresenta baixa probabilidade de ocorrer.

Dispersão por via fluvial

Considerando a evidencia historia da dispersão de Monilia por via fluvial, ao longo margens do rio Coco na Nicarágua/Honduras, em 1996, desenvolveu-se um modelo matemático simplificado para avaliar as possibilidades de dispersão desta do Peru para o Brasil, utilizando os rios da bacia Amazônica.

Conclui-se que enquanto a Monilia estiver distribuída no Peru somente a esquerda do divisor de bacias será improvável que se dissemine para as regiões cacauceiras de Rondônia por via fluvial. No entanto não é tão improvável a disseminação da doença por via fluvial ao norte do Peru, pelas bacias dos rios Huallaga, Maranón e Amazonas.

Modelo determinístico

O modelo determinístico utiliza conceitos da dinâmica de sistemas e foi desenvolvido para simular a evolução da doença nos frutos do cacau, em função de diferentes condições do ambientes e de manejo das

plantas. Este modelo permite simular produtividade e perdas decorrentes da aplicação de diferentes técnicas de controle fitossanitário.

O desenvolvimento do modelo permitiu uma compreensão mais profunda das interações entre a Monilia e seu hospedeiro e a identificação das relações de causa e efeito entre as variáveis do sistema considerado.

O modelo foi avaliado comparando resultados de simulações com dados reais publicados na literatura científica. Tendo as comparações sido consideradas satisfatórias foram realizadas simulações para verificar o efeito da remoção de frutos infectados para redução das perdas causadas pela enfermidade.

Os resultados indicam que na Bahia as perdas de produtividade seriam bastante mais elevadas e que, mesmo que as remoções de frutos fossem feitas semanalmente seriam causadas ainda cerca de 50% de perdas sobre a produtividade potencial. Sem controle a produtividade, na Bahia, seria cerca de 20% da produtividade potencial.

Em Rondônia as perdas seriam menores que as da Bahia. Com intervalo de remoção de frutos de uma semana cerca de 70% da produtividade potencial poderia ser alcançada. Sem controle aproximadamente 18% da produtividade potencial seria atingida.

Modelo espacialmente explícito

O modelo espacialmente explícito desenvolvido gera uma variedade de informações muito úteis para a tomada de decisão. É um modelo estocástico acompanhado por representações que permitem "ver" o efeito da aplicação de diferentes parâmetros. Neste modelo o espaço é dividido em uma grade de tamanho e dimensões variáveis que representa a área a ser modelada, estando os indivíduos (plantas ou frutos) distribuídos nesta grade. A variação espacial é modelada de modo discreto e a variação temporal da quantidade de doença em cada célula é contínua, modelada por equações diferenciais. O modelo possui uma interface complexa que permite o controle total das simulações enquanto facilitando a avaliação dos resultados.

O modelo foi avaliado comparando-se os resultados de simulações com resultados reais da vassoura de bruxa na Bahia e da Monilia na América Central e Peru. Também se comparou o gradiente da doença gerado pelo modelo com dados disponíveis na literatura científica. Os resultados das comparações foram considerados satisfatórios para a utilização preliminar do modelo.

Com respeito a densidade de hospedeiros (plantas de cacau) observou-se que a área de distribuição da Monilia (incidência) parece não ser influenciada pela densidade de hospedeiros mas a intensidade da doença (% frutos infectados) é reduzida quando a densidade de plantas de cacau é menor.

Com relação ao efeito da quantidade de inóculo inicial na taxa de dispersão verificou-se que ocorre um crescimento assintótico na velocidade de dispersão conforme é aumentado o inóculo inicial (numero de plantas infectadas no tempo zero). Esta relação é semelhante a relação obtida entre a percentagem de frutos infectados e a concentração de inóculo (conídias/fruto).

Utilizando-se de informações disponíveis na literatura concluiu-se ser possível simular os efeitos dos padrões de movimento de possíveis vetores, como mamíferos e outros, na disseminação da Monilia.

Verificou-se igualmente que a utilização de barreiras, representadas por faixas de terreno sem ocorrência de hospedeiro, não seriam efetivas na contenção da doença. No entanto são necessárias informações adicionais para a dedução de conclusões mais sólidas.

1. Introdução

A monilíase do cacao é causada pelo fungo Basidiomiceto *Moniliophthora roreri* (Cif.). Este patógeno foi reclassificado de *Monilia roreri* em 1978 (Evans *et alli*, 1978). Atualmente, devido a sua semelhança biótica com o *Crinipellis perniciososa*, agente causal da Vassoura-de-bruxa, foi reclassificado com o nome de *Crinipellis roreri* n. Comb (Evans *et alli*, 2002), que pode ser o estado assexual de *C.perniciososa*. Como esta classificação ainda está em discussão será utilizado neste trabalho a nomenclatura *Moniliophthora roreri* ou os respectivos nomes comuns Monília do cacau ou Monilíase.

M. roreri tem dois ciclos de reprodução (Figura 1). Os esporos são facilmente desprendidos dos frutos esporulando e disseminados pela ação do vento, chuva, insetos, cursos da água, animais silvestres e pessoas. A liberação e dispersão dos esporos são favorecidas por tempo quente e seco, encontrando-se maiores concentrações de esporos na atmosfera entre 10:00 e 15:00 horas. Nos dias ensolarados e secos os esporos ficam na atmosfera, sedimentando-se na superfície das copas das plantas durante a noite. Na presença de chuva são carregados pelas águas e podem ficar alojados nas almofadas florais do cacau, que servem como repositório e câmara úmida para o patógeno (Ram *et alli*, 2004).

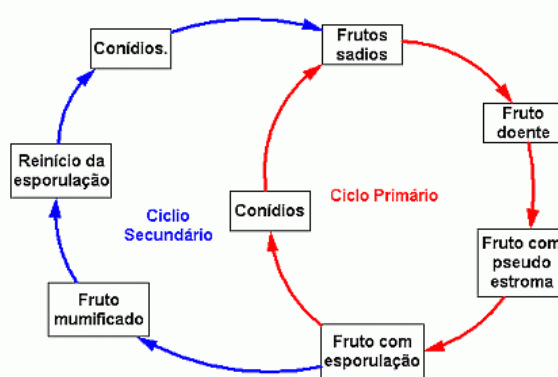


Figura 1. Ciclos reprodutivos de *M.roreri* (adaptado de Ram *et alli*, 2004)

Além do cacao a monília tem como hospedeiros outras espécies do gênero *Theobroma* e *Herrania*, como *T.grandiflorum*, *T.bicolor*, *T.gileri*, *T.mammosum*, *H.nítida*, *H.purpurea*, e outras.

O fruto é a única parte da planta que é infectada por *M.roreri*, sendo infectado em qualquer idade. O período de incubação é de 30 a 60 dias, dependendo da idade e da variedade de cacao. Os frutos jovens, de até 90 dias de idade, são mais suscetíveis. A monília pode produzir cerca de 10 tipos diferentes de sintomas nos frutos, como manchas verdes ou amarelas, inchaço ou depressão nos pontos de infecção e rachaduras.

Os frutos infectados quando cortados esporulam abundantemente em 3-4 dias (ciclo primário). Frutos doentes que ficam na árvore se mumificam com o tempo, endurecendo por causa da desidratação provocada pela produção dos esporos que ocorre sob influência da chuva. O fungo em frutos mumificados (ciclo secundário) pode permanecer viável por vários anos, nas mais diversas condições do ambiente.

Distribuição e importância econômica

A monilíase é uma doença extremamente destrutiva estando, atualmente, presente em 11 países da América tropical.

Foi registrada pela primeira vez no Equador, em 1917, de onde é nativa, tendo sido disseminada para a Colômbia (1930), Venezuela (1941), Panamá (1956), Costa Rica (1978), Nicarágua (1980), Peru (1988), Honduras (1997), Guatemala (2002), Belize (2004) e México (2005) (Ran *et alli*, 2004).

No Equador a exportação de cacao passou de 70.000 t em 1914, para 10.000 t em 1933, após a introdução e disseminação da monília. Em algumas regiões 95% dos frutos foram atacados o que provocou o abandono da maioria das grandes fazendas onde, posteriormente, o cacao foi substituído por plantações de bananeira.

Na Colômbia a incidência da doença ultrapassou 90% provocando perdas de até 10.000 t, equivalentes a US\$ 20 milhões entre 1975 e 1982.

Na Costa Rica, a produtividade média baixou de 700 kg/ha.ano em 1978 para 5 kg/ha.ano em 1983, após a introdução da monília. Neste período as exportações de amêndoas secas de cacau decresceram 96%.

Na Venezuela a incidência chegou a 70%.

No Peru os prejuízos nas áreas afetadas variaram de 50% a 100% o que causou o abandono de muitas fazendas (Ran *et alli*, 2004).

Em Honduras 7.200 ha eram cultivados com cacau antes da introdução de *M. rozeri*. Como efeito direto da chegada da doença 2.000 ha foram abandonados e 2.600 passaram a ser cultivados com milho e pastagens em poucos anos.

A introdução da monilíase trouxe sempre dramáticas conseqüências sociais e econômicas nos países atingidos o que demonstra a magnitude dos prejuízos que poderiam resultar se fosse introduzida nos principais países produtores de cacau.

Mecanismos de disseminação

Devido as suas características a monília se dispersa com facilidade. Seus esporos conservam viabilidade, mesmo em condições adversas, por mais de 9 meses. Um fruto de cacau infectado pela *M. rozeri* pode produzir até sete bilhões de esporos na superfície da lesão necrosada.

Orellana (1956) sugeriu que a introdução no Panamá ocorreu devido a introdução acidental de frutos infectados provenientes da região de San Jerônimo na Colômbia. Phillips-Mora (2003) suporta esta hipótese, considerando que o perfil molecular da monília de San Jerônimo e de isolados de toda a América Central são praticamente idênticos.

Em Costa Rica, segundo Evans (1986), a introdução foi devida a esporos disseminados pelo vento, provenientes do Panamá, a uma distância superior a 300 km. A disseminação em Costa Rica foi muito rápida (Phillips-Mora *et alli*, 2002). Em dois anos o fungo distribuiu-se da costa Atlântica a Pacífica (130 km) e da fronteira com o Panamá à fronteira com a Nicarágua (300 km).

Há evidências de que em algumas partes de Nicarágua a dispersão da doença foi por via fluvial, uma vez que todas as plantações de cacau ao longo do rio Côco e de seus tributários estavam infestadas, conforme resultados de expedições realizadas em março e abril de 1997, relatadas por Porras e Díaz (1997) e Porras e Enríquez, (1998).

Segundo Porras e Enríquez, (1998) o transporte da doença de Nicarágua para Honduras foi feito através de inundações e furacões. Até 1999 a *M. rozeri* estava restrita a poucas localidades na Mosquitia Hondureña mas, em março de 2000, o fungo foi detectado em Guaymás, a mais de 300 km de distância e, seis meses depois, em Cuyamel, a 80 km de Guaymás. Phillips-Mora *et alli*, (2002) acreditam que possivelmente estas introduções foram favorecidas pelo transporte de amêndoas secas de cacau entre as diferentes localidades.

No México a doença foi encontrada em março de 2005 (Ortiz-García, 2005) no norte do estado de Chiapas. Apesar das medidas de contenção aplicadas, de maio de 2005 a abril de 2006, cerca de 1.000 ha foram infectados, no estado de Tabasco, maior produtor mexicano. Considerando a grande distância e as barreiras geográficas importantes entre Chiapas no México e Nicarágua, Honduras e Belize, é bastante provável que a introdução da Monília no México, foi causada por agentes humanos.

Riscos para o Brasil

A região produtora de cacau do sul da Bahia possui cerca de 640.000 hectares de cacau, com produção média, na década de 80, de cerca de 300.000 toneladas anuais. Em 1989 a Vassoura de Bruxa, doença endêmica da Amazônia e até então ausente da Bahia, estabeleceu-se na Região. A partir de 1991 e, mais acentuadamente, depois de 1995, a produção baiana vem sofrendo perdas constantes, de cerca de 12% ao ano, causadas por esta doença. Na safra 1999/2000 menos de 100.000 toneladas foram produzidas. Esta perda de produção vem causando impactos sociais e econômicos importantes. O número de fazendas abandonadas aumentou consideravelmente como também a taxa de desemprego rural. Os indicadores

sociais apontam para uma degradação significativa na qualidade de vida regional. Em Ilhéus encontra-se instalada um parque industrial com potencialidade para processamento de 300.000 toneladas de cacau por ano. Porém, a partir de 1997, foi necessário iniciar importações de cacau da África, para minimizar os efeitos econômicos da ociosidade de suas instalações industriais. Também os possíveis efeitos ambientais decorrentes da substituição de áreas de produção em cabruca por outros cultivos menos favoráveis à preservação da flora e fauna regional pode apresentar impactos significativos.

O programa de recuperação da lavoura cacauzeira iniciado em 1996 pelo Governo Federal não vem gerando os resultados esperados. Nos últimos anos a produção de cacau vem oscilando em torno das 120 mil toneladas.

No Brasil a monília ainda não está presente. No caso desta doença ser introduzida no Acre e posteriormente em Rondônia a probabilidade de introdução na Bahia aumentaria consideravelmente. A ocorrência de *M. royeri* na Bahia provavelmente tornaria inviável o cultivo de cacau na região, tomando-se como referência o impacto que esta doença causou nas regiões produtoras nas quais ocorre, onde invariavelmente tornou-se o principal fator limitante da produção do cacau, causando perdas superiores a 80% em algumas áreas.

2. Análise da dispersão apresentada na América Central e Peru

2.1. Métodos

Com suporte do programa Google Earth realizou-se inicialmente uma análise simplificada da dispersão da *M. royeri* na América Central e Peru, com o objetivo de averiguar o tipo de disseminação que a praga apresentou nestes locais, entre os seguintes:

- **Disseminação natural:** por vento, animais silvestres, rios, etc.;
- **Disseminação humana I:** pessoas contaminam-se ou coletam material em um local infectado e o transportam a outro sadio, involuntariamente. As áreas de origem e destino são encontradas ao acaso, ou pela natureza da atividade das pessoas;
- **Disseminação humana II:** pessoas coletam frutos em uma área infectada e levam a uma área sadia. As áreas de origem e destino são encontradas intencionalmente, mas os agentes desconhecem que o material está infectado.

Consideraram-se alguns fatores ambientais que poderiam favorecer ou retardar a disseminação da doença nas duas regiões, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Influência possível de alguns fatores ambientais na velocidade de disseminação da *M. royeri*.

Fatores	Tipo de disseminação		
	Natural	Humana I	Humana II
Direção dos ventos predominantes	Mais rápida disseminação a favor da direção dos ventos dominantes	Sem relação.	Sem relação.
Densidade de cacau	Maior densidade de cacau, mais rápida disseminação.	Sem relação.	Sem relação.
Densidade populacional	Sem relação.	Maior densidade mais rápida.	Sem relação.
Estradas	Sem relação.	Mais estradas disseminação mais rápida.	Sem relação.
Número de países	Sem relação.	Mais países disseminação mais lenta.	Mais países disseminação mais lenta.

Para cálculo das taxas (velocidades) de disseminação anual na América Central foram utilizadas as informações publicadas por Phillips-Mora *et alli* (2006) que apresenta as localidades e respectivos anos de introdução da doença. Os dados para cálculo das taxas de disseminação anual no Peru foram obtidos de Rios-Ruiz (2004).

As coordenadas geográficas das localidades foram obtidas na Internet¹. A partir destas informações, considerando-se a localidade de Tuira como ponto inicial da disseminação da doença na América Central e a localidade de Baguá como ponto inicial no Peru e utilizando-se a equação 1 (Williams, 2008) calculou-se a distância das localidades iniciais a cada uma das demais localidades, em cada caso, respectivamente, e as respectivas taxas de disseminação (km/ano).

$$d = 2 \times \text{asin} \left\{ \sqrt{\left[\sin\left(\frac{\text{lat}1 - \text{lat}2}{2}\right) \right]^2 + \cos(\text{lon}1) \times \cos(\text{lon}2) \times \left[\sin\left(\frac{\text{lat}1 - \text{lat}2}{2}\right) \right]^2} \right\} \dots 1$$

onde d é a distância entre os pontos definidos pelas correspondentes latitudes e longitudes *lat1*, *lon1* e *lat2*, *lon2*.

A taxa de disseminação anual média foi estimada através de regressão linear entre anos transcorridos e distância percorrida pela *M. royeri* em cada uma das regiões consideradas.

2.2. Resultados preliminares

As coordenadas geográficas de cada local, ano de introdução, distância do local de introdução, e tempo e taxa anual de disseminação são apresentados na Tabela 2. Na Figura 2 são apresentados os mapas com a localização dos locais de introdução da Monilia nas regiões consideradas.

Tabela 2a. Localidades de introdução da Monilia na América Central, respectivas coordenadas geográficas (latitude e longitude), ano de introdução na localidade (Ano), distância até a localidade de Tuira (distância), anos decorrentes entre a introdução em Tuira e na localidade (Tempo) e disseminação anual (Dissem. Anual)

Local	Latitude	Longitude	Ano de introd.	Distância (km)	Tempo (Anos)	Dissem. Anual (km/ano)
Tuira	7.9920	-77.9268	1956	-	-	-
Achutupu	9.1878	-77.9932	1956	133.1	0	-
Ailigandi	9.2141	-78.0267	1956	136.3	0	-
Colon	9.3062	-79.8220	1956	255.5	0	-
Puerto Obaldía	9.1775	-77.9785	1956	131.8	0	-
Cahuita	9.7318	-82.8478	1978	577.5	22	26.2
Guatuzos	11.0000	-84.8667	1979	835.7	23	36.3
Golfito	8.6469	-83.1588	1980	583.9	24	24.3
Upala	10.8997	-85.0175	1980	846.8	24	35.3
Patriota	12.9670	-85.3670	1991	987.7	35	28.2
Waslala	12.9167	-85.9667	1992	1040.1	36	28.9
Raiti	14.5833	-85.0333	1997	1069.5	41	26.1
Wampursiti	15.1833	-84.6167	1997	1084.3	41	26.4
Waspam	14.7333	-83.9667	1997	999.8	41	24.4
Wawina	15.4170	-84.4330	1999	1090.1	43	25.4
Cuyamel	15.6667	-88.2000	2000	1411.1	44	32.1
Guaymas	15.1500	-87.8833	2000	1350.0	44	30.7
Dept Isabal	15.8333	-88.7500	2002	1470.1	46	32.0
Dept. Alta Verapaz	15.6167	-90.0167	2004	1571.2	48	32.7
Maya Mopán	16.6500	-88.5167	2004	1504.4	48	31.3
Dept. Toledo	16.3599	-88.8877	2005	1516.3	49	30.9
Huimanguillo	17.8500	-93.3833	2005	2008.4	49	41.0
Ignacio Zaragoza	17.7878	-91.9914	2005	1879.4	49	38.4
Ostuacan	17.4167	-93.3000	2005	1976.3	49	40.3
Pichucalco	16.5333	-91.2833	2005	1740.6	49	35.5

¹ <http://www.tageo.com/index.php?show=search>

Tabela 2b. Localidades de introdução da Monilia no Peru, respectivas coordenadas geográficas (latitude e longitude), ano de introdução na localidade (Ano), distância até a localidade de Baguá (distância), anos decorrentes entre a introdução em Baguá e na localidade (Tempo) e disseminação anual (Dissem. Anual)

Local	Latitude	Longitude	Ano da introd.	Dissem. (km)	Tempo (Anos)	Dissem. Anual (km/ano)
Baguá	-5.3690	-78.3797	1988	-	-	-
Tarapoto	-6.3352	-76.1355	1991	272.0	3	90.7
Yurimaguas	-5.7904	-75.9290	1991	277.0	3	92.3
Moyabamba	-5.9989	-76.6864	1991	201.2	3	67.1
Pucallpa	-8.3798	-74.7489	1992	524.1	4	131.0
Tingo Maria	-9.0180	-75.5749	1992	511.3	4	127.8
Pachiza	-7.3055	-76.7697	1992	280.0	4	70.0
Puchunuco	-7.2695	-76.7325	1992	279.6	4	69.9
Juanjui	-6.9469	-76.5716	1993	266.9	5	53.4
Chazuta	-6.5735	-76.1378	1993	283.2	5	56.6
San Francisco	-12.4432	-74.2086	1996	911.2	8	113.9
Satipo	-11.2663	-74.6807	1997	772.7	9	85.9
Quillabamba	-12.8281	-72.8583	1998	1029.0	10	102.9
Materiato	-11.7819	-73.3145	1998	906.5	10	90.6
La Convención	-12.9011	-72.5340	1998	1056.9	10	105.7



Figura 2a. Representação no Google Earth da disseminação da *M. royeri* na América Central

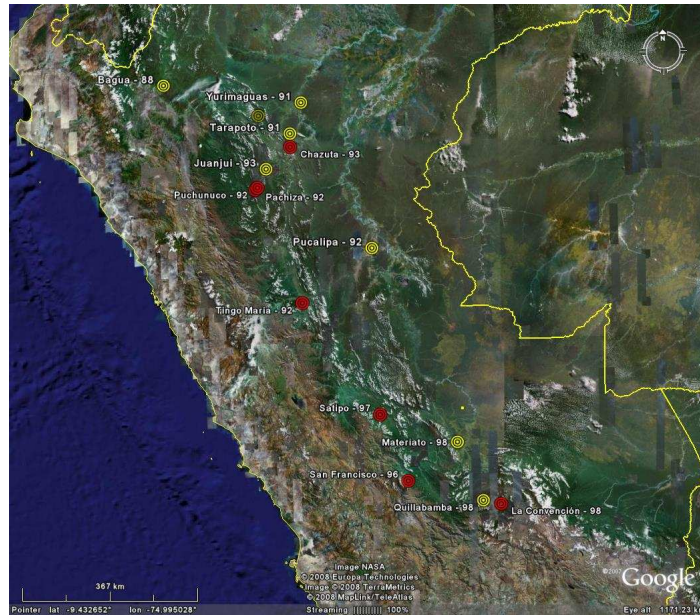


Figura 2b. Representação no Google Earth da Disseminação da *M. rozeri* no Peru

Os gráficos da Figura 3 apresentam as regressões lineares entre a distância disseminada pela *M. rozeri* e o tempo necessário para esta disseminação, na América Central e Peru, respectivamente. Nos dois casos o coeficiente de correlação r foi significativo a 1%.

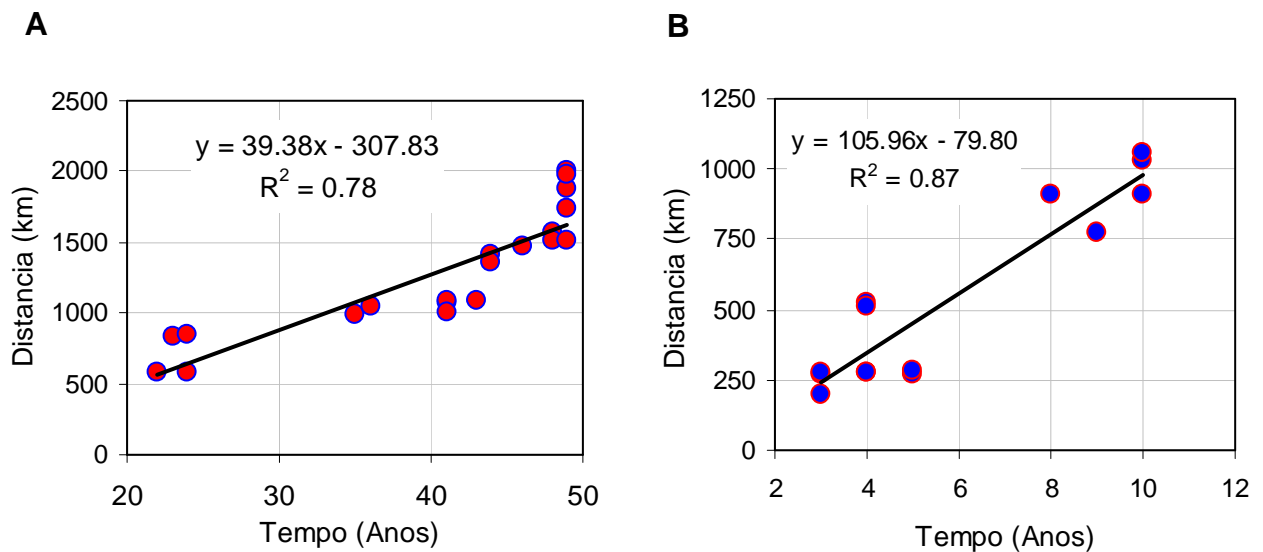


Figura 3. Regressão linear entre a disseminação da *M. rozeri* (km) e o tempo (Anos). A. América Central, B. Peru.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados referentes a taxa e direção de disseminação de *M. rozeri* e aos fatores ambientais que poderiam influenciar na sua velocidade de disseminação.

Tabela 3. Taxa e direção de disseminação da *M.roreri* na América Central e Peru e fatores que poderiam influenciar na sua disseminação.

Fator	Peru	América Central
Taxa de disseminação (km/ano) (coeficiente de regressão linear entre anos após introdução e distância percorrida (ver Figura 3))	105.96	39.38
Direção da disseminação	150°	310°
Ventos dominantes (para onde sopram)	180°	225°
Densidade de cacau (hectares de cacau por km ² de área arável)	0.84	0.65
Densidade populacional (hab./km ²) ²	582	445
Estradas ³ (Quilômetro de estrada por mil habitantes)	3.7	4.1
Número de países	1	7

A Figura 4 apresenta a as rosas do vento para diferentes localidades das regiões consideradas.

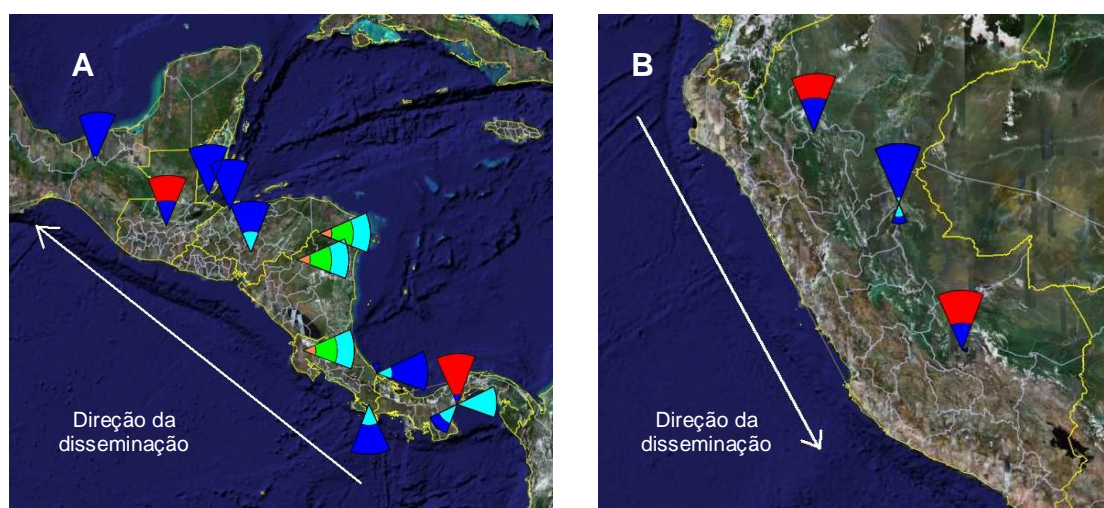


Figura 4. Representação no Google Earth de rosas dos ventos para diversas localidades e direção de disseminação da *M.roreri*. A - América Central, B - Peru.

Na América Central os ventos dominantes sopram para Sul e Oeste (225°), enquanto a direção de disseminação da *Monilia* foi do sudeste para o noroeste (310°). Se os ventos soprassem na mesma direção de dispersão da doença teriam sido 100% favorável a esta dispersão. Se soprassem em direção oposta teriam sido 0% favoráveis à dispersão da *Monilia* e se sua direção fosse de 220° teriam sido 50% favorável a disseminação da *M.roreri*. Por regra de três pode ser calculado que para cada grau que a direção dos ventos se afaste da direção ótima haveria uma redução de 0.56% na "favorabilidade" dos ventos.

Através da equação 2 pode ser calculada a favorabilidade da direção do vento em relação a direção da disseminação:

$$if = 100 - |dissem - vento| \times 0.56 \dots 2$$

onde *if* é o índice de favorabilidade, *dissem* é a direção (graus) para onde a doença dissemina-se e *vento* é a direção (graus) para onde o vento sopra.

Através da equação 2 verifica-se que na América Central os ventos foram 52.4% (100-|310-225|*0.56) favoráveis a dispersão da *Monilia* enquanto que no Peru foram 83.2 (100-|150-180|*0.56) favoráveis.

² <http://www.populstat.info/Americas/americas.html>

³ <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>

Verifica-se ainda que os ventos foram 1.6 vezes (83.2/52.4) mais favoráveis a disseminação da doença no Peru do que na América Central. Considerando-se que a velocidade de disseminação foi 2.7 vezes (106.0/39.4) mais elevada no Peru conclui-se que os ventos podem explicar parte da velocidade de disseminação da Monilia. Esta conclusão concorda com as observações de Evans (1986; 2002) e de Porras e Enríquez (1998) que acreditam que a disseminação da *M. rozeri* no Panamá e Costa Rica e em Honduras, respectivamente, foi principalmente através da atmosfera, impulsionada pelos ventos.

Embora não possa ser quantificado, a densidade de cacau é um pouco mais elevada (30%) no Peru do que na América Central o que pode também ter contribuído para a disseminação natural da doença.

A movimentação de pessoas em função da densidade populacional e da disponibilidade de estradas parece não ser relacionada com a velocidade de disseminação, uma vez que a uma maior densidade populacional no Peru corresponde também uma menor extensão de estradas.

No entanto a movimentação de pessoas pode ter sido um fator importante para explicar a maior rapidez de disseminação no Peru. O deslocamento de pessoas na América Central é muito mais limitado uma vez que na região existem fronteiras de sete países o que implica em muito maior dificuldade de deslocamento na região, quando comparado com o Peru, onde não existem barreiras fronteiriças. Mesmo assim Phillips-Mora *et alii* (2006) concluem que grande parte da dispersão da doença na América Central foi devida a agentes humanos.

3. Modelo Estocástico Simplificado para Introdução no Brasil

Este modelo tem como objetivo simular probabilisticamente a dispersão da Monilia do Peru para o Brasil tendo como base o padrão de disseminação que esta doença apresentou no passado, na América Central e Peru, ajustando os parâmetros para uma direção de disseminação do oeste para o leste.

3.1 Métodos

A simulação consta, basicamente, dos seguintes procedimentos:

1. Avaliação e escolha do tipo distribuição de probabilidades que descreve o padrão de dispersão da doença, assim como os parâmetros desta distribuição;
2. Desenvolvimento do modelo para gerar números ao acaso a partir da distribuição escolhida;
3. Simulação (Monte Carlo) da dispersão da Monilia

Com os dados da Tabela 2 foram construídas tabelas de distribuição de freqüência para escolha do tipo de distribuição adequada para descrever os dados reais em cada caso. Através do programa Simulación⁴ que testa o ajuste de dados reais a 25 distribuições probabilísticas contínuas foi escolhida a distribuição que melhor ajustou-se aos dados reais de disseminação da Monilia na América Central e Peru. O ajuste da distribuição selecionada foi avaliado através do teste de χ^2 entre os valores teóricos e os reais.

As simulações estocásticas (Monte Carlo) para avaliar as probabilidades de ingresso da Monilia no Brasil foram realizadas em modelo desenvolvido com o programa GoldSim 9.6 (versão acadêmica)⁵, considerando-se como ponto de partida da doença os locais mais orientais de sua ocorrência no Peru e ponto de destino o local mais ocidental de cultivo do cacau em Rondônia. A velocidade de disseminação média utilizada para a geração de números ao acaso da simulação foi ajustada utilizando-se a equação 2.

A Figura 5 apresenta os locais de origem e o ponto de destino considerado.

⁴ J.Varela. Simulación 4.0. <http://www.cema.edu.ar/~jvarela/simulacion.htm>, 2008

⁵ <http://www.goldsim.com>



Figura 5. Representação no Google Earth dos locais de origem no Peru e destino em Rondônia, considerados para realização das simulações. A figura mostra igualmente o software (Scale 2.0⁶) utilizado para a medição das direções

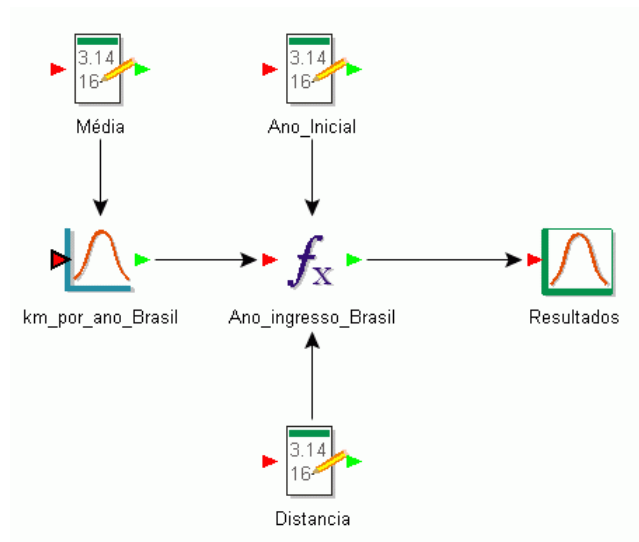


Figura 6. Representação do modelo utilizado no sistema GoldSim.

Na Figura 6 *Média* é a velocidade média de disseminação utilizada no gerador de números ao acaso (Tabela 5, Taxa média); *km_por_ano_Brasil* é o módulo que gera números ao acaso seguindo a distribuição de Weibull tendo como parâmetros a *Média* e o parâmetro de forma da distribuição, estimado pelo padrão de disseminação no Peru; *Ano_Inicial* é o ano em que a doença foi constatada pela primeira vez no ponto de origem; *Distância* é a distância do ponto de origem ao ponto de destino no Brasil (ver Figura 5); *Ano_ingresso_Brasil* é uma função para estimar o ano de introdução da doença no ponto de destino, conforme equação 3 e *Resultados* é o módulo que compila os resultados gerados.

$$AnoChegada = \frac{Distancia}{Velocidade} + AnoInicial \quad \dots 3$$

⁶ <http://www.sgrillo.net/scale.htm>

Cada simulação constou tipicamente de 1000 interações em cada caso, repetidas 100 vezes.

3.2 Resultados preliminares

Os dados utilizados para seleção da distribuição de probabilidades que melhor descrevesse o padrão de distribuição da *M.roreri* são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Distribuição de freqüências da velocidade de dispersão (km/ano) da *M.roreri* na América Central e Peru.

América Central		Peru	
Classes (km/ano)	Freqüência	Classes (km/ano)	Freqüência
< 25	0	< 40	0
25-30	2	60-80	2
30-35	7	80-100	3
35-40	8	100-120	4
40-45	2	120-140	3
45-50	0	140-160	2
50- 55	1	> 160	0
> 55	0		

A distribuição de probabilidades que melhor ajustou-se a disseminação real da doença foi a distribuição de Weibull, definida como:

$$f(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{b}\right)^c\right] \quad \dots 4$$

onde c é o parâmetro de forma e b o parâmetro de escala, sendo a média da distribuição estimada por:

$$m = b \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{c}\right) \quad \dots 5$$

onde Γ é a distribuição gama.

Nas Tabelas 5a e 5b são apresentados os dados reais e resultados estimados da velocidade de disseminação da *M.roreri* na América Central e Peru, respectivamente, com a utilização da distribuição de Weibull

Tabela 5a. Distribuições de freqüência e probabilidades de ocorrência das taxas de disseminação da *M.roreri* na América Central. Valores reais e estimados através da distribuição de Weibull.

Classes km/ano	Real		Estimado	
	Freqüência	Probabilidade	Freqüência	Probabilidade
20-25	0	0.00	1	0.03
25-30	2	0.10	2	0.12
30-35	7	0.35	7	0.34
35-40	8	0.40	8	0.42
40-45	2	0.10	2	0.09
45-50	0	0.00	0	0.00
50-55	1	0.05	0	0.00

As freqüências reais e estimadas foram comparadas através do teste de χ^2 que apresentou resultados não significativos o que valida a distribuição escolhida e seus parâmetros.

Os parâmetros da distribuição para a América Central apresentaram as seguintes estimativas:

<i>b</i> (escala)	=	34.1 km/ano
<i>c</i> (forma)	=	8.1
<i>média</i>	=	32.1 km/ano

Tabela 5b. Distribuições de freqüência e probabilidades de ocorrência das taxas de disseminação da *M.roreri* no Peru. Valores reais e estimados através da distribuição de Weibull.

Classes km/ano	Real		Estimado	
	Freqüência	Probabilidade	Freqüência	Probabilidade
40-60	0	0.00	0	0.04
60-80	2	0.14	2	0.11
80-100	3	0.21	3	0.21
100-120	4	0.29	4	0.28
120-140	3	0.21	3	0.23
140-160	2	0.14	1	0.11

Assim como os resultados da América Central, a distribuição escolhida e as estimativas de seus parâmetros foram validades pelo teste de χ^2 que apresentou resultados não significativos.

Os parâmetros da distribuição para o Peru apresentaram as seguintes estimativas:

<i>b</i> (escala)	=	109.6 km/ano
<i>c</i> (forma)	=	3.9
<i>média</i>	=	99.3 km/ano

Na Figura 7 são apresentados os gráficos das distribuições das probabilidades reais e estimadas pela distribuição de Weibull, para a América Central e Peru.

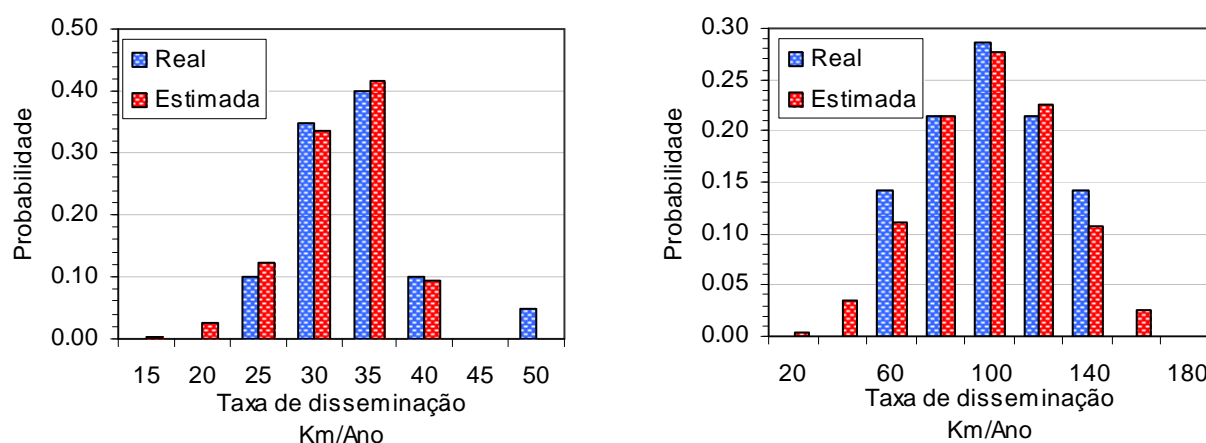


Figura 7. Probabilidades de ocorrências reais e estimadas das taxas de disseminação da *M.roreri* na América Central (A) e no Peru (B).

Para simulação estocástica o parâmetro de escala da distribuição de Weibull para o Peru foi ajustados para as disseminações do Peru para o Brasil (oeste para leste) considerando que os ventos dominantes no Acre e Rondônia sopram do norte para o sul, utilizando-se a equação 3.

Os valores do índice de favorabilidade e taxa média ajustada, bem como os outros dados utilizados nas simulação são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Locais de origem da disseminação da *M.roreri* do Peru para o Brasil, ano de introdução neste local, direção da disseminação para o Brasil, índice de favorabilidade, velocidade anual de dispersão corrigida (taxa média) considerando que 99.3 km/ano correspondem a um índice de favorabilidade de 83.2% e distância até o ponto de destino.

Origem	Ano inicial	Direção (graus)	Favorabilidade (%)	Taxa Media (km/ano)	Distância (km)
Yurimaguas	1991	105.0	58.0	69.2	1379
Chazuta	1993	100.0	55.2	65.9	1379
Pucallpa	1992	95.0	52.4	62.5	1180
Meteriato	1998	76.0	41.8	49.8	1025
La Convención	1998	67.5	37.0	44.1	979

O tipo de modelo desenvolvido é muito simplista e considera somente uma possível interferência da direção do vento para responder a pergunta: Se a monilia apresentar o mesmo padrão de disseminação que apresentou de 1988 a 1998 no Peru quando poderia infectar os cacauais de Rondônia?

Se for considerado isoladamente o patógeno oriundo dos diferentes pontos de origem a resposta está na Tabela 7 que apresenta os resultados das simulações, representados pela média do ano de ingresso no destino (Rondônia) a partir de cada origem.

Tabela 7. Locais de origem da Monilia no Peru (Origem), ano de ingresso no Brasil simulado com parâmetros da Tabela 6 e respectivos intervalos de confiança.

Origem	Ano de Ingresso	Intervalo de Confiança
Yurimaguas	2013.0	2012.6 - 2013.5
Chazuta	2016.0	2015.5 - 2016.5
Pucallpa	2012.9	2012.5 - 2013.4
Meteriato	2021.0	2020.5 - 2021.5
La Convención	2022.1	2021.6 - 2022.6

Se as diferentes origens forem consideradas em conjunto o ano de ingresso simulado poderá ser avaliado pela Figura 8, onde são mostradas as proporções acumuladas das simulações que resultaram na introdução da *M.roreri* em cada ano. Por exemplo, a linha azul, que refere-se a origem em Yurimaguas, informa que cerca de 17% das 1000 simulações realizadas para esta origem resultaram na introdução da monilia em 2008 (pico da curva), cerca de 8% em 2016, etc. A linha amarela indica que cerca de 30% das simulações realizadas resultaram na introdução da Monilia em 2011, sendo que 15% seriam devido a Monilia proveniente de Yurimaguas e 15% oriundos do patógeno proveniente de Chazuta. A linha marrom, por exemplo, mostra que, considerando os resultados de todas as origens, cerca de 58% das simulação realizadas indicaram 2016 como ano de introdução da doença.

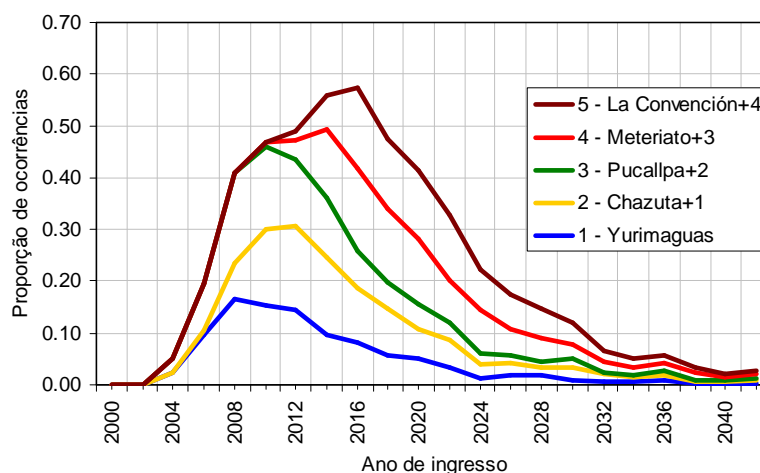


Figura 8. Proporção acumulada das simulações que resultaram na introdução da *M. royeri* em Rondônia, a partir das diferentes origens, em cada ano.

4. Modelo Gaussiano (de pluma)

Com o objetivo de aprofundar a avaliação da disseminação pelo ar de esporos da *M. royeri* e dar bases mais confiáveis ao desenvolvimento de planos de contingência que envolvam a contenção da doença foi iniciado o desenvolvimento de modelos para disseminação aérea da doença.

4.1 Métodos

Os modelos de pluma ou Gaussianos para dispersão de pólen e esporos são dos mais utilizados para avaliação e simulação da dispersão de partículas na atmosfera, conforme pode ser visto nos trabalhos de Garner e Cannon (1995), De Jong *et alli* (1999) e Spijkerboer *et alli* (2002).

Estes modelos (equação 6) tem base na distribuição normal ou de Gauss das partículas liberadas no ar, nas direções horizontais e verticais sob condições de equilíbrio dinâmico. A distribuição normal da pluma é modificada em distâncias maiores devido ao efeito da reflexão turbulenta na superfície e na camada superficial quando a altitude de mistura é baixa. A largura da pluma é determinada por σ_y e σ_z que, por sua vez, são determinados por classes de estabilidade (Pasquill, 1961) ou pelo tempo de deslocamento desde a fonte. Uma limitação severa dos modelos de pluma é que, como eles tem base em aproximações para condições de equilíbrio dinâmico, não levam em conta o tempo necessário para as partículas atingirem seu destino (Holmes e Morawska, 2006).

$$C_{x,y,z} = \frac{Q}{2 \times \Pi \times \sigma_y \times \sigma_z \times \mu} \times \exp\left(\frac{-y^2}{2 \times \sigma_y^2}\right) \times \exp\left(\frac{-(z-h)^2}{2 \times \sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z+h)^2}{2 \times \sigma_z^2}\right) \dots 6$$

onde C é a concentração de esporos depositados (esporos/m³), x , y e z são as coordenadas na direção do vento, lateral e vertical, respectivamente, Q é a emissão de esporos (esporos/segundo), σ_y e σ_z são os coeficientes de dispersão lateral e vertical, respectivamente, que dependem da distância x , e h é a altura na qual os esporos são liberados.

Nesta primeira versão do modelo considerou-se que a emissão e recepção dos esporos estão ao nível do solo, o que simplifica a equação 6 conforme equação 7:

$$C_{x,y} = \frac{Q}{\Pi \times \sigma_y \times \sigma_z \times \mu} \times \exp\left(\frac{-y^2}{2 \times \sigma_y^2}\right) \dots 7$$

Os coeficientes de dispersão σ_y e σ_z são função da distância no eixo x (a favor do vento) e da estabilidade atmosférica. Existem diversos métodos para se estimar em uma combinação de resultados experimentais e a teoria. Uma relação entre estes coeficientes e a distância da origem, que é utilizada por vários autores, é uma simples relação de potenciação que está implícita nos modelos de dispersão de esporos descritos em Gregory (1961).

A relação entre estes coeficientes esta descrita na equação 8:

$$\sigma_y = \alpha x^\beta \text{ e } \sigma_z = \gamma x^\delta \dots 8$$

onde x é a distância na direção do vento e α, β, γ e δ são coeficientes que dependem da categoria de estabilidade da atmosfera e foram, calculados para uma grande variedade de condições, conforme dados da Tabela 8 (Garner e Cannon, 1995).

Tabela 8. Categorias de estabilidades atmosférica e valores das constantes utilizadas para cálculo dos coeficientes de dispersão (Equação 8)

Categoria de Pasquill	Estabilidade atmosférica	α	β	γ	δ
A	Muito instável	1.38	0.76	0.32	0.95
B	Moderadamente instável	1.00	0.76	0.68	0.81
C	Pouco instável	0.71	0.76	0.96	0.67
D	Neutro	0.50	0.76	1.32	0.53
E	Levemente estável	0.33	0.76	1.98	0.39
F	Moderadamente estável	0.27	0.76	2.28	0.31

As categorias de estabilidade atmosférica são apresentadas na Tabela 8, conforme (Garner e Cannon, 1995)

Tabela 9. Categorias de estabilidade atmosférica baseadas na velocidade do vento, insolação e cobertura de nuvens.

Velocidade do vento (m/s) a 10 metros de altura	Insolação no dia			Noite	
	Forte	Moderado	Leve	> 4/8 de cobertura de nuvens	<= 3/8 de cobertura de nuvens
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Para solução da equação 7 e apresentação dos resultados em três dimensões esta se desenvolvendo o programa SimPluma em Visual Basic com a interface gráfica apresentada na Figura 9.

Modelo de Pluma

Velocidade do vento (m/s) a 10 metros de altura	Insolação no dia			Noite	
	Forte	Moderado	Leve	> 4/8 de cobertura de nuvens	<= 3/8 de cobertura de nuvens
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Stab. Categ: Delta X (m):
 Lat. Ini: X Max (km):
 Lon. Ini: Y Max (km):
 Emissão (unid/sec):
 Gravar > do que:

Direção do vento:
 Vel.Vento (m/s):

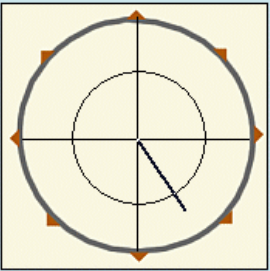


Figura 9. Tela de entrada do programa para simulação da dispersão da *M. roleri* com modelo Gaussiano.

A interface do modelo (Figura 9) apresenta na parte superior a tabela das categorias de estabilidade da atmosfera (Tabela 8) para informação da categoria a ser utilizada na simulação (campo *Stab.Categ*). Nos campos *Lat.ini* e *Lon. Ini* são informadas as coordenadas geográficas (graus decimais) do local de emissão de esporos. Estes dados serão utilizados para gerar um arquivo georeferenciado que é exportado para o Google Earth para ser analisado. Os campos *Delta X (m)*, *X Max (km)* e *Y Max(km)* referem-se ao intervalo para integração espacial (2 metros no exemplo apresentado na Fig. 9), comprimento máximo (0.1 km na Fig. 9) e largura máxima (0.05 km na Fig. 9), respectivamente. No campo *Emissão* deve ser informada a taxa de emissão de esporos em unidades por segundo. O campo *Gravar > do que:* filtra os valores gerados, de maneira que só são gravadas as informações da concentração de esporos (esporos/m^3) maiores que a informada no campo. Nas rosas é informada a direção do vento assim como sua velocidade.

O programa calcula a concentração de esporos (esporos/m^3) com utilização das equações 7 e 8 e dos dados informados, gravando as informações em um arquivo de texto separado por vírgula com o seguinte formato:

identificação, latitude, longitude, concentração de esporos

Este arquivo é aberto no aplicativo GE-Graph 2.2.0⁷ que gera o arquivo do tipo kml, exportado e aberto pelo Google Earth.

Como background gerou-se com o programa Vensim DSS® versão 5.3a, da Ventana Systems, Inc. (Ventana 2003) coordenadas geográficas ao acaso obedecendo a distribuição binomial negativa que representassem aproximadamente a distribuição de plantas de cacau nativo na floresta amazônica. Estas coordenadas foram utilizadas pelo aplicativo GE-Path 1.4.1⁸ para representar no Google Earth as plantas de cacau, assim como uma demarcação do terreno em quadrados de 1 ha.

4.2. Resultados

O exemplo de uma das simulações realizadas com o programa SimPluma é apresentado na Figura 10. Esta figura mostra a concentração de esporos ao nível do solo, considerando o estado de equilíbrio dinâmico e uma fonte pontual de $7E9$ esporos por segundo também ao nível do solo. O gráfico representa a

⁷<http://www.sgrillo.net/googleearth/gegraph.htm>

⁸ <http://www.sgrillo.net/googleearth/gepath.htm>

concentração no eixo central, a favor do vento, assim como em eixos paralelos espaçados de 10 m do eixo central. Informações desta natureza juntamente com informações relativas à relação entre número de esporos e infecção de *M.roreri* poderão orientar com segurança possíveis programas de contenção da doença.

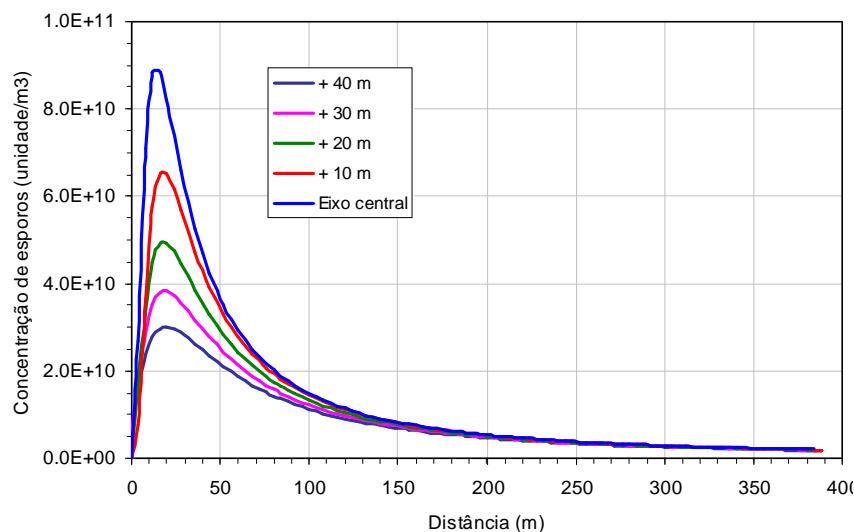


Figura 10. Variação na concentração de esporos (unidades/m³) em função da distância de uma fonte pontual. A figura mostra a concentração no eixo central e em eixos paralelos e em eixos paralelos espaçados a 10 m do eixo central.

A Figura 11 apresenta os resultados desta simulação exportados para o Google Earth assim como o background representando plantas de cacao distribuídas ao acaso (distribuição binomial negativa) com uma densidade aproximada de 3 plantas por hectare e demarcação do terreno em quadrados de um hectare.

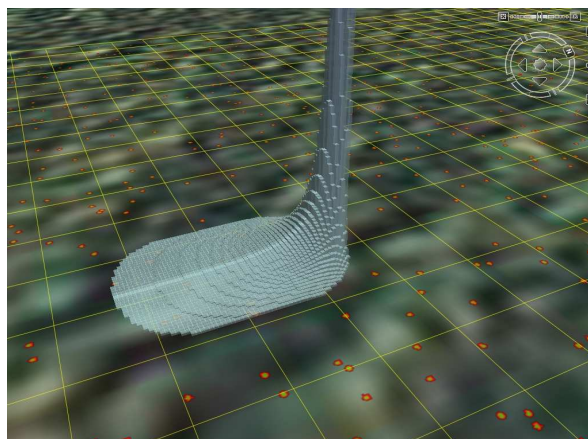


Figura 11. Representação gráfica, no Google Earth, de resultados da simulação da dispersão da *M.roreri* segundo modelo de pluma. Os quadrados representam um ha e os pontos plantas de cacao com densidade de cerca de três plantas por ha. A altura das barras representa a concentração de esporos.

Uma vez que esta metodologia está ainda em fase de desenvolvimento não cabe discussão adicional dos resultados obtidos.

5. Dispersão aérea a longa distância: Fundamentos

A migração e dispersão são as duas das principais estratégias evolutivas adotadas por organismos para colonizar locais novos. As migrações de pássaros e mamíferos à procura de novos locais e fontes de alimentação ocorrem de uma maneira ordenada e coordenada com mínimo sacrifício de progênie. Por outro lado os patógenos das plantas produzem enormes quantidades de esporos que são transportados passivamente, se espalhando em todas as direções, e finalmente pousando em locais aleatórios, compatíveis ou não com seu estabelecimento. Esta aleatoriedade é compensada pelo enorme número de esporos produzidos por unidade de área (Nagarajan e Singh,1990).

A Figura 12 (Main *et alli*, 2005) apresenta um esquema do sistema de transporte atmosférico de esporos.

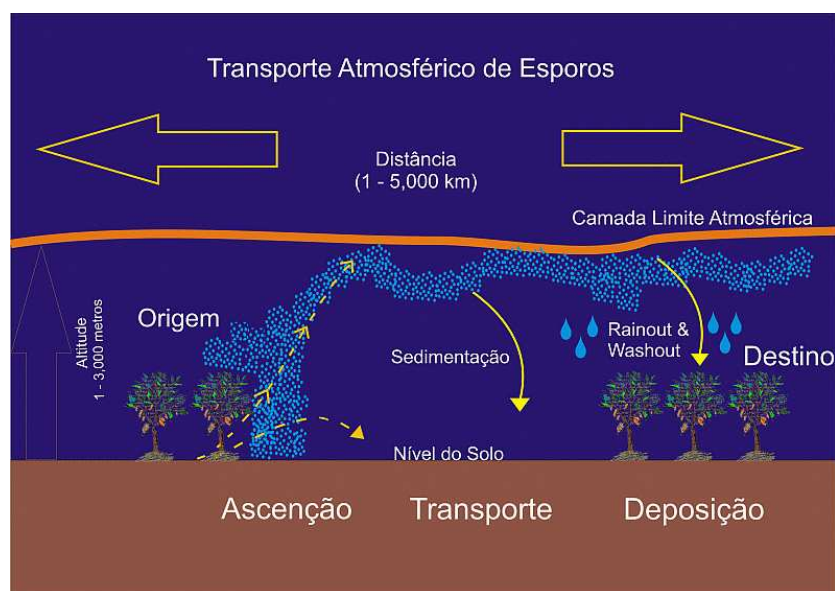


Figura 12. Esquema representado o sistema de transporte atmosférico de partículas (esporos, pólen, sementes, etc.), adaptado de Main *et alli* (2005).

O modo que estes propágulos se deslocam, as distâncias horizontais e verticais cobertas, o tempo de deslocamento, etc. dependem exclusivamente de forças externas de natureza física e nos últimos 50 anos pesquisadores de diversos países desenvolveram modelos teóricos para descrever estas características, notadamente Gregory (1945), Waggoner (1965) e Schrödter (1960) e entre outros. Atualmente estes modelos vêm sendo aplicados com sucesso na avaliação e manejo de risco de doenças como a ferrugem da soja, conforme exposto por Pan *et all* (2005) por exemplo.

5.1 Avaliação da distância e trajetória média de dispersão

A movimentação horizontal é um dos fatores mais importantes na dispersão de patógenos de plantas sendo o vento considerado o mais importante fator de influencia desta movimentação. O componente horizontal do movimento do ar determina a direção e velocidade do movimento dos esporos. No entanto sob a influencia somente da gravidade e do vento os esporos não poderiam alcançar altitude superior á de sua origem e seu deslocamento horizontal alcançaria somente uns poucos metros. Observações mostraram que esporos podem alcançar grandes altitudes sendo a turbulência atmosférica responsável por sua ascensão.

5.1.1 Métodos

Para cálculo da movimentação horizontal e vertical dos esporos na atmosfera é necessária a avaliação da velocidade de queda (em ar calmo), característica importante de sua dispersão.

A velocidade de queda é devida a atração gravitacional e depende das características do meio (ar, neste caso) e da partícula, como suas dimensões e densidade, podendo ser estimada através da lei de Stoke, conforme equação 9 (Schrödter, 1960):

$$v_k = \frac{2dg}{9\eta} r^2 \dots 9$$

onde v_k = velocidade de queda (m/s); η = coeficiente de viscosidade do ar (kg/m.s); d = densidade da partícula (kg/m³); r = raio da partícula (m); g = aceleração da gravidade (m/s²).

A monília, no entanto, além de produzir conídios globosos produz também conídios elipsóides (Ran, 2005), sendo então necessário alterar a equação 9, conforme Schrödter (1960), para:

$$v_e = \frac{2dg}{9\eta} \sqrt[3]{a} \times b \sqrt[3]{b^2} \dots 10$$

onde v_e = velocidade de queda; a = eixo maior (m) e b = eixo menor (m).

Schrödter (1960) desenvolveu modelos teóricos para dispersão de esporos, conforme equações seguintes.

A trajetória provável de vôo pode ser estimada através da equação 11:

$$z = 0.4769 \sqrt{\frac{4Ax}{\delta U}} - \frac{v}{U} x \dots 11$$

onde z = altura do vôo; A = coeficiente de troca de massa; x = distância horizontal desde a "decolagem"; δ = densidade do ar; U = velocidade do Vento e v = velocidade de queda

A distância máxima pode ser calculada também através da equação 11, igualando-se z a zero. Neste caso x vai representar a distância percorrida até o pouso do esporo, conforme equação 12.

$$X = 0.91 \frac{AU}{\delta v^2} \dots 12$$

onde X é a distância mais provável atingida pelo esporo.

A altura máxima a que poderia chegar o esporo é representada por Z na equação 13:

$$Z = 0.2274 \frac{A}{\delta v} \dots 13$$

A duração de vôo τ pode ser calculada através da equação 14.

$$\tau = 0.91 \frac{A}{\delta v^2} \dots 14$$

Para avaliação das probabilidades de esporos de Monília atingirem território Brasileiro através de dispersão natural pelo vento, as trajetórias mais prováveis de deslocamento foram calculadas através da equação 11, utilizando-se as médias de velocidade e direção do vento de dezembro e junho para cinco diferentes locais (Tabela 12). Estas trajetórias foram convertidas para arquivos do tipo kml para serem transferidas ao Google Earth. A conversão foi executada através do programa GEPATH⁹.

5.5.2 Parametrização

Os valores das variáveis necessárias para a solução das equações 9 a 14 foram obtidos na literatura científica conforme discriminado na Tabela 10.

⁹ www.sgrillo.net/gepath/

Tabela 10. Valores das variáveis utilizadas para solução das equações 9 a 14.

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade	Fonte
d	Densidade do esporo	740	km/m ³	Tesmer and Schnittler (2007)
g	Aceleração da gravidade	9.80665	m/s ²	Wikipedia ¹⁰
η	Coefficiente de viscosidade do ar	1.82E-5	kg/m.s	Wikipedia ¹¹
r	Raio (conídios globosos)	4 - 7.5 (mediana 5.75)	μ	Ran et alli (2004)
a	Eixo maior (conídios elipsóides)	8 - 20 (mediana 14)	μ	Ran et alli (2004)
b	Eixo menor (conídios elipsóides)	5 - 14 (mediana 9.5)	μ	Ran et alli (2004)
A	Coefficiente de troca de massa	1 - 10 m altitude: 0.1 10 - 100 m altitude: 1.0 100 - 500 m altitude: 5.0	kg/m.s	Schrödter, 1960
δ	Densidade do ar (25°C)	1.184	kg/m ³	Wikipedia ¹²
U	Velocidade do vento	2.05	m/s	Kalnay, 1996 ¹³

Os dados de vento são provenientes da National Oceanic & Atmospheric Administration-NOAA (Kalnay, 1996)⁵, referentes as médias mensais de *U-wind* e *V-wind* (10 m de altitude), de 1950 a março de 2008 no formato NetCDF (network Common Data Form). Selecionou-se cinco pontos geográficos nas áreas de ocorrência da Monília no Peru, correspondentes às coordenadas geográficas apresentadas na Tabela 11, convertendo-se então estes dados para ASC (.cdl) com o programa *ncBrowse*¹⁴. Através da velocidade do vento zonal (*U-Wind*) e meridional (*V-wind*) calcularam-se as correspondentes velocidades e direções do vento, utilizando-se o algoritmo (sub-rotina *uvrotdd*) desenvolvido pelo Center for Analysis and Prediction of Storms, University of Oklahoma¹⁵:

Para cálculo da velocidade média do vento:

$$Vel = \sqrt{Uwind^2 + Vwind^2} \dots 15$$

onde *Uwind* e *Vwind* são os componentes austral e meridional medidos

Para cálculo da direção do vento:

$$Dir = Pr - 360 \times \text{Int}\left(\frac{Pr}{360}\right) \dots 16$$

onde *Dir* é a direção do vendo em graus e *Pr* é calculado em função dos valores do vento zonal e meridional conforme o seguinte algoritmo:

```

IF Vwind > 0 THEN Pr = ArcTan(Uwin/Vwin) + 180
ELSE IF Vwind < 0 THEN Pr = ArcTan(Uwin/Vwin) + 360
ELSE IF Uwind <= 0 THEN Pr = 270
ELSE Pr = -90

```

¹⁰ <http://en.wikipedia.org/wiki/Gravity> - acessado em 11 de abril de 2008

¹¹ <http://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity> - acessado em 11 de abril de 2008

¹² http://en.wikipedia.org/wiki/Air_density (acessado em 11/04/2008)

¹³ <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.derived.surfaceflux.html> (acessado em 16/04/2008)

¹⁴ <http://www.epic.noaa.gov/java/ncBrowse/> (acessado em 15/04/2008)

¹⁵ http://www.caps.ou.edu/ARPS/arpbrowser/arp5.0IHOP2browser/html_code/arpbrowser/mapproj3d.f90.html#UVROTDD (acessado em 14/04/2008)

Os dados selecionados foram copiados para Excel para cálculo das médias mensais da velocidade e direção do vento.

Tabela 11. Coordenadas geográficas dos locais utilizados para avaliação da dispersão de *M.roreri*.

Denominação	Local próximo	Latitude	Longitude
1A	Tarapoto	6.67 S	76.88 W
2A	Naranjal	8.37 S	74.76 W
3A	Puesto Varadero	10.47 S	73.13 W
4A	Melequiato	12.38 S	73.13 W
5A	Yurimaguas	5.69 S	75.96 W

Tabela 12. Médias (1950-2008) de velocidade e direção do vento para os cinco locais selecionados (Kalnay, 1996).

Denominação	Mês	Velocidade (m/s)	Direção (Graus)
1A	Jun	1.74	242.9
	Dez	1.07	201.9
2A	Jun	0.88	246.7
	Dez	0.96	188.2
3A	Jun	0.51	209.8
	Dez	1.14	174.9
4A	Jun	2.14	181.9
	Dez	2.22	160.3
5A	Jun	1.58	255.3
	Dez	0.84	230.5

Os dados de precipitação pluviométrica foram obtidos da National Oceanic & Atmospheric Administration-NOAA/National Climatic Data Center¹⁶ que disponibiliza dados globais de precipitação abrangendo, pelo menos, dez anos de informações. Desse arquivo se extraiu os dados de quatro localidades (Sisa, Pucallpa, Machente e Yurimaguas) que mais se aproximavam dos locais apresentados na Tabela 11, calculando-se então a média da precipitação mensal.

5.1.3. Resultados e discussão

Partículas leves como esporos, pólen ou patógenos podem ser passivamente transportados na atmosfera por milhares de quilômetros (Campbell *et al.*, 1999; Brown & Hovmoller, 2002).

A movimentação de esporos a longa distância é responsável pela disseminação de diversas doenças. Por exemplo, Pan *et alli* (2005) expõe a disseminação pela atmosfera da ferrugem asiática da soja, da África para a parte oriental América do Sul (mais de 7.000 km), em 1999, daí para a Colômbia em março de 2004 e no outono deste ano da Colômbia para o sudeste dos Estados Unidos (mais de 3.000 km).

No entanto o início destas longas jornadas depende criticamente da relativamente rara ocorrência de sopros de vento, em pequena escala, que ultrapassam a velocidade limite requerida para arrancar pequenas partículas da superfície da terra (Burrows, 1986; Aylor & Flesch, 2001)

Os esporos de *M.roreri* são bastante pequenos, apresentando reduzida velocidade de queda, conforme Tabela 13, o que proporciona um deslocamento de grande amplitude (equação 12).

A Tabela 14 mostra que os esporos de forma globosa de menor diâmetro poderiam atingir até 780 km, enquanto os elípticos maiores seriam depositados até 4 km do ponto de origem.

¹⁶ <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/ghcn-monthly/index.php> (acessado em 17/04/2008)

Tabela 13. Velocidade de queda de conídios de diferentes formas e tamanhos de *M.roreri*.

Forma e tamanho dos Conídios	Velocidade de queda (terminal)	
	m/s	cm/s
Globoso pequeno	1.42E-03	0.141531
Globoso médio	2.92E-03	0.292460
Globoso grande	4.98E-03	0.497569
Elipsóide pequeno	2.59E-03	0.258649
Elipsóide médio	9.08E-03	0.908474
Elipsóide grande	1.95E-02	1.952633

A nuvem de esporos originária de um local infectado poderia ir depositando esporos na direção do vento, de 4 a 780 km de sua origem, considerando a média (últimos 58 anos) das velocidades do vento ventos nos locais escolhidos.

Deve ser notado que o vento apresenta elevada variabilidade e que seus valores médios são somente uma indicação aproximada para avaliação da ordem de grandeza das características de deslocamento dos conídios da *M.roreri*.

Durante seu deslocamento horizontal os esporos de menor tamanho na nuvem poderiam atingir a mais de 100 m de altitude e ficar suspensos por cerca de quatro dias (Tabela 14)

Tabela 14. Distância (km), altitude (m) e duração (h) de deslocamento de conídios de *M.roreri* em função de seu tamanho e forma.

Conídios	Distância (km)			Altitude(m)			Duração (h)		
	Pequeno	Médio	Grande	Pequeno	Médio	Grande	Pequeno	Médio	Grande
Elipsóide	234	19	4	68	19	9	29.0	2.3	0.5
Globoso	780	183	63	123	60	35	96.7	22.7	7.8

A trajetória mais provável de deslocamento de nuvem, considerando-se os valores das variáveis apresentados na Tabela 10 é representada na Figura 13 para os esporos pequenos, de forma elíptica e globosa.

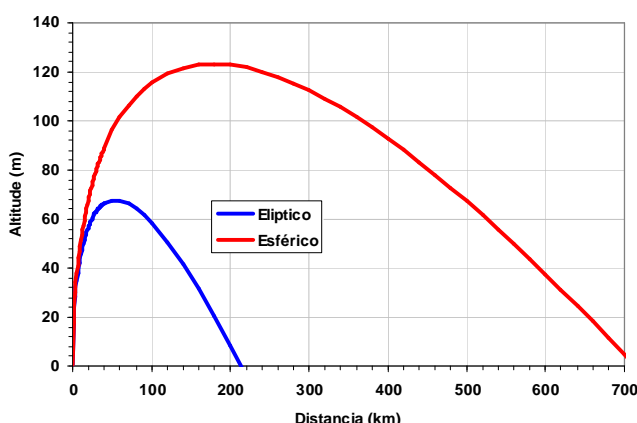


Figura 13. Trajetória de deslocamento de esporos pequenos de *M.roreri*, calculada através da equação 11.

Verifica-se assim, que potencialmente, a depender da direção do vento na região, os esporos de *Monilia* poderiam chegar em território Brasileiro carregados pelo vento.

Quando se considera também a direção média do vento e sua variação sazonal verifica-se que esporos originários nas regiões 1A, 2A e 5A poderiam, com facilidade, atingir o território Brasileiro carregados pelo vento conforme apresentado na Figura 14. Deve se notar que as trajetórias da Figura 14 foram calculadas utilizando-se os dados de esporos globosos de menor tamanho que são os que atingem as maiores distâncias. Verifica-se que nas regiões mais ao norte a direção dos ventos em junho favorece a dispersão dos esporos para o território brasileiro. Resta averiguar se a concentração de esporos seria suficiente para ocasionar infecção, assim como, se haveria densidade de hospedeiros suficiente e se as condições ambientes seriam adequadas.



Figura 14. Trajetórias prováveis de nuvens de esporos originárias de cinco diferentes locais do Peru. A escala vertical está multiplicada por 1000. As linhas verdes correspondem aos ventos médios de junho e as azuis de dezembro.

Observando-se os dados referentes a precipitação pluviométrica, apresentados na Figura 15, verifica-se que as maiores velocidades de vento que ocorrem no meio do ano correspondendo as épocas de menor precipitação. Este fato pode estar retardando o ingresso na *Monilia* no Brasil por diminuir a probabilidade de infecção dos esporos depositados por falta de umidade.

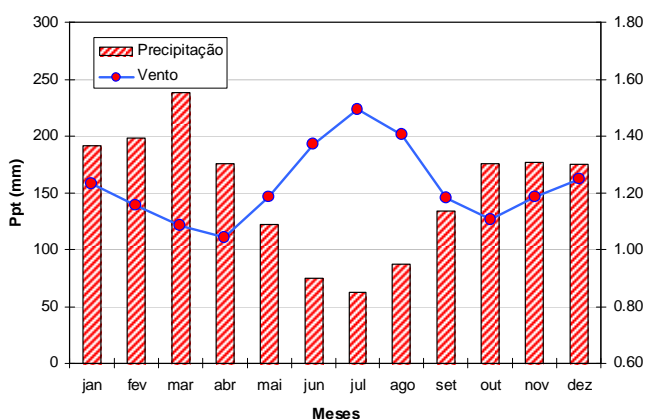


Figura 15. Velocidade médias dos ventos e precipitação pluviométrica média (10 anos) nas localidades de Sisa, Pucallpa, Machente e Yurimaguas, Peru.

A introdução da *Monilia* no Panamá, em 1958, pode ter sido, segundo Evans (2000), pela disseminação aérea de esporos originários da Colômbia. Este autor também atribui a introdução na Costa Rica por disseminação aérea de esporos do Panamá (Evans, 1986). Porrás e Enríquez (1998) concluíram que

M.roreri chegou a Honduras levada por furacão (Furacão César ocorreu de 24 a 29 de julho de 1996 passando por Nicarágua e depois por Honduras).

Assim, se considera plausível a introdução da Monilia no Brasil por esporos disseminados pelo ar com origem em zonas infectadas do Peru.

Para avaliar esta conclusão com mais profundidade utilizou-se o modelo HYSPLIT para simulação das dispersão de esporos na região.

6. Dispersão aérea a longa distância: Modelo HYSplit

6.1. Métodos

Para simulação numérica da dispersão utilizou-se o modelo HYSPLIT 4.8 (*HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory – versão 4.8*) (Draxler, e Hess, 1998). Utilizaram-se gráficos de trajetória e dispersão dos esporos gerados e visualizados através do próprio modelo.

O modelo HYSplit é um sistema completo para computar trajetórias complexas e simular dispersão e deposição de moléculas e partículas usando tanto os enfoques dos modelos de pluma como de partículas. Ele consiste de uma biblioteca com estrutura modular com programas principais para cada aplicação primária: trajetórias e concentração no ar.

Para utilização do modelo são requeridos, a intervalos de tempo regulares, dados meteorológicos em grade latitude/longitude ou em uma das três projeções de mapas (Polar, Lambert, Mercator). Os dados de entrada são então interpolados em uma sub-grade interna, centrada, o que reduz a necessidade de memória e o tempo de computação.

Para cálculo das concentrações no ar é necessário informar as características físicas das partículas consideradas, como raio e densidade ou a velocidade de queda.

A dispersão é calculada assumindo ou uma distribuição Gaussiana horizontal *Top-Hat* dentro de uma pluma ou a dispersão Lagrangiana de um número fixo de partículas.

Uma única pluma liberada vai se expandir até que seu tamanho exceda o tamanho de uma célula da grade meteorológica quando é então dividida em várias plumas. Um enfoque alternativo combina os métodos de pluma e partícula assumindo uma distribuição de pluma na horizontal e uma dispersão de partículas na vertical.

As concentrações no ar são calculadas, para plumas, em pontos específicos da grade e para partícula como concentração média da célula.

Os dados meteorológicos requeridos para as simulações podem ser obtidos de arquivos já existentes ou de modelos de previsão que fornecem dados formatados para o HYSplit. Adicionalmente são disponíveis diferentes programas pré-processadores para converter os dados de re-análise da NOAA, NCAR (National Center for Atmospheric Research) re-analysis, ou do ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) em um formato compatível para alimentação direta do HYSplit.

Este sistema de modelagem inclui uma interface gráfica para o usuário que permite configurar as simulações de trajetória, concentração e deposição. A parte de pós-processamento do sistema incorpora programas para gerar gráficos coloridos ou não.

A descrição completa das equações e métodos de cálculo das trajetórias e concentrações podem ser encontradas em Draxler e Hess (1997).

Este modelo foi validado através de diversas comparações de resultados simulados com dados reais e vem sendo utilizado tanto para análise e previsão da dispersão de poluentes químicos (Lee et alli, 2004) e físicos (Formenti *et alli*, 2001) como de pólen (Mahura *et alli*, 2007) ou de esporos Isard *et alli*, 2004).

6.1.1. Trajetórias reversas

O modelo HYSplit oferece a opção de simular trajetórias reversas, ou seja, a partir de especificação das coordenadas de destino traçar a trajetória até os possíveis pontos de origem, em função das características climáticas, especialmente de vento, que ocorreram no intervalo de tempo especificado.

Inicialmente utilizou-se esta opção para avaliar a possibilidade da introdução da *Monilia* na América Central e Peru ter sido por disseminação aérea de esporos da Colômbia e Equador respectivamente.

Considerando-se que a *M. roseri* foi encontrada pela primeira vez na América Central no Panamá, em abril de 1956, em localidades da província de Darién-Panamá (Philip-Mora *et alli* 2006), escolheu-se Playa (latitude 7.96, longitude -77.40) como localidade de destino. Realizaram-se diversas simulações utilizando-se dados climáticos que precederam em até um ano a data em que a *Monilia* foi encontrada nesta localidade.

Para averiguar a introdução no Peru escolheu-se como pontos de origem as localidades de Jaen (latitude -5.71, longitude -78.81), Baguá (latitude -5.64, longitude -78.52) e Chapiza (latitude -3.70, longitude -77.72), onde a *Monilia* foi encontrada em 1988 (Hernandez *et alli*, 1990). Também neste caso realizaram-se diversas simulações utilizando-se dados climáticos que precederam em até um ano a data em que a *Monilia* foi encontrada nestas localidades.

Esta mesma metodologia foi utilizada para verificar a possibilidade de introdução por via aérea nas localidades de Yurimaguas, Quillabamba, Meteriato e La Convención cujas coordenadas e anos de introdução são apresentados na Tabela 2b.

Utilizando-se também esta metodologia para averiguar a possibilidade de introdução da *M. roseri* no Brasil estabelecendo-se como local de destino o de coordenadas -9.98 e -64.00 que corresponde a um dos pontos mais ocidentais da área de cacau em Rondônia. Utilizaram-se os dados climáticos de fevereiro, abril, junho, agosto, outubro e dezembro de 2000 iniciando-se as simulações no dia 15 de cada mês. Cada simulação deve a duração de 144 horas, ou seja, a partir do tempo inicial a simulação retrocedeu por 6 dias, até o ponto de origem.

6.1.2. Deposição de esporos

Para avaliar-se a viabilidade de introdução no Brasil por dispersão aérea de esporos realizaram-se simulações da dispersão e deposição de esporos utilizando-se dados climáticos dos meses de janeiro e junho de 2000, 2004 e 2006 e de fevereiro, abril, junho, agosto, outubro e dezembro de 2007. Cada simulação teve início no 15º dia do mês correspondente tendo a duração de 72 horas.

6.2 Parâmetros usados no modelo

6.2.1. Dados Climáticos

Foram utilizados os dados climáticos de re-análise do National Center for Atmospheric Research (NCAR) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), com arquivos mensais disponíveis¹⁷ de janeiro de 1948 a dezembro de 2007.

Os dados são ordenados em uma grade global de 2.5 x 2.5 graus (144 x 73 pontos) abrangendo latitudes de 90S a 90N e longitudes de 0E a 357.5E. Incluem vetores de vento e temperatura em 17 altitudes diferentes e registrados a cada 6 horas.

¹⁷ <ftp://gus.arlhq.noaa.gov/pub/archives/reanalysis/>

6.2.2. Fonte de esporos

Para as simulações de concentração e deposição de esporos considerou-se que sete bilhões de esporos por fruto (Ran, 2005) e seriam liberados em 24 horas o que corresponderia a 291.666.667 esporos/hora.fruto. Considerando 20 frutos infectados por planta e 600 plantas por hectare seriam produzidos 3.500.000.000.000 esporos por hora por hectare. Supondo que somente 1% destes esporos fosse carregado por correntes ascendentes seriam então 35.000.000.000 esporos por hectare por hora. Esta foi a taxa de emissão de esporos a 10m de altitude informada ao programa *HYSplit* para cada um dos nove locais utilizados descritos na Tabela 15. A emissão de esporos ocorreu sempre nas primeiras 24 horas de cada simulação.

Tabela 15. Locais considerados como origem de esporos nas simulações com o modelo HYSplit.

Local	Latitude	Longitude
Baguá	-5.70	-78.42
Yurimaguas	-5.96	-76.29
Psicoyacu	-6.94	-76.61
San Alexandro	-9.01	-75.59
Naranjal	-8.31	-74.75
San Francisco de Satipo	-11.21	-74.74
Quellococha	-12.40	-74.14
Sabeti	-11.78	-73.29
Quillabamba	-12.83	-72.52

6.3. Resultados e discussão

6.3.1. Trajetórias reversas

A maioria das simulações realizadas para verificar a introdução da *Monilia* no Panamá resultou, como local de origem dos esporos, algum ponto do oceano Pacífico, mas em algumas ocasiões as condições ambiente foram favoráveis para transporte aéreo dos esporos da Colômbia para Paya no Panamá. A Figura 16 mostra, por exemplo, a trajetória de partículas que atingiria a localidade de Paya as 18 horas de 14 de junho de 1955. Considerando que esta nuvem, a principio, poderia ter origem em qualquer ponto da trajetória é possível que esporos da *Monilia* fossem levados da Colômbia para o Panamá desta forma, para este local e nesta data ou para outros locais em outras datas que apresentassem condições favoráveis.

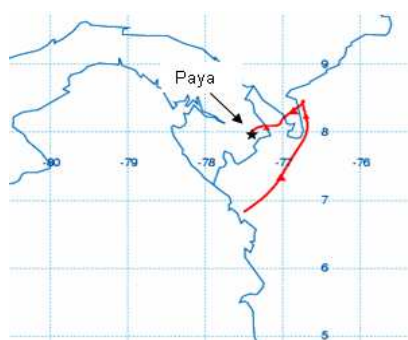


Figura 16. Trajetória gerada pelo modelo HYSplit tendo como destino a localidade de Paya, no Panamá, retrocedendo por 48 horas a partir das 18 horas de 14 de junho de 1955.

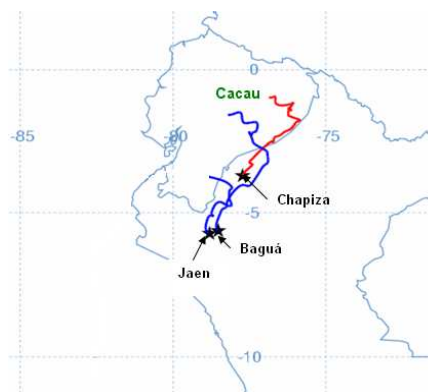


Figura 17. Trajetória gerada pelo modelo HYSplit tendo como destino as localidades Jaen, Baguá e Chapiza, no Peru, retrocedendo por 144 horas a partir das 0 horas de 21 de outubro de 1986.

Quando se considera como pontos de destino as localidades do Peru, na maioria das simulações os resultados mostraram trajetórias tendo origem em algum ponto do oceano Pacífico também. No entanto existem, ocasionalmente, condições climáticas, especialmente de ventos, que permitiriam a introdução da Monilia no Peru a partir do Equador. A Figura 17 apresenta, por exemplo, a trajetória reversa de esporos que chegariam nas localidades de Jaen, Baguá e Chapiza (onde a Monilia foi encontrada pela primeira vez em 1988). Estas trajetórias foram gerada com o HYSplit, iniciando-se a simulação em 21 de outubro de 1986 e retrocedendo 148 horas para determinar seus pontos de origem. Deve ser notado que, embora a *M.roreri* tenha sido encontrada no Peru pela primeira vez em 1988, Rios-Ruiz (2004), baseado em informações de produtores da região, conclui que a doença deve ter sido introduzido em 1986.

Embora a trajeto que termina em Jaen tem início muito ao sul do Equador, as trajetórias até Baguá e Chapiza passam por regiões do Equador onde existe o mesmo grupo genético da *M.roreri* do Peru. Conclui-se que a introdução de Monilia no Peru pode ter sido por via aérea, a partir de esporos provenientes do Equador.

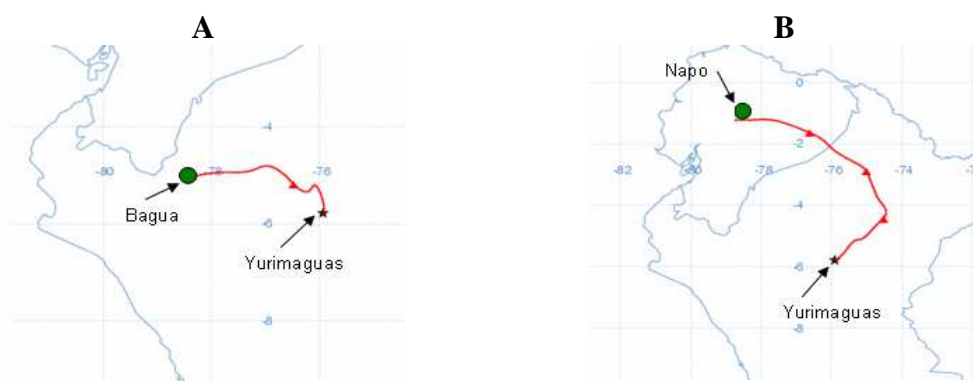


Figura 18. Trajetórias reversas, a partir de Yurimaguas, simuladas pelo programa HYSplit com início em **A)** 27 de dezembro de 1989 (48 horas) e **B)** 5 de dezembro de 1989 (72 horas). A disseminação interna no Peru pode também ter sido feita pelo transporte aéreo de esporos, conforme apresentado pelas trajetórias reversas da Figura 18. A introdução em Yurimaguas, que foi constatada em 1991, pode ter sido devida a esporos transportados pelo ar com origem em Baguá, em 27 de dezembro de 1989 ou mesmo com origem no Equador, do modo similar as introduções iniciais.

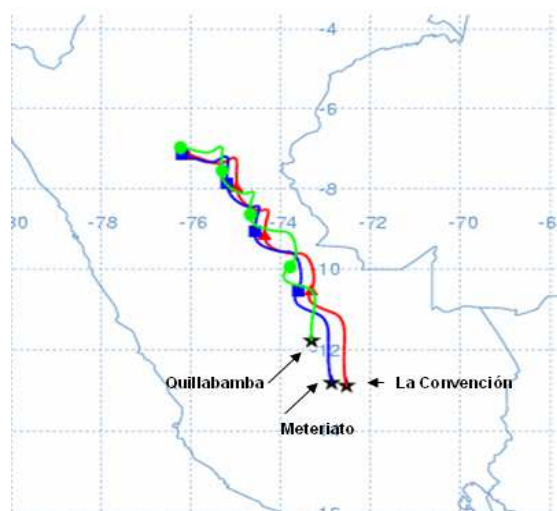


Figura 19. Trajetórias reversas, a partir de Quillabamba, Meteriato e La Convención, simuladas pelo programa HYSplit com início em 05 de janeiro de 1988 (96 horas)

Também as últimas introduções que ocorreram em 1998, em Quillabamba, Meteriato e La Convención podem ter tido origem em esporos aéreos provenientes de outras regiões do Peru infectadas, uma vez que as condições de vento parecem ser extremamente favorável a disseminação em direção ao sudeste, conforme apresentado na Figura 19.

A análise das trajetórias reversas mostradas na Figura 20 indica que para haver infecção dos cacauais de Rondônia por esporos de *Monilia* transportados pela atmosfera a fonte deste inóculo deveria estar a Norte e Noroeste do estado de Rondônia, o que não ocorre na atualidade.

Deve ser notado, no entanto, que todas as simulações realizadas com o modelo HYSplit utilizaram dados reais de períodos de tempo definidos. Utilizando-se dados de outros meses/anos, poderiam ser obtidos resultados diferentes em algumas épocas com anomalias específicas na direção dos ventos.

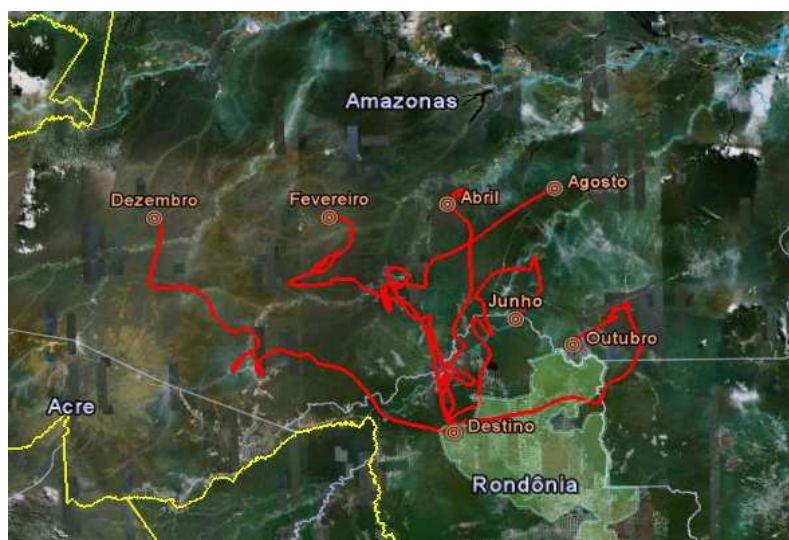


Figura 20. Simulação de trajetória reversa realizada pelo modelo HYSplit. A partir da especificação do ponto de destino, assinalado na figura, o modelo realizou simulações das trajetórias até possíveis pontos de origem correspondentes aos meses de fevereiro, abril, junho, agosto, outubro e dezembro de 2007. A área verde claro assinalada em Rondônia demarca uma região onde existe cacau naquele estado.

6.3.2. Deposição de esporos

Os resultados das simulações são apresentados nas Figuras 21 e 22

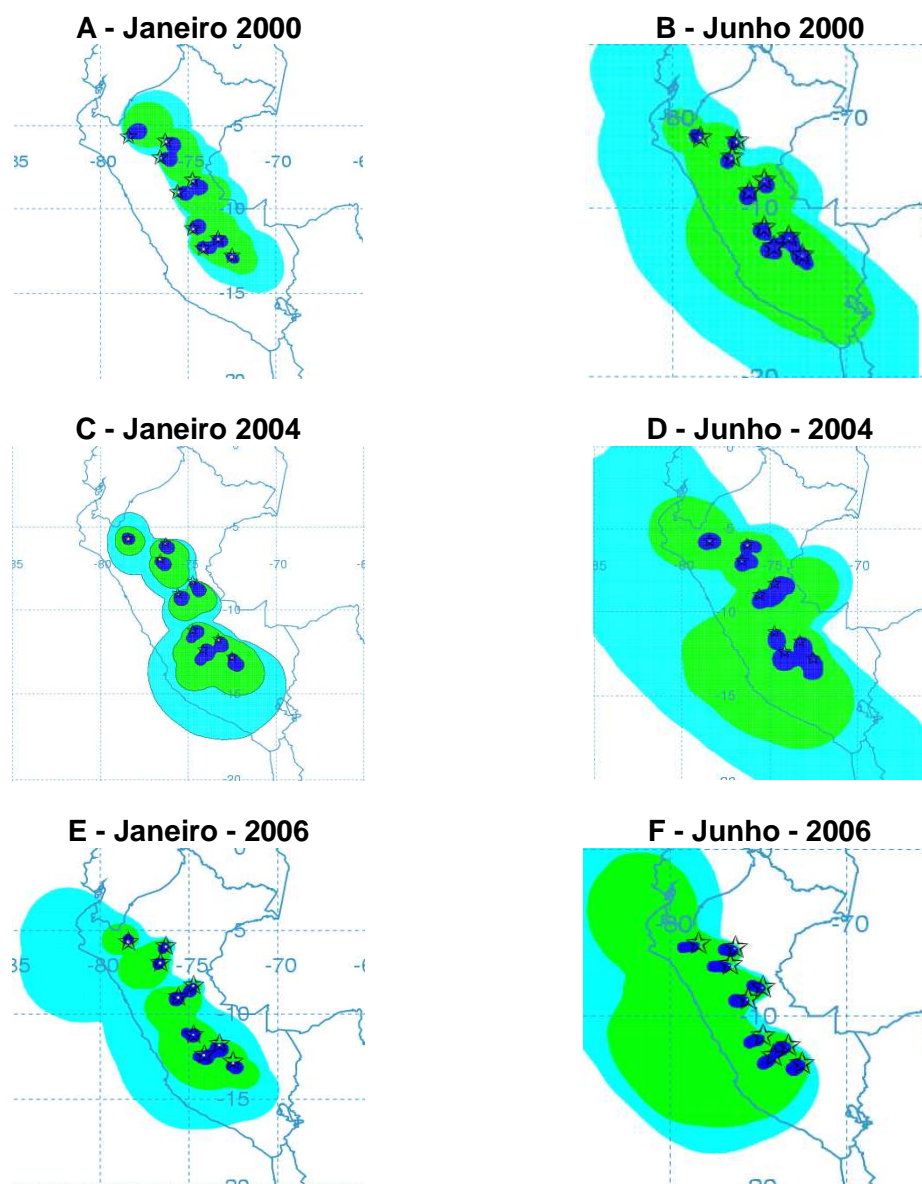


Figura 21: Resultados das simulações com o modelo HYSplit referentes a deposição de esporos após simulação por três dias. A nuvem de esporos foi originária de um hectare de cacau produzindo 35E9 esporos por hora, durante 24 horas, em cada um dos nove locais considerados (Tabela 15). A Figura apresenta resultados dos meses de janeiro e julho de 2000 (A-B), 2004 (C-D) e 2006 (E-F). Amarelo: mais de 1000 esporos/m²; azul escuro: de 10 a 1000 esporos/m²; verde: de 0.1 a 10 esporos/m² e azul claro: de 0.001 a 0.1 esporos/m².

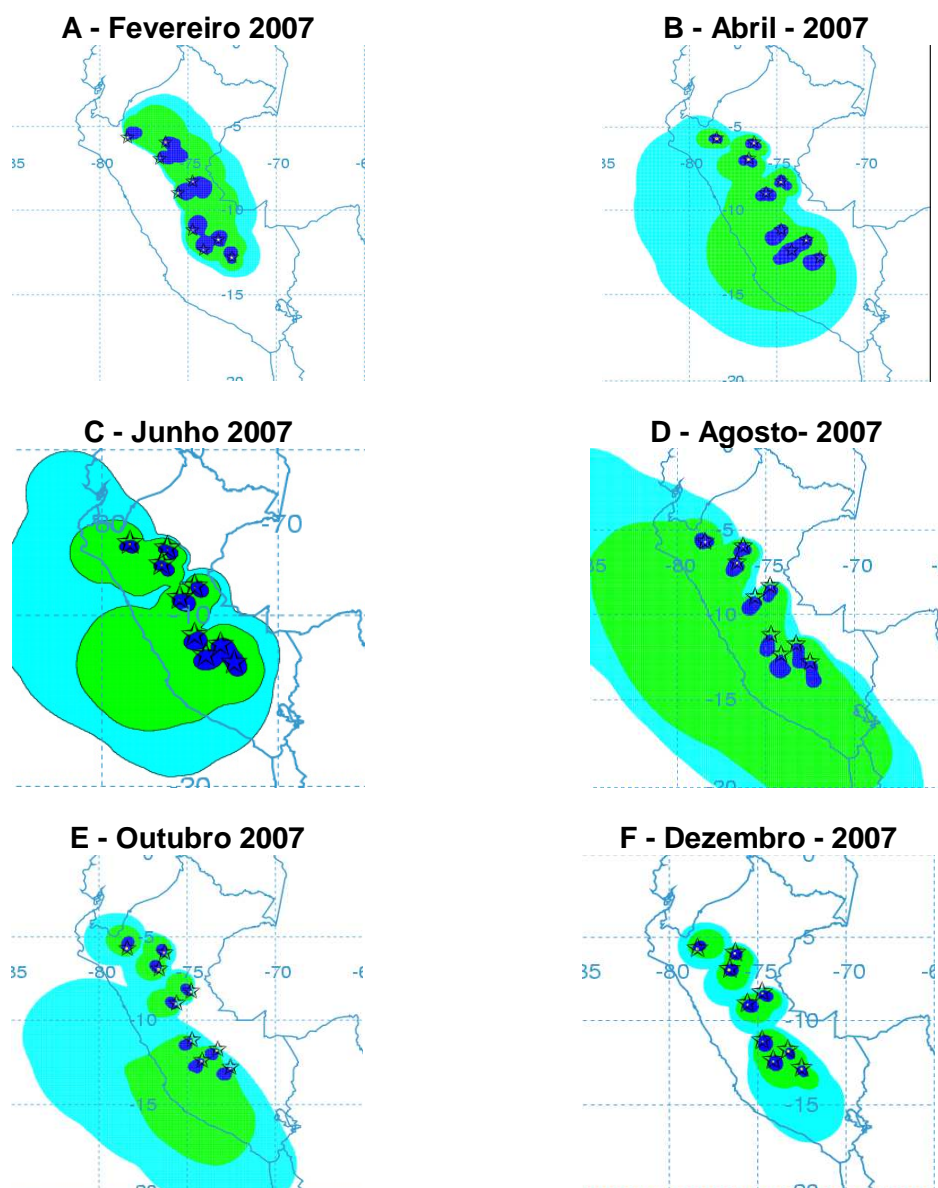


Figura 22: Resultados das simulações com o modelo HYSplit referentes a deposição de esporos após simulação por três dias. A nuvem de esporos foi originária de um hectare de cacau produzindo $35E9$ esporos por hora, durante 24 horas, em cada um dos nove locais considerados (Tabela 15). A Figura apresenta resultados dos meses fevereiro(A), abril(B), junho(C), agosto(D), outubro(E) e dezembro(F) de 2007. Amarelo: mais de 1000 esporos/ m^2 ; azul escuro: de 10 a 1000 esporos/ m^2 ; verde: de 0.1 a 10 esporos/ m^2 e azul claro: de 0.001 a 0.1 esporos/ m^2 .

Observando-se os gráficos das Figura 21 e 22, verifica-se que a intensidade da dispersão, nos anos considerados, foi maior no inverno diminuindo no verão, confirmando a tendência das trajetórias calculadas anteriormente (Figura 14). No entanto a probabilidade dos esporos que se dispersam causarem novas infecções deve ser mais reduzida no inverno, devido a menor precipitação pluviométrica (Figura 15). Avalia-se assim que a probabilidade de introdução da Monilia no Brasil por disseminação aérea deve ser maior nos meses do outono quando os ventos e a chuva ainda não diminuíram excessivamente e na primavera, com o reinício das chuvas e aumento da velocidade dos ventos.

Observa-se também que, mesmo nos meses de inverno na maioria das simulações realizadas a direção dos ventos não foi favorável a disseminação dos esporos para o território Brasileiro, embora quando se utilizou as médias mensais de direção e velocidade do vento notou-se a favorabilidade dos mesmos em algumas circunstâncias (Figura 14). A maior concentração de esporos depositados no Acre, notadamente em junho de 2006, foi de até 10 esporos por m^2 .

Considerando também que a baixa densidade populacional dos hospedeiros da Monilia na mata Amazônica se conclui a introdução da doença em território brasileiro, por disseminação aérea a longa distância, embora sendo possível apresenta baixa probabilidade de ocorrer.

6.4 Agradecimentos

Agradecemos a NOAA-Air Resources Laboratory (ARL) pela permissão para utilizar o modelo HYSplit para transporte e dispersão.

7. Dispersão por via fluvial

7.1. Introdução

A análise da disseminação da Monilia na América Central sugere a possibilidade da dispersão da doença por via fluvial. Em março de 1997 uma expedição encontrou o fungo ao Norte da Nicarágua, nas margens dos rios Bocay e Wina, tributários do rio Coco (Porras, 1997). Em abril de 1997 a *M. rozeri* foi identificada ao longo das margens do rio Coco, que serve de fronteira entre a Nicarágua e Honduras. Uma expedição realizada na área, entre as comunidades de Raiti e Waspam (Figura 23) em 1997 encontrou a Monilia presente em todas as plantações de cacao que foram inspecionadas. Segundo os cacauicultores da região o fungo se disseminou no ano anterior, através das inundações dos rios devido a passagem do furacão César, em setembro de 1996 (Phillips-Mora, 2006; Ortiz et alii 2006) . A distância aproximada percorrida no canal dos rios foi de cerca de 330 km.



Figura 23. Disseminação da Monilia na Nicarágua através dos rios Bocay, Wina e Coco.

Para avaliar a possibilidade de introdução da Monilia no Brasil através de frutos contaminado carregados naturalmente pelos rios deve ser considerado que existe um divisor de bacias hidrográficas que acompanha a fronteira Acre/Peru no norte (Serra do Divisor-Moa) e que prossegue pelo interior do Peru em direção ao

Modelos Matemáticos para Simular a Introdução e Dispersão da Monilíase do Cacao no Brasil

sul (linha vermelha na Figura 24). Os rios da região, a esquerda da linha divisória, correm do leste para oeste, em direção aos rios Ucayali e Urubamba, e a direita de oeste para leste, em direção ao rio Amazonas. A Figura 24 mostra regiões de ocorrência de Monilia no Peru (verde claro), indicando, com as setas roxas, a direção do fluxo dos rios.

Assim, as possibilidades de ingresso da Monilia no Brasil, por via fluvial parecem estar restritas ao sul e ao norte das regiões de ocorrência da *M. roseri* no Peru, conforme indicado pelas vias 1 e 2, respectivamente, na Figura 24.

Para considerar o transporte pela Via 1 deve ser suposto que a *M. roseri* esteja presente também em locais a direita do divisor possibilitando que frutos infectados sejam levados por rios, atravessando a Bolívia para o estado de Rondônia, que possui cerca de 40.000 ha de cacau em 17 municípios.

Também será avaliada a possibilidade de introdução ao norte do Peru, pelos rios Huallaga, Marañón e Amazonas, conforme assinalado como Via 2 na Figura 24. Neste caso a Monilia poderia ser introduzida na população natural de cacau as margens dos rios da região.

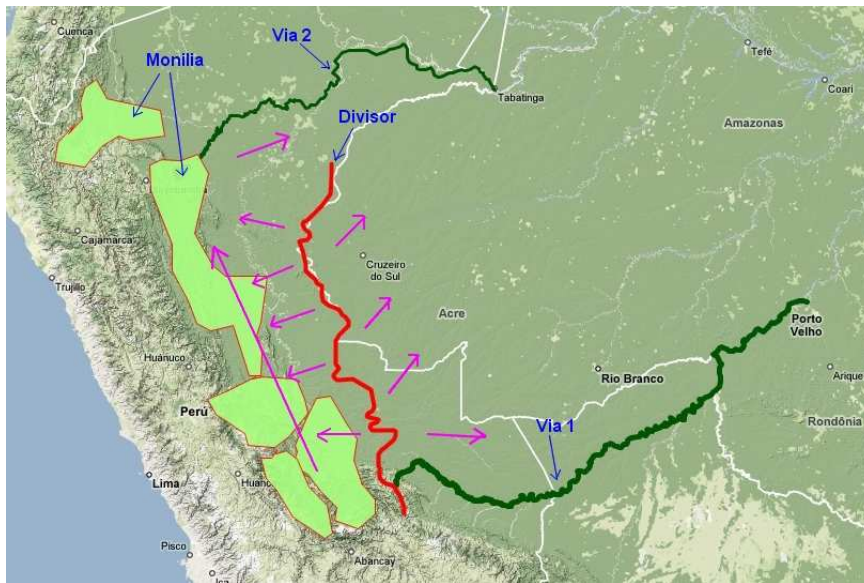


Figura 24. Direção predominante do fluxo dos rios (setas roxas) no Acre e Peru. A linha vermelha indica a separação das bacias hidrográficas, com a serra do Divisor ao Norte.

O processo de disseminação da doença por via fluvial pode ser representado pelo esquema apresentado na Figura 25. A estimativa da probabilidade de estabelecimento da doença no Brasil, considerando sua disseminação por via fluvial, inicia com o estabelecimento de um determinado número de plantas infectadas nas margens de um rio (NPM) produzindo frutos que são infectados e se mumificam (FMP). Estes frutos mumificados apresentam a probabilidade P1 de serem levados pelo rio, a probabilidade P2 de atingirem território Brasileiro, a probabilidade P3 de chegarem a áreas com cacau, a probabilidade P4 de esporularem e a probabilidade P5 de infectarem novos frutos.



Figura 25. Representação do processo de disseminação da *M. roseri* por via fluvial. NPM - Numero de plantas infectadas nas margens do rio; FMP - número de frutos mumificados produzidos por cada planta infectada; P1 - probabilidade de um fruto mumificado ser levado ao rio; P2 - probabilidade de um fruto mumificado atingir território brasileiro em local previamente definido; P3 - probabilidade deste frutos ser

levado a áreas com cacau; P4 - probabilidade deste fruto voltar a esporular e P5 probabilidade desta esporulação causar novas infecções.

A metodologia neste item constou da estimação da velocidade da corrente em rios da região que pudessem transportar frutos de cacau infectados do Peru para o Brasil e do tempo necessário deste percurso.

Com relação ao processo de disseminação fluvial apresentado na Figura 25, considerando a dificuldade de obtenção de dados, limitou-se a uma estimativa simplificada (ordem de grandeza) da probabilidade P2 de que frutos levados a um rio no Peru cheguem ao Brasil.

7.2 Metodologia

7.2.1. Velocidade e duração do transporte

A velocidade da corrente dos rios pode ser estimada em função do raio hidráulico e da declividade do leito (Schulze, 2005), conforme equação 17.

$$v = \frac{\sqrt[3]{R^2} \times \sqrt[2]{S}}{n} \quad \dots 17$$

onde v é a velocidade de corrente (m/s), R é o raio hidráulico (m) e S é a declividade (-) e n (-) é o coeficiente de rugosidade do leito do rio.

No entanto v é a velocidade da corrente no centro do canal e deve ser dividido pelo coeficiente de velocidade superficial (função da profundidade do rio - (USBR, 1997) para obter-se a velocidade na superfície de um rio como representado pela equação 18.

$$v_s = \frac{v}{CVS} \quad \dots 18$$

onde v_s (m/s) é a velocidade superficial e CVS (-) é o coeficiente de velocidade superficial.

O raio hidráulico da seção é uma variável dinâmica porque pode mudar com o estado do rio. Ele depende da forma do perfil do leito e do nível de água que o rio tem naquele instante. Supondo que o rio tem o leito de forma retangular o raio hidráulico pode ser calculado em função da profundidade P (m) e da largura L (m) do rio, como mostrado na equação 19.

$$R = \frac{P + L}{L + 2P} \quad \dots 19$$

No entanto dados sobre largura e profundidade dos rios não são facilmente obtidos. Por este motivo Leopold e Maddock (1953) introduziram equações (equações 20 e 21) para estimar a largura e profundidade a partir da vazão dos rios:

$$L = a \times Q^b \quad \dots 20$$

$$P = c \times Q^d \quad \dots 21$$

onde Q é a vazão (m³/s) e a , b , c e d são parâmetros.

A declividade média (-) é estimada pela equação 22:

$$S = \frac{A_2 - A_1}{D_r} \quad \dots 22$$

onde A_1 (m) e A_2 (m) são as altitudes a jusante e montante, respectivamente e D_r (m) é a distância em linha reta do trecho considerado.

A duração do percurso pode então ser calculada dividindo-se a distância do canal D_c pela velocidade no trecho:

$$T = \frac{D_c}{v_s} \dots 23$$

onde T (s) é a duração do percurso, D_c (m) é a distância do canal e v_s (m) a velocidade superficial.

As equações acima permitem estimar o tempo necessário para que frutos de cacau sejam transportados por rio a uma determinada distância.

7.2.2. Probabilidade de 'sobrevivência' dos frutos

Considerando que os rios apresentam canais com maior ou menor grau de sinuosidade (meandros) e que quando maior for o número de meandros maior será também a probabilidade de que objetos flutuantes fiquem retidos¹⁸ nas margens, pode-se estabelecer como hipóteses:

- Os frutos permanecem flutuando durante todo o percurso;
- Somente uma proporção dos frutos passará por cada curva dos meandros existentes;
- Todos os meandros são iguais, o que faz com que a proporção de sobrevivência por meando seja constante;
- A retenção de um fruto nas margens é o único processo que interrompe o seu transporte pelo rio.

Estas hipóteses são representadas pela equação 24:

$$FS_{(c)} = FS_{(0)} \times S^c \dots 24$$

onde $FS_{(c)}$ é o número de frutos que chega até curva c , $FS_{(0)}$ é o número de frutos que inicialmente está no rio, S é a proporção de frutos que sobrevive por curva e c é o número de curvas.

O número de curvas que existe em um determinado trecho pode ser estimado dividindo-se a distância do trecho considerado pelo comprimento de onda dos meandros (λ) estimado conforme Leopold (1960) a partir da largura do canal, através da equação 25:

$$\lambda = 10 \times L^{1.01} \dots 25$$

onde λ (m) é o comprimento de onda ou a distância média entre duas curvas consecutivas.

Para os percursos considerado na Figura 24 optou-se, no entanto, por contar o número de curva dos canais através do programa Google Earth.

7.3. Parâmetros e constantes

O coeficiente de rugosidade n (Equação 1) foi estimado em 0.035, conforme Gierke, 2002.

Os coeficientes a , b , c e d das equações 20 e 21, que estimam as larguras e profundidades dos canais dos rios, foram estimados por Allen et al. (1994) que realizaram análise de regressão com conjuntos de dados de 674 rios dos Estados Unidos e Canadá obtendo os seguintes valores:

$$\begin{aligned} a &= 2.710 \\ b &= 0.557 \\ c &= 0.349 \\ d &= 0.341 \end{aligned}$$

¹⁸ Se utilizará nesta seção o termo *sobrevivência* de frutos para indicar a proporção de frutos que ultrapassa um ou vários meandros do rio. Os frutos que não sobrevivem são aqueles que ficam retidos nas margens do rio.

Para a via de ingresso chamada de Via 1 (Figura 24 e 26A) escolheu-se uma trajetória composta de vários rios, tendo como origem regiões do Peru onde pode existir monilia e como destino a cidade de Porto Velho em Rondônia, conforme reapresentado pela linha vermelha na Figura 26A. Esta trajetória inclui o Rio Cumerjali da nascente (0) até a foz no rio Manu (1), daí até o Rio Madre de Diós (2), seguindo até desembocar no rio Bení (Madeira) (3) e então até Porto Velho (4), perfazendo um percurso total (do canal) de 1.755,3 km.

Para a via de ingresso Via 2 (Figura 24 e 26B) escolheu-se uma trajetória que tem início no rio Huallaga, onde esta presente a Monilia, prossegue até o encontro deste rio com o Marañón, seguindo pelo Solimões até a desembocadura do rio Ucayali e então pelo Amazonas, após o deságüe do rio Napo, até o território brasileiro, perfazendo um percurso total (do canal) de 1.279,6 km.

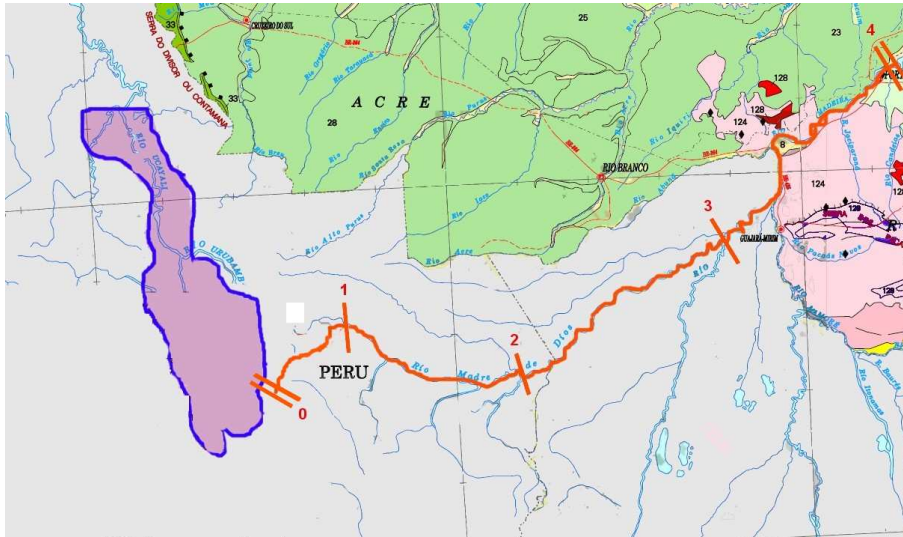


Figura 26A. Trajetória fluvial escolhida (Via 1) do Peru para o Brasil. A área circundada com azul representa áreas com cacau no Peru. Os locais numerados de 0 a 4 referem-se a: 0 - nascente do rio Cumerjali; 1 - encontro do rio Cumerjali com rio Manu; 2 - encontro do rio Manu com o rio Madre de Diós; 3 - encontro do rio Madre de Diós com o rio Beni (Madeira em território brasileiro) e 4 - Porto Velho, Rondônia

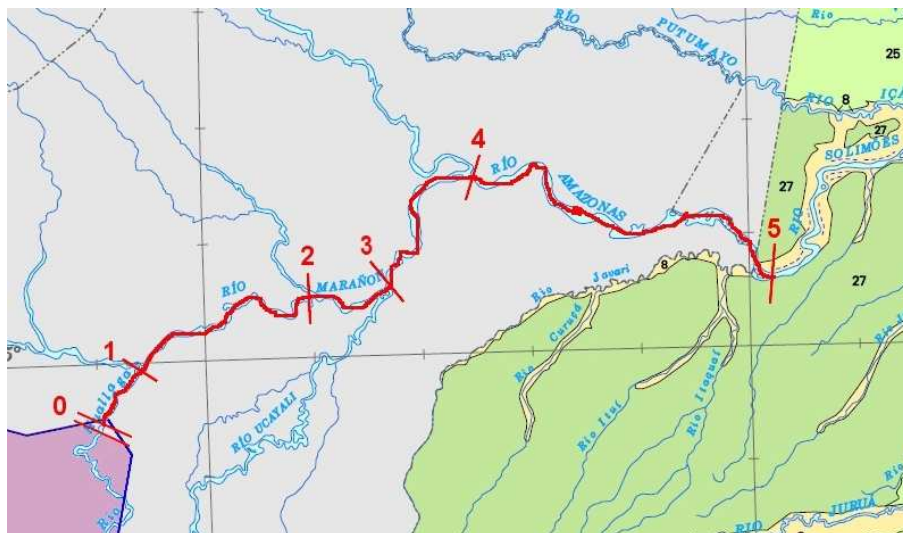


Figura 26B. Trajetória fluvial escolhida (Via 2) do Peru para o Brasil. A área circundada com azul representa áreas com cacau no Peru. Os locais numerados de 0 a 5 referem-se a: 0 - início do percurso no rio Huallaga; 1 - encontro do rio Huallaga com rio Marañón; 2 - encontro do rio Tigre com o rio Marañón; 3 - encontro do rio Ucayali com o rio Marañón; 4 - encontro do rio Napo com o rio Amazonas e 5 ponto de destino do rio Amazonas em território brasileiro.

Os valores dos parâmetros utilizados são apresentados nas tabelas 16A e 16B, juntamente com sua origem.

Tabela 16A. Valores dos parâmetros e constantes utilizados para cálculo da velocidade e tempo de transporte de frutos de cacau pela trajetória Via 1 apresentada na Figura 26A.

N.	Local	Parâmetro	Valor	Un.	Origem
0	Nascente do rio Cumerjali	Altitude	1.300	m	Medido no Google Earth
		Distância do canal	-	-	
		Distância em linha reta	-	-	
		Vazão	-	-	
		Coef. Vel. Superficial	-	-	
1	Cumerjali/Manu	Altitude	351	m	Medido no Google Earth
		Distância do canal	113,8	km	Medido no Google Earth
		Distância em linha reta	69,7	km	Medido no Google Earth
		Vazão	50	m ³ /s	Suposto
		Coef. Vel. Superficial	0.73	-	USBR, 1997
2	Manu/Madre de Diós	Altitude	233	m	Medido no Google Earth
		Distância do canal	415,2	km	Medido no Google Earth
		Distância em linha reta	218,7	km	Medido no Google Earth
		Vazão	500	m ³ /s	Suposto
		Coef. Vel. Superficial	0.77	-	USBR, 1997
3	Madre de Diós/Bení(Madeira)	Altitude	139,0	m	Medido no Google Earth
		Distância do canal	673,3	km	Medido no Google Earth
		Distância em linha reta	440,3	km	Medido no Google Earth
		Vazão	5.000 ^a	m ³ /s	Roebuck, 2004
		Coef. Vel. Superficial	0.80	-	USBR, 1997
4	Madeira (Porto Velho)	Altitude	84	m	Medido no Google Earth
		Distância do canal	553,0	km	Medido no Google Earth
		Distância em linha reta	384,6	km	Medido no Google Earth
		Vazão	50.000 ^a	m ³ /s	Zimmermann, 2007
		Coef. Vel. Superficial	0.80	-	USBR, 1997

^a Vazão média da época das cheias

Tabela 16B. Valores dos parâmetros e constantes utilizados para cálculo da velocidade e tempo de transporte de frutos de cacau pela trajetória Via 2 apresentada na Figura 26B.

N.	Local	Parâmetro	Valor	Un.	Origem
0	Início no rio Huallaga	Altitude	163	m	Medido no Google Earth
		Distância do canal	-	-	
		Distância em linha reta	-	-	
		Vazão	-	-	
		Coef. Vel. Superficial	-	-	
1	Huallaga/Maranón	Altitude	130	m	Medido no Google Earth
		Distância do canal	153,0	km	Medido no Google Earth
		Distância em linha reta	81,47	km	Medido no Google Earth
		Vazão	3.880	m ³ /s	SENAMHI/IRD, 2005 ^a
		Coef. Vel. Superficial	0,79	-	USBR, 1997
2	Tigre/Maranón	Altitude	100	m	Medido no Google Earth
		Distância do canal	260,2	km	Medido no Google Earth
		Distância em linha reta	179,06	km	Medido no Google Earth
		Vazão	11.100	m ³ /s	SENAMHI/IRD, 2005 ^b
		Coef. Vel. Superficial	0,80	-	USBR, 1997
3	Ucayali/Maranón	Altitude	93	m	Medido no Google Earth
		Distância do canal	96,0	km	Medido no Google Earth
		Distância em linha reta	68,66	km	Medido no Google Earth
		Vazão	15.600	m ³ /s	SENAMHI/IRD, 2005 ^b
		Coef. Vel. Superficial	0,80	-	USBR, 1997
4	Napo/Amazonas	Altitude	91	m	Medido no Google Earth
		Distância do canal	196,8	km	Medido no Google Earth
		Distância em linha reta	133,49	km	Medido no Google Earth
		Vazão	24.680	m ³ /s	SENAMHI/IRD, 2005 ^b
		Coef. Vel. Superficial	0,80	-	USBR, 1997
5	rio Amazonas	Altitude	71	m	Medido no Google Earth
		Distância do canal	412,56	km	Medido no Google Earth
		Distância em linha reta	322,45	km	Medido no Google Earth
		Vazão	40.000	m ³ /s	SENAMHI/IRD, 2005 ^c
		Coef. Vel. Superficial	0,80	-	USBR, 1997

^a Agosto/Setembro 2003; ^b Setembro 2004; ^c Janeiro 2004

O número de curvas existentes em cada trecho foi contado visualmente com auxílio do programa Google Earth, conforme apresentado na Tabelas 17.

Tabela 17. Número de curvas em cada trecho das via 1 e 2, obtido através de contagem visual com o programa Google Earth.

Via 1		Via 2	
Trecho	Número de meandros (curvas)	Trecho	Número de meandros (curvas)
0-1	160	0-1	33
1-2	166	1-2	31
2-3	102	2-3	8
3-4	54	3-4	11
-	-	4-5	17
Total	482		100

7.4 Resultados e discussão

7.4.1 Velocidade e duração do transporte

Os resultados obtidos com relação ao percurso de frutos nas vias 1 e 2, mostradas, na Figura 24 são apresentados na Tabela 18A e 18B.

Tabela 18A. Distância do leito (D.Leito), declividade, profundidade e largura médias do leito, raio hidráulico médio (R.Hdr.), velocidade na superfície (Vel) e tempo nos respectivos trechos correspondentes a Via 1.

Trecho	D.Leito (km)	Decliv. cm/km	Prof. (m)	Larg. (m)	R.Hidr. (m)	Vel (km/h)	Tempo (dias)
0-1	113,8	1195,2	1,3	24,0	1,2	18,5	0,2
1-2	415,2	51,3	2,9	86,3	2,7	6,0	2,8
2-3	673,3	20,2	6,4	312,9	6,1	6,3	4,5
3-4	553,0	12,9	13,8	1097,6	13,4	8,7	2,6
Total/Media	1.755,3	1.279,6	6,1	380,2	5,85	9,9	10,1

Tabela 18B. Distância do leito (D.Leito), declividade, profundidade e largura médias do leito, raio hidráulico médio (R.Hdr.), velocidade na superfície (Vel) e tempo nos respectivos trechos correspondentes a Via 2.

Trecho	D.Leito (km)	Decliv. cm/km	Prof. (m)	Larg. (m)	R.Hidr. (m)	Vel (km/h)	Tempo (dias)
0-1	153,0	0,41	5,8	270,4	5,6	0,83	7,7
1-2	260,2	0,17	8,3	483,1	8,1	0,67	16,2
2-3	96,0	0,10	9,4	586,9	9,1	0,57	7,1
3-4	196,8	0,01	11,0	757,7	10,7	0,24	34,0
4-5	412,6	0,06	12,9	991,6	12,6	0,55	31,3
Total/Media	1.118,6	0,74	9,5	617,9	9,2	0,57	96,3

As características dos rios das Vias 1 e 2 são diferentes. Os rios da Via 1 apresentam declividade bastante mais elevada o que reflete em uma velocidade quase 20 vezes superior a dos rios da Via 2, que apresentam maiores profundidades e larguras e não são tão sinuosos.

Frutos infectados poderiam ser transportados pelos rios da Via1, do Peru para regiões cacauceiras da Rondônia no Brasil, percorrendo mais de 1,700 km de distância em cerca de 10 dias, enquanto que na via 2, para um percurso de mais de 1,100 km seriam necessários mais de três meses.

7.4.2. Probabilidade de 'sobrevivência' dos frutos

Não encontrou-se na literatura científica trabalhos objetivos referentes a disseminação de doenças de plantas por via fluvial. A análise realizada, que considera somente a sinuosidade do rio como fator de sobrevivência, é bastante simplificada e não considera outros fatores que podem ter bastante importância, como por exemplo, a velocidade da corrente.

A probabilidade de que um fruto passe por todas as curvas de cada percurso mostrado na Figura 24 é função da probabilidade de que um fruto passe por uma única curva, conforme equação 24.

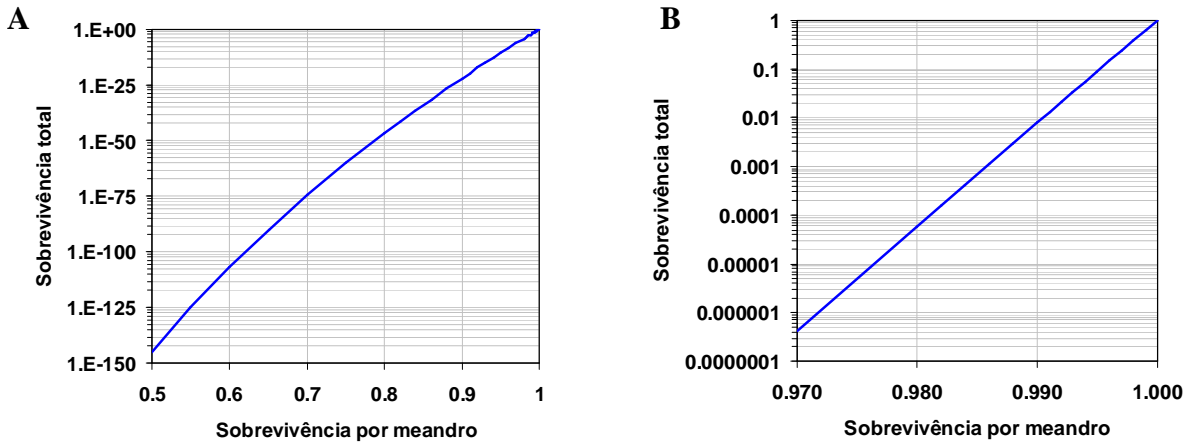


Figura 27A. Sobrevivência dos frutos nas 482 curvas do percurso Via 1 como função da sobrevivência por meandro. A - sobrevivência unitária de 0.5 a 1 e B - sobrevivência unitária de 0.97 a 1

A Figura 27A mostra que a sobrevivência total em um percurso tão longo é extremamente baixa o que requereria um número muito elevado de frutos no início do percurso para algum dos frutos chegasse ao destino. Estima-se que se a sobrevivência em uma curva for inferior a 0.98 seria inviável a introdução da Monília pela via indicada na Figura 26A.

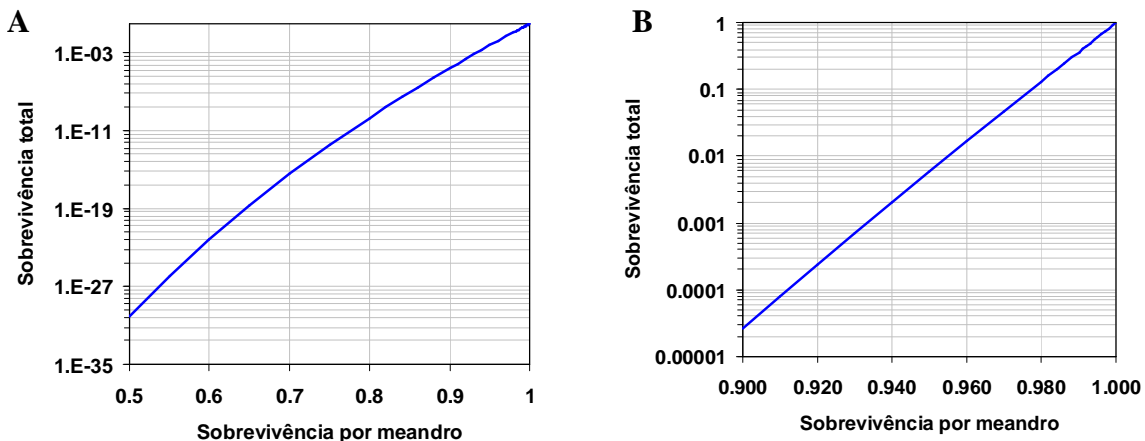


Figura 27B. Sobrevivência dos frutos nas 100 curvas do percurso Via 2 como função da sobrevivência por meandro. A - sobrevivência unitária de 0.5 a 1 e B - sobrevivência unitária de 0.90 a 1

No entanto, considerando que o número de meandros é normalmente menor em rios maiores poderia haver dispersão da doença por este meio em percursos menores, ou em rios maiores, conforme mostra os gráficos da Figura 27B referente ao percurso da via 2 (Figura 26B).

Para um rio com características do rio Madeira num percurso de 300 km se a sobrevivência por meandro fosse de 0.85 então seriam necessários cerca de 120 frutos infectados no início do percurso para que um fruto chegasse ao final.

A Figura 28 mostra a redução no número de frutos com a distância, a partir de 1.000 frutos iniciais, em rios com características dos da via 1 e da via 2.

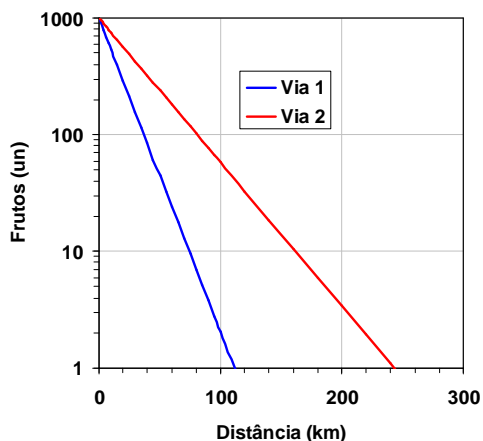


Figura 28. Número de frutos que restam, por km, a partir de 1.000 frutos iniciais, em rios com características da via 1 (3,6 km/meandro) e da via 2 (7,8 km/meandro).

Observa-se que a distância necessária para reduzir uma população inicial de 1.000 frutos a um fruto é quase o dobro em rios da via 2 do que da via 1. Isto é devido ao menor número de meandros por quilometro em rios maiores como os da via2.

Conclui-se que enquanto a Monilia estiver distribuída no Peru somente a esquerda do divisor de bacias apresentado na Figura 24 será improvável que se dissemine para as regiões cacauceiras de Rondônia por via fluvial. No entanto não é tão improvável a disseminação da doença por via fluvial ao norte do Peru, pelas bacias do rios Huallaga, Marañón e Amazonas.

8. Modelo determinístico

O modelo determinístico utiliza conceitos da dinâmica de sistemas e foi desenvolvido para simular a evolução da doença nos frutos do cacau, em função de diferentes condições do ambientes e de manejo das plantas. Este modelo permite simular produtividade e perdas decorrentes da aplicação de diferentes técnicas de controle fitossanitário.

8.1. Descrição do sistema real

O fruto é a única parte do cacauzeiro afetado pela Monilia, podendo ser infectado em qualquer idade do desenvolvimento.

Os frutos jovens, com até noventa dias de idade são mais suscetíveis porem a susceptibilidade decresce com a idade do fruto (Ram et all, 2004) e pode ser descrita matematicamente (Leach et alli, 2002).

O período de incubação da doença é de 40 dias em frutos com 20-60 dias de idade e de 60 dias para frutos com 90 dias de idade (Fulton, 1989). Os frutos mais velhos são mais resistentes e o progresso da doença é mais vagaroso neles. Em frutos menores que 5 cm de comprimento o fungo provoca o peco fisiológico. Em frutos maiores aparecem diferentes tipos de sintomas (Ram et all, 2004) .

Quando aparecem os sintomas externos as sementes ficam parcial ou totalmente comprometidas. O sintoma externo consta de uma lesão necrosada apresentando bordadura irregular (Ram et alli, 2004) .

Em 5-7 dias aparece uma massa micelial branca. Após mais 3 a 5 dias o micélio transforma-se em um pó de coloração cremosa ou cinzenta contendo os esporos do fungo. Os frutos doentes, cortados, esporulam rapidamente em cerca de 3 a 4 dias (Ram et all, 2004). É estimada uma produção de 44 milhões de conídias por cm² de lesão em nove meses (Evans, 1977). Os frutos doentes que ficam nas árvores se mumificam e endurecem com o tempo devido a desidratação proveniente da grande quantidade de esporos produzidos. Os frutos mumificados tem seu tamanho reduzido e podem ficar nas copas das árvores por um período de dois anos. Quando umedecem pela chuva esporulam novamente (Ram et all, 2004). Frutos verdes infectados que foram colhidos e deixados no chão esporulam ainda por um a dois meses (Evans, 1981) A monilia não sobrevive no solo ,as sim nos fruto doentes, até sua total decomposição (Ram et all, 2004).

Os esporos são facilmente desprendidos dos frutos e disseminados principalmente pela ação do vento, da chuva de insetos e animais silvestres, cursos de água e pessoas (Ram et all, 2004).

8.2. Desenvolvimento do modelo

O modelo é parcialmente representado no diagrama da Figura 29, utilizando-se a simbologia proposta por Forrester (1961), onde os compartimentos (retângulos) representam quantidades que variam em função dos seus fluxos (setas duplas e válvulas) de entrada e saída. As linhas pontilhadas representam as informações necessárias para calculo das diversas variáveis e os textos sublinhados são as constantes.

Matematicamente o modelo é representado por um sistema de equações diferenciais, integradas numericamente (compartimentos) e por um conjunto de equações algébricas para calculo dos coeficientes das equações diferencias (fluxos), sendo utilizado para seu desenvolvimento e utilização o sistema VENSIM DSS® (Ventana, 2003).

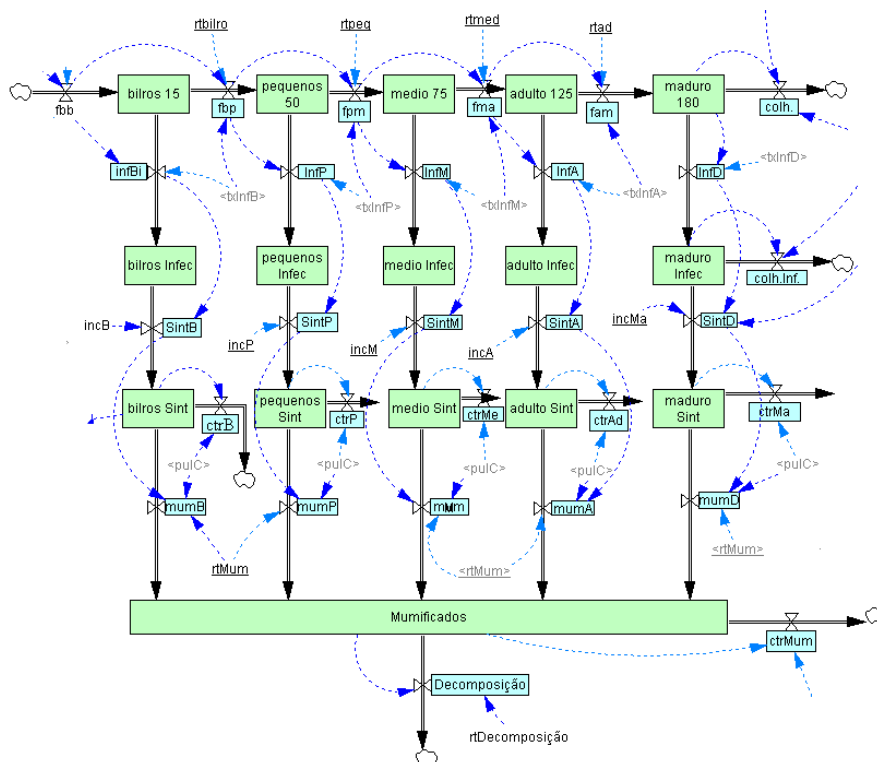


Figura 29. Representação gráfica do modelo com o diagrama de Forrester (Forrester, 1961)

Cada compartimento pode ser representado por uma equação a diferenças finitas conforme modelo geral representado pela equação 26:

$$Frutos_{t+\Delta t} = Frutos_t + \Delta t \times (Fe - Fs) \dots 26$$

Esta equação mostra que a quantidade de frutos em um compartimento em um instante futuro ($t+\Delta t$) é calculada somando-se à quantidade de frutos atual o intervalo de integração Δt multiplicado pela diferença entre os fluxos de entrada Fe e saída Fs do compartimento (Frutos/dia).

Considerando que variabilidade genética das populações de cacau faz com que alguns frutos completem seu estágio fenológico de maturação antes do que outros estabeleceu-se, para simular este processo, que o fluxo de entrada em cada compartimento seja atrasado de uma determinada quantidade de tempo, correspondente a duração média do desenvolvimento, para gerar então o respectivo fluxo de saída. Matematicamente este processo é simulado por um sistema de equações diferenciais em cascata chamado de *delay*, onde o número de equações utilizadas representa grau do *delay*. A simulação da variabilidade de população é obtida variando-se o grau do *delay*, considerando que quanto maior for o grau menor será a variabilidade.

O primeiro conjunto horizontal de compartimentos (Figura 29) representa frutos sadios de cacau nos diversos estágios de desenvolvimento. Na notação do sistema VENSIM as equações que representam as transferências entre estes compartimentos tem a forma geral da equação 27:

$$Fs = DELAYN(Fe \times (1 - txInf), Rt, 0, N) \dots 27$$

onde Fs (Frutos/dia) é o fluxo de saída do compartimento (que corresponde ao fluxo de entrada no compartimento seguinte), $DELAYN$ é a função do VENSIM para implementar o processo de delay, Fe (Frutos/dia) é o fluxo de entrada, $txInf$ (fração) é a taxa de infecção, Rt (dias) é a duração média do estágio fenológico e N é o grau do delay. O valor zero que aparece como terceiro argumento da função representa o valor de Fs no início da simulação. O fluxo de entrada Fe é multiplicado por $1-txInf$ porque somente os frutos que não foram infectados continuarão seu desenvolvimento, passando ao compartimento seguinte.

O fluxo de entrada no primeiro compartimento (fb na Fig. 29) é gerado a partir de dados reais de floração e/ou frutificação no campo, fornecido ao modelo por meio de tabela (variáveis lookup) que contem a distribuição de flores polinizadas ou bilros no tempo. Utiliza-se a função descrita na equação 28 (Sgrillo, 2004¹⁹) para representar as perdas que ocorrem na polinização das flores e nos bilros, por pecos fisiológicos:

$$sbr = 0.011 \times \exp^{(-0.0034 \times NBilros)} \dots 28$$

onde sbr (fração) é a proporção de flores polinizadas que produz bilros viáveis e $NBilros$ (frutos) é o número acumulado de bilros produzidos.

O fluxo de saída do último compartimento ($colh$ (frutos/dia) na Figura 29) representa o processo de colheita e é simulado com a utilização de três funções tipo PULSE do vensim. A primeira e a segunda assinalam as épocas de colheita da safra temporã e principal, tendo valor 1 no período de colheita de cada safra e zero quando não esta havendo colheita. A terceira função, representada na equação 29, simula o processo de colheita, retirando frutos maduros de seu compartimento:

$$PulColheita = PULSETRAIN(iniT, dT, intervalo, fT) \times efic \times MAX(PulT, PulP) \times \frac{1}{dt} \dots 29$$

Neste caso a função $PULSETRAIN$ gera um trem de pulsos, com valor 1, iniciando no dia $iniT$ (dias), cada pulso tendo a duração dT (dias) (o intervalo de integração), sendo repetido a cada $intervalo$ (dias) (período entre os dias de colheita), e finalizando no dia fT (dia final da simulação). Na equação 3 $efic$ é a proporção de frutos maduros colhidos em cada colheita, e a função MAX retorna o maior valor entre $PulT$ (pulso da colheita temporã) e $PulP$ (pulso da colheita principal). Considerando que a duração do pulso é de um intervalo de integração (dt) toda a expressão deve dividida também pelo intervalo de integração dt , de modo que todos os frutos que devem ser colhidos sejam colhidos instantaneamente naquele instante. O fluxo de saída é então calculado multiplicando-se o número de frutos maduros por $PulColheita$.

O segundo conjunto horizontal de compartimentos (Figura 29) representa os frutos de cacau em cada estágio fenológico, que foram infectados pela Monilia, mas ainda não apresentam sintomas. Como uma vez

¹⁹Sgrillo, R.B. 2004. Modelo matemático para previsão de safra de cacau. Não publicado.

infectados os frutos paralisam seu crescimento não existe transferência horizontal entre os compartimentos deste conjunto. O fluxo de entrada nestes compartimentos é calculado pela multiplicação do fluxo de entrada no compartimento de frutos sadios pela taxa de infecção, conforme equação 30:

$$Inf = Fe \times txInf \dots 30$$

onde *Inf* (frutos/dia) é o fluxo de entrada no compartimento de frutos infectados, *Fe* (frutos/dia) é o fluxo de entrada no respectivo compartimento de frutos sadios e *txInf* (fração) é a respectiva taxa de infecção calculada como função do numero de esporos existentes.

Os frutos infectados passam para os compartimentos de frutos com sintomas (terceiro conjunto horizontal na Figura 29) após o respectivo período de incubação médio, considerando-se igualmente a variabilidade da população. Utilizando-se os mesmos conceitos aplicados na equação 1 se calculam os fluxos de saída de frutos infectados (que correspondem a entrada em frutos com sintomas), conforme equação 31:

$$Fsi = DELAYN(Inf, Incub, 0, N) \dots 31$$

onde *Fsi* (Frutos/dia) é o fluxo de saída de frutos infectados (entrada em frutos com sintomas), *Inf* (Frutos/dia) é o fluxo de entrada em frutos infectados (equação 5), *Incub* (dias) é o período de incubação e *N* é o grau do *delay*.

Os compartimentos de frutos com sintomas possuem duas saídas. Uma que corresponde a passagem de frutos com sintomas para frutos mumificados, que ocorre após um determinado período de tempo e outra representando o controle cultural, que consta da coleta e destruição do frutos infectados.

O fluxo de saída de cada compartimento de frutos infectados que corresponde ao controle cultural, tem a forma geral conforme equação 32.

$$ctrFSI = FSI \times Pctr \dots 32$$

onde *FSI* (Frutos) é o numero de frutos com sintoma em cada estagio de desenvolvimento, *ctrFSI* (frutos/dia) é o numero de frutos com sintomas que são retirados por ocasião da aplicação do controle cultural e *Pctr* (1/dia) é a proporção de frutos retirados por dia, calculado conforme equação 33, aplicada respectivamente para cada compartimento:

$$Pctr = PULSE TRAIN(iniCtr, dt, int Ctr, fimCtr) \times eficCtr \times \frac{1}{dt} \dots 33$$

O significado dos argumentos da função *PULSE TRAIN* é o mesmo descrito para a equação 3. Na equação 32 *iniCtr* é o dia em que inicia a aplicação do controle (coleta de frutos infectados), *dt* é o intervalo de tempo para integração, *intCtr* é o intervalo em dia entre as coletas, *fimCtr* é o dia em que as coletas deixam de ser aplicadas e *eficCtr* é a proporção de frutos infectados retirados em cada coleta.

A passagem de frutos com sintomas para frutos mumificados e modelada utilizando-se a função *Delay Conveyor* do Vensim. Esta função retorna o valor do fluxo de entrada *Fsi* atrasado pelo período *rtMum*, considera uma perda fracionaria, por unidade de tempo, *ctr*. A quantidade inicial (no tempo zero) retornada pela função é *inittot* com distribuição descrita na variável *flat* e atraso estabelecido por *ctime*, conforme equação 34.

$$Fss = DELAY CONVEYOR(Fsi, rtMum, ctr, distr, ini, rtInit) \dots 34$$

onde *Fss* (frutos/dia) é o fluxo de saída do compartimentos de frutos com sintomas (fluxo de entrada em frutos mumificados), *Fsi* (frutos/dia) e o fluxo de entrada neste compartimento (equação 6), *rtMum* (dias) é o período necessário para que os frutos com sintomas se mumifiquem, *ctr* (fração) é a proporção de frutos com sintomas retirados dessas plantas no controle cultural (equação 33) e *distr*, *ini*, e *rtInit* são variáveis para estabelecer o retorno da função no tempo zero da simulação, não utilizadas no presente caso.

O compartimento de frutos mumificados apresenta dois fluxos de saída, correspondentes a aplicação de controle (equação 31) e a decomposição de frutos, conforme equação 35:

$$FDec = \frac{Mumificados}{rtDecomposição} \dots 35$$

onde $FDec$ (frutos/dia) é o fluxo de saída de frutos mumificados, $Mumificados$ (frutos) é o número de frutos mumificados e $rtDecomposição$ (dias) é o período de tempo necessário para que os frutos mumificados se decomponham.

Para a produção de esporos desenvolveu-se um submodelo, composto por um compartimento, conforme representado na Figura 30. O número de esporos em cada instante no tempo é calculado pela equação 36, equivalente a equação 26.

$$Esporos_{(t+\Delta t)} = Esporos_{(t)} + \Delta t \times (inEsp - Longevidade - outrasPerdas) \dots 36$$

onde $Esporos_{(t+\Delta t)}$ (esporos) é o número de esporos em um instante futuro, $Esporos_{(t)}$ é o número de esporos no instante atual, Δt é o intervalo de integração, $inEsp$ (esporos/dia) é o fluxo de entrada e $Longevidade$ e $outrasPerdas$ (esporos/dia) são os fluxos de saída do compartimento.

Para cálculo do fluxo de entrada $inEsp$ se considera que o número de esporos produzidos por unidade de tempo é calculado pela equação 37:

$$Esp = (BSi \times EB + PSi \times EP + MSi \times EM + ASi \times EA + MaSi \times EMa) / perEsp \dots 37$$

onde Esp (esporos/dia) é o número de esporos que serão produzidos por dia, BSi , PSi , MSi , ASi e $MaSi$ (frutos) são os números de frutos bilros, pequenos, médios, adultos e maduros respectivamente e EB , EP , EM , EA e EMa (esporos/fruto) são os números de esporos produzidos por frutos bilros, pequenos, médios, adultos e maduros, respectivamente durante o período $perEsp$ (dias).

Os números de esporos produzidos por fruto de cada tipo são calculados multiplicando-se a área da superfície dos frutos pelo número de esporos produzidos por cm^2 de lesão, obtido na literatura. A superfície dos frutos é calculada supondo que sua forma pode ser aproximada por um elipsóide do tipo esferóide prolato cuja superfície pode ser calculada pela equação 38 (Math Forum, 2008²⁰).

$$S = 2\pi \times b \times \left(b + \frac{a \times \arcsin\left(\sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a}}\right)}{\sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a}}} \right) \dots 38$$

onde S (cm^2) é a área da superfície, a e b são os semi-eixos ($a > b$).

²⁰ <http://mathforum.org/dr.math/faq/formulas/faq.ellipsoid.html>

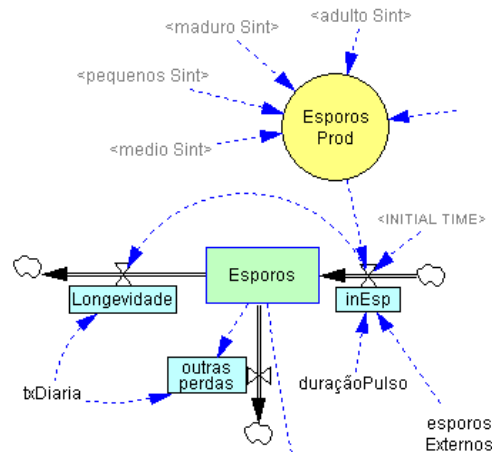


Figura 30. Representação gráfica do submodelo de esporos com o diagrama de Forrester (Forrester, 1961)

Como frutos com sintomas iniciam a produção de esporos alguns dias após o aparecimento das lesões se utiliza a função delay para calcular os esporos produzidos em cada instante, conforme equação 39:

$$Esporos\ Prod = DELAY\ N(Esp, atr, 0, N) \dots 39$$

onde *EsporosProd* (Esporos/dia) é o numero total de esporos produzidos em cada instante de tempo, *Esp* é o numero de esporos calculado na equação 12, *atr* é o tempo necessário para que os frutos com sintomas iniciam a produção de esporos e *N* é o grau do *delay* (ver equação 27)

O fluxo de entrada no compartimento de esporos contempla também a possibilidade de simular o efeito de esporos externos a área modelada, conforme equação 40:

$$inEsp = Esporos\ Prod + PULSE(IniTime, duraçãoPulso) \times esporosExternos \dots 40$$

onde *inEsp* (esporos/dia) é o fluxo de entrada no compartimento de esporos e a função *PULSE* é utilizada para distribuir *esporosExternos* (esporos/dia) na área modelada, iniciando no dia *iniTime* (dias) e mantendo a distribuição durante o período *duraçãoPulso* (dias).

Os esporos são perdidos através de dois fluxos de saída que representam a perda natural de viabilidade e as perdas por outras causas (deposição pela chuva, etc.). Para calculo das perdas por longevidade é utilizada equação semelhante a equação 34, conforme:

$$Longevidade = DELAY\ CONVEYOR(inEsp, rtLong, txDiaria, distr, ini, rtInit) \dots 41$$

onde *Longevidade* é o fluxo de saída (esporos/dia), *rtLong* (dias) é a longevidade dos esporos e *distr*, *ini*, e *rtInit* são variáveis para estabelecer o retorno da função no tempo zero da simulação, não utilizadas no presente caso. A variável *txDiaria* é a proporção diária de esporos perdidos por outras causas. O fluxo de saída correspondente as perdas por outras causas é calculado pela equação 42:

$$Outras\ perdas = esporos \times txDiaria \dots 42$$

O número de esporos é utilizado para calcular a taxa de infecção *txInf* utilizada nas equações 27 e 30. Para este cálculo se supôs uma função linear entre o numero de esporos produzidos nos frutos infectados da árvore e a taxa de infecção de frutos sadios considerando-se também o período de molhamento conforme equação 43:

$$tx\ inf = \frac{esporos}{espAs\ sint} \times molhamento \dots 43$$

onde *espAssint* (esporos) é o número de esporos necessários para que 100% dos frutos sadios sejam infectados em um dia e *molhamento* (proporção) é uma função empírica da precipitação diária para reduzir a taxa de infecção durante a época de estiagem.

Esta taxa é considerada como uma taxa de infecção geral e é modificada para cada categoria fenológica de frutos, considerando que os frutos de mais idade são mais resistentes. Para esta consideração utilizou-se a função de infectividade a proposta por Leach et al (2002), fazendo-se o parâmetro λ_0 igual a 1:

$$fcInf = \frac{1}{1 + (idade \times 0.2)} \dots 44$$

onde *fcInf* é o fator de correção da taxa de infecção para frutos com cada idade(semanas).

A produtividade das plantas é também calculada para que o efeito da aplicação de técnicas de controle possa ser avaliado. Para isso criou-se um compartimento, chamado de *ProdAcumulada*, cujo fluxo de entrada é o representado na equação 29. O conteúdo deste compartimento é atrasado de 365 dias. A diferença entre o total de frutos colhidos até um instante no tempo e o total até o mesmo instante no ano anterior gera a produção anual em frutos por planta. Este valor é multiplicado pelo número de plantas por hectare e pelo peso médio de semente por fruto.

Geração de dados climáticos

O modelo incorpora algoritmos para gerar temperatura e precipitação diárias, em função de parâmetros climáticos específicos.

Para geração da temperatura diária o modelo utiliza o algoritmo proposto por Nick e Harp (1980).

Para geração da precipitação diária é utilizada a técnica desenvolvida por Wilks (1999)

8.3. Valores das variáveis utilizadas

Os valores das variáveis utilizadas no modelo são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19. Valores das constantes utilizadas no modelo e fonte da informação.

Descrição	Var. no modelo	Valor	Fonte
Duração da fase de bilro	<i>rtbilro</i>	13.5 dias	Milde e Sgrillo, 1993
Duração da fase de pequeno	<i>rtpeq</i>	31.5 dias	Milde e Sgrillo, 1993
Duração da fase de médio	<i>rtmed</i>	22.5 dias	Milde e Sgrillo, 1993
Duração da fase de adulto	<i>rtad</i>	45.0 dias	Milde e Sgrillo, 1993
Período de incubação de bilros	<i>incb</i>	30 dias	Ran et al, 2004
Período de incubação de pequenos	<i>incp</i>	30 dias	Ran et al, 2004
Período de incubação de médios	<i>incp</i>	40 dias	Suposto
Período de incubação de adultos	<i>incA</i>	60 dias	Ran et al, 2004
Período de incubação de maduros	<i>incMa</i>	60 dias	Ran et al, 2004
Período necessário para que frutos infectados se mumifiquem	<i>rtMum</i>	273 dias	Evans et al, 1977
Período médio para frutos mumificados se decomparem	<i>rtDecom</i>	730 dias	Ran et al, 2004
Longevidade de esporos	-	273 dias	Ran et al, 2004
Esporos produzidos por cm ² de lesão em 9 meses	-	44E6 esporos	Evans, 1981
Área superficial dos bilros	-	14.9 cm ²	Calculado
Área superficial dos pequenos	-	41.4 cm ²	Calculado
Área superficial dos médios	-	134.3 cm ²	Calculado
Área superficial dos Adultos/Maduros	-	325.0 cm ²	Calculado
Esporos produzidos por dia por bilro	-	2.4E+06 esp/frt	Calculado

Modelos Matemáticos para Simular a Introdução e Dispersão da Monilíase do Cacau no Brasil

Esporos produzidos por dia por pequeno		6.8E+06 esp/frt	Calculado
Esporos produzidos por dia por médio		2.2E+07 esp/frt	Calculado
Esporos produzidos por dia por adulto/maduro		5.3E+07 esp/frt	Calculado
Eficiência da colheita	<i>Efic</i>	0.95	Leach et al, 2002
Intervalo entre colheitas	-	15 dias	Leach et al, 2002
Início da safra temporã	-	1/outubro	Ministério Agricultura (2003)
Início da safra principal	-	1/abril	Ministério Agricultura (2003)
Duração da safra		150 dias	Ministério Agricultura (2003)
Planta por hectare	-	650	Estabelecido
Peso de sementes por fruto colhido		0.045 kg/fruto	
Fator de correção da taxa de infecção para bilros	<i>fcInfB</i>	0.83	equação 19
Fator de correção da taxa de infecção para pequenos	<i>fcInfP</i>	0.52	equação 19
Fator de correção da taxa de infecção para médios	<i>fcInfM</i>	0.36	equação 19
Fator de correção da taxa de infecção para adultos	<i>fcInfA</i>	0.26	equação 19
Fator de correção da taxa de infecção para maduros	<i>fcInfMa</i>	0.19	equação 19

Variável *molhamento* foi calculada empiricamente como função da precipitação diária conforme Figura 31. Esta é somente uma primeira aproximação para simular o efeito do período de molhamento na taxa de infecção.

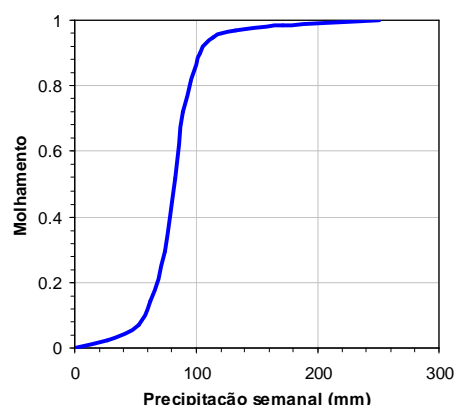


Figura 31. Função empírica da variável molhamento com a precipitação semanal.

Variáveis independentes

Utilizou-se os dados apresentados por Rios-Ruiz (2004) que acompanhou o desenvolvimento da doença em Tingo María, Peru, de novembro de 1996 a setembro de 1999. O acompanhamento foi feito em uma lavoura comercial com mistura de híbridos de 10 anos, suscetíveis a *Monilia*, em espaçamento 4 x 4. Na lavoura foi selecionada uma área de 0.5 ha e escolhidas ao acaso 15 árvores. Todos os tratamentos culturais e fitossanitários (podas, desbrotas, controle de ervas daninhas, retiradas de vassouras e frutos doentes, etc.) foram realizadas antes e durante o acompanhamento. Tanto observações meteorológicas como os registros do desenvolvimento da cultura e da doença foram realizados em intervalos semanais.

Como no trabalho de Rios-Ruiz os resultados são apresentados somente de forma gráfica se desenvolveu o aplicativo Raster-Vector em Visual Basic, apresentado na Figura 32, para transformar os valores gráficos

em numéricos com uma precisão aceitável. Com este aplicativo converteu-se a escala de tempo em semanas, utilizada por Rios-Ruiz, para dias do calendário Juliano, utilizada pelo modelo, considerando a semana 40 como dia 280 do calendário Juliano.

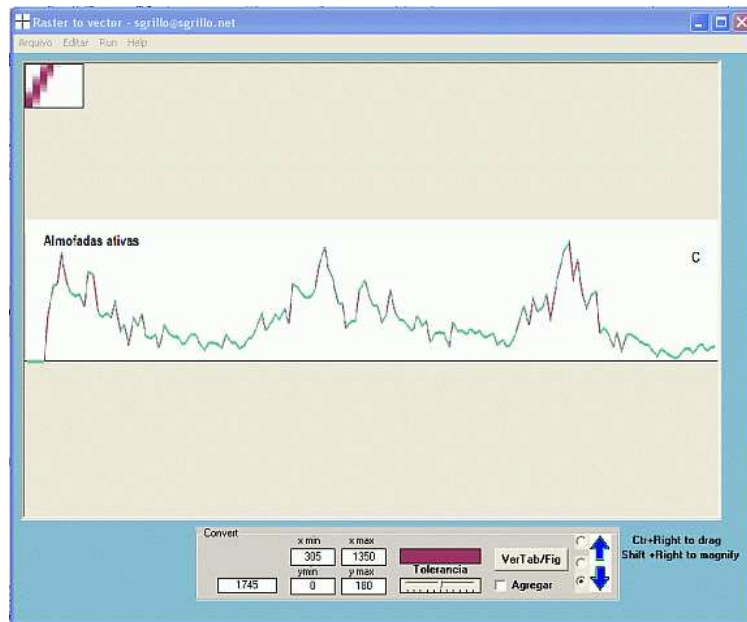


Figura 32. Aplicativo desenvolvido para transformar os dados gráficos em numéricos.

Como dados de entrada no modelo utilizou-se o número de almofadas ativas, com presença de botões florais e flores abertas em uma seção de 3 metros de comprimento ao longo do tronco principal das plantas.

A estrutura do modelo permite que estes dados sejam utilizados porque a equação 28 ajusta os valores automaticamente para uma carga de frutos que possa ser suportada pelas plantas. A entrada das almofadas no compartimento de bilros foi atrasada de 15 dias, período necessário para que se desenvolvam a pequenos bilros. A Figura 33 apresenta o gráfico original de Rios-Ruiz (2004).

A outra variável independente utilizada foi precipitação pluviométrica, cujo gráfico original de Rios-Ruiz (2004) é apresentado na Figura 34. Considerando que os dados originais correspondem a registros semanais foram divididos por sete para obtenção da precipitação diária.

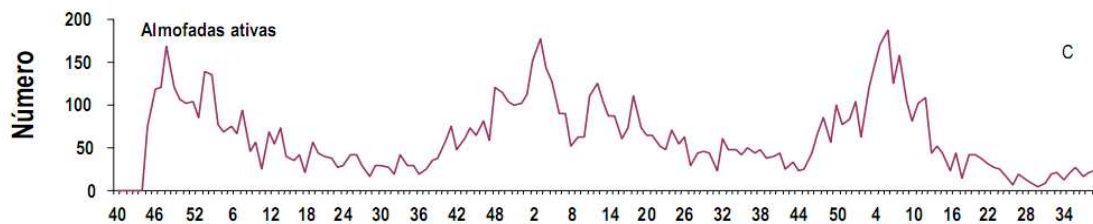


Figura 33. Dados utilizados como entrada de bilros no modelo (Rios-Ruiz, 2004)

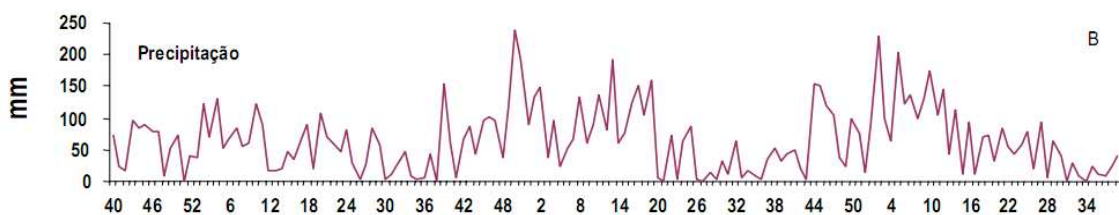


Figura 34. Precipitação pluviométrica utilizada no modelo (Rios-Ruiz, 2004)

Em algumas simulações os dados climáticos utilizados foram os gerados pelo modelo, com base nas características climáticas específicas de Rondônia e da Bahia.

8.4. Avaliação do modelo

Nesta fase inicial de desenvolvimento deste modelo realizou-se uma avaliação preliminar comparando os resultados gerados pelo modelo com os resultados reais apresentados por Rios-Ruiz (2004). Estas comparações servirão para, na continuação dos trabalhos, ajustar o modelo para que reproduza satisfatoriamente os resultados reais.

Na Figura 35 são apresentados os resultados referentes ao número de frutos jovens nos levantamentos realizados por Rios-Ruiz (2004) e os resultados simulados. Este autor considera, no seu trabalho, frutos jovens sendo aqueles com até 8-10 cm de comprimento. Esta categoria corresponde aos frutos pequenos e médios no modelo. O autor, no entanto, não especifica se os bilros (frutos com menos de 3 cm) também foram computados como frutos jovens. De qualquer forma pode se observar que ha uma boa concordância entre os dados reais e simulados, especialmente quanto a época de ocorrência dos picos populacionais.

No gráfico da Figura 36 são apresentados os valores reais e simulados da flutuação populacional de conídias de *M.roreri*. Os resultados reais são os de Rios-Ruiz (2002) e constaram da coleta de esporos por meio de armadilhas, instaladas a 2 m de altura em dez locais ao acaso na lavoura. As armadilhas eram expostas das 9:00 as 15:00 horas, três dias intercalados na semana.

Os resultados são bem próximos aos reais, ao menos no que se refere as épocas de ocorrência dos picos de esporos. É interessante notar que enquanto o numero real de conídias decresce nas gerações sucessivas o numero simulado tende a permanecer relativamente constante nas três gerações. Não foram realizadas simulações suficientes para que se verifique se a diferença nas tendências dos dados reais e simulados é devida a algum problema estrutural (conceitual) do modelo ou devido a combinação dos valores utilizados em suas variáveis.

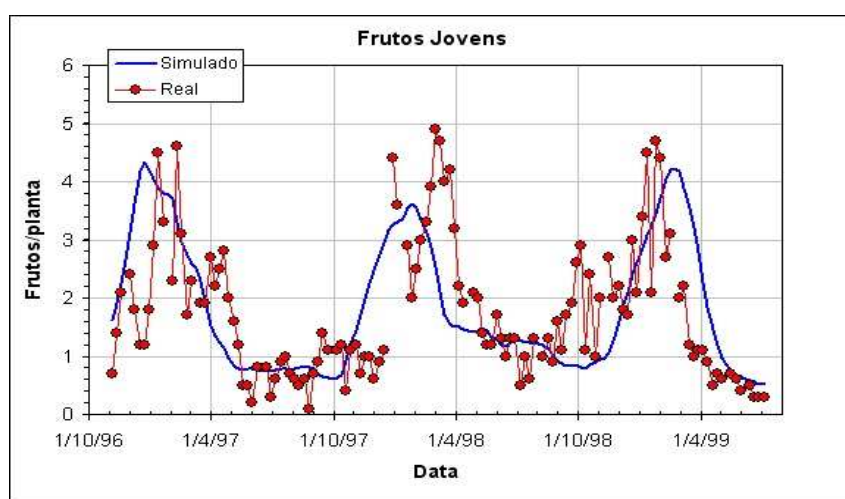


Figura 35. População de frutos jovens de cacau. Resultados simulados e reais (Rios-Ruiz, 2004) .

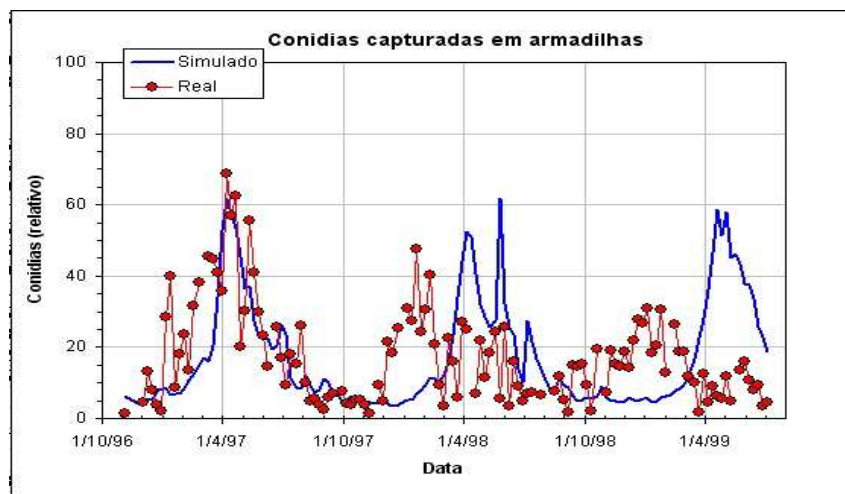


Figura 36. Resultados simulados e reais (Rios-Ruiz, 2004) da flutuação populacional de conídias de *M. royeri*. Escala representa valores relativos.

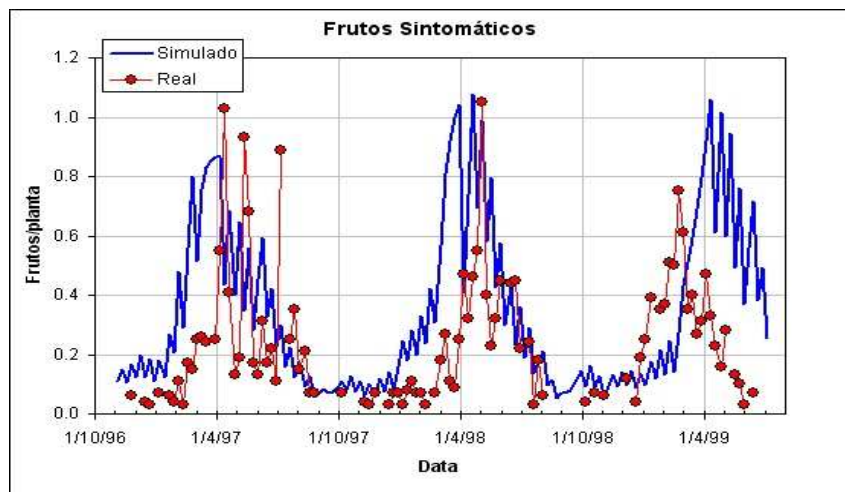


Figura 37. Proporção de frutos com sintoma. Resultados simulados e reais (Rios-Ruiz, 2004)..

Foram realizadas simulações para averiguar o efeito da aplicação das técnicas de controle na Bahia e em Rondônia. Os dados climáticos gerados pelo modelo para estas duas localidades são apresentados na Figura 38, A e B, respectivamente.

8.5. Simulações

Foram realizadas algumas simulações para verificar os efeitos da aplicação de técnicas de controle (colheita de frutos infectados em diferentes intervalos de tempo) na produtividade do cacau em Rondônia e na Bahia.

Utilizou-se para tanto dados de temperatura e precipitação diária gerados pelo modelo com base nas características climáticas médias de cada uma destas regiões, conforme apresentados nos gráficos da Figura 38.

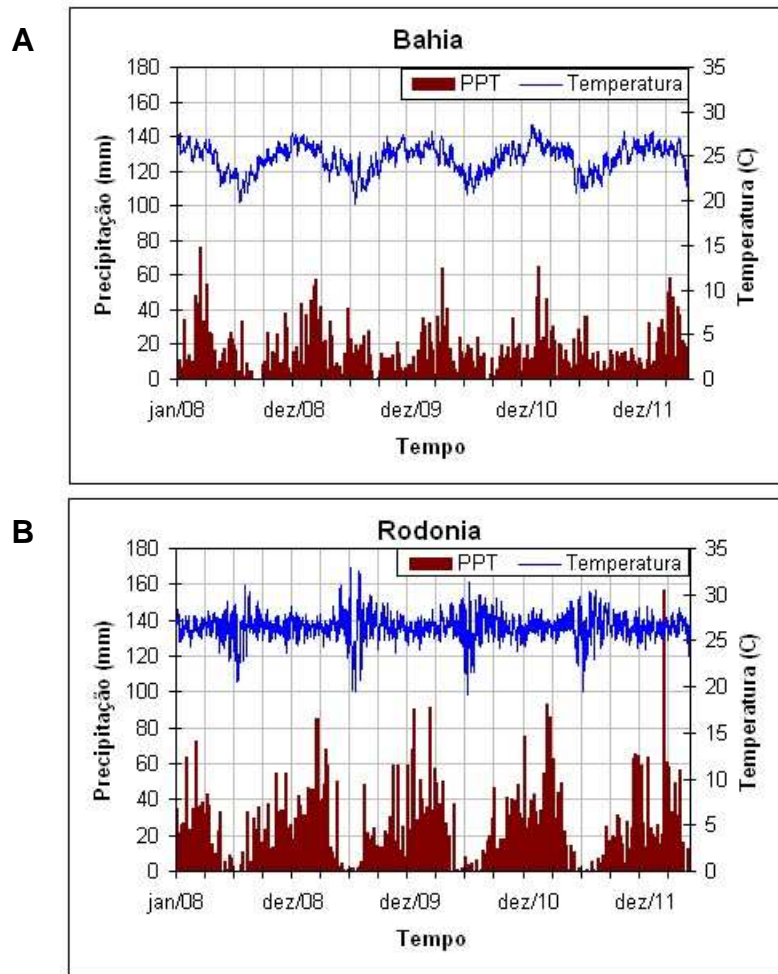


Figura 38. Simulação da temperatura e precipitação diária na Bahia (A) e Rondônia (B).

A Figura 39 apresenta resultados das simulações para avaliação das perdas de produtividade causadas pela Monilia em Rondônia e na Bahia, em função do intervalo entre as remoções de frutos infectados.

Os resultados indicam que na Bahia as perdas de produtividade seriam bastante mais elevadas e que, mesmo que as remoções de frutos fossem feitas semanalmente seriam causadas ainda cerca de 50% de perdas sobre a produtividade potencial. Sem controle a produtividade, na Bahia, seria cerca de 20% da produtividade potencial.

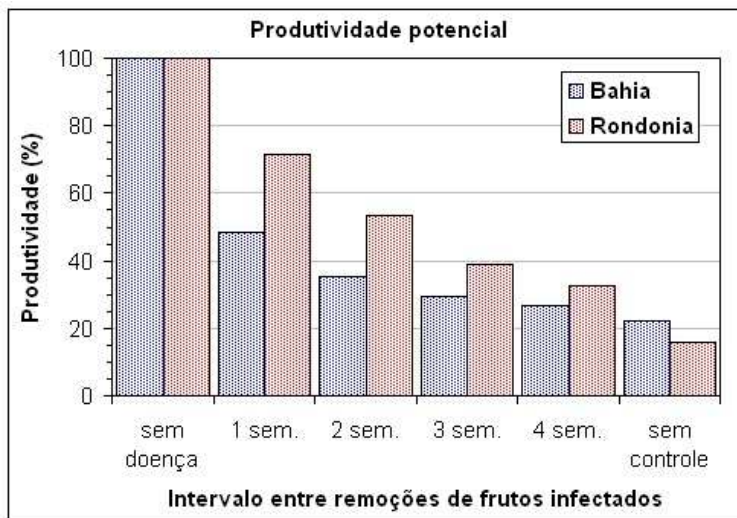


Figura 39. Resultados das simulações da produtividade potencial em diferentes intervalos de remoção de frutos infectados na Bahia e em Rondônia.

Em Rondônia as perdas seriam menores que as da Bahia. Com intervalo de remoção de frutos de uma semana cerca de 70% da produtividade potencial poderia ser alcançada. Sem controle aproximadamente 18% da produtividade potencial seria atingida.

9. Modelo espacialmente explícito

9.1. Introdução

A natureza dos mecanismos de transporte dos patógenos determina o padrão espacial da doença e, através deste padrão, torna possível avaliar a dinâmica e persistência da epidemia nas populações de plantas (Ristaino et al., 1993).

Até recentemente a gama dos possíveis mecanismos ou interações assumidas pelos modelos epidemiológicos era limitada: ou os modelos não consideravam a localização dos indivíduos (modelos *mean-field*) ou eram restritos aos contatos locais, entre vizinhos mais próximos, ou com decaimento exponencial com a distância. É provável que os processos reais de dispersão fiquem entre estes dois extremos sendo que muitos são bem descritos por distribuições tipo *long-tail*, como a de Pareto, por exemplo. O processo de dispersão é melhor simulado pelos modelos espacialmente explícitos no qual os indivíduos estão distribuídos em uma grade onde cada célula pode ter suas características particulares (Filipe e Maue, 2004).

Modelos espacialmente explícitos geram uma variedade de informações muito úteis para a tomada de decisão. São normalmente acompanhados por representações que permitem "ver" o efeito da aplicação de diferentes estratégias. O poder da visualização não deve ser subestimado, considerando que, quando se explica os resultados de uma simulação a um produtor, uma imagem pode valer por 1000 gráficos. Modelos que integram componentes biológicos e econômicos são ainda mais interessantes pois podem ser usados para explorar os dois conjuntos de consequências (biológicas/ambientais e econômicos) simultaneamente (Filipe e Maue, 2004).

Tipos diversos de modelos espacialmente explícitos podem ser desenvolvidos.

Modelos tipo autômatos celulares vem sendo bastante aplicados para descrever epidemias (Martins et al., 2000; Kleczkowski et al., 1997). Normalmente nestes modelos cada célula, representando um indivíduo, pode passar de um estado (sadio, infectado, imune, etc) a outro, através de funções de transição.

No modelo desenvolvido neste trabalho (modelo de dispersão da Monilia - MDM) embora a variação espacial seja discreta, a variação temporal da quantidade de doença em cada célula é contínua, modelada por equações diferenciais.

9.2. O Modelo

9.2.1. Descrição geral e hipóteses

Neste modelo o espaço é dividido em uma grade de tamanho e dimensões variáveis. Assim, para simular a dispersão continental, por exemplo a grade poderia ter um tamanho de 200 x 200 células representado dimensões de 2.000 x 2.000 km, tendo cada célula, então, 10 km de lado. A evolução da doença em cada célula seria representada pelo número de plantas infectadas.

No caso de se desejar estudar a dispersão da Monilia em propriedades a grade poderia continuar a ter 200 x 200 células mas neste caso as dimensões poderiam ser de 600 x 600 metros o que corresponderia a células de 3m x 3m, representado cada uma uma planta individual. Neste caso a evolução da doença em cada célula é representada pelo número de frutos infectados.

Independentemente da dimensão cada célula é considerada ser absolutamente homogênea, quanto às condições do ambiente.

Em cada célula pode ser estabelecido um determinado número de frutos ou plantas. Também a cada célula pode ser dado um valor numérico de 0 a 1 que representa de modo geral as condições ambientais na célula, com respeito ao desenvolvimento da doença. Células que possuem este valor igual a um são plenamente favoráveis ao desenvolvimento de doença, enquanto que se o valor for zero a doença não poderá se desenvolver na célula.

A evolução da doença dentro de cada célula é representada por um modelo determinístico, tipo Van Der Plank, com dois compartimentos que representam indivíduos sadios e indivíduos infectados respectivamente. Este modelo é integrado numericamente, em cada intervalo de tempo.

A dispersão da doença de uma célula para outras é feita, gerando-se, em cada intervalo de integração, uma distância ao acaso a ser percorrida. Esta distância é gerada a partir de uma distribuição de probabilidades escolhida previamente entre as disponíveis: Uniforme, Pareto, Weibull, Lognormal e Poisson. As distâncias geradas são integradas no intervalo de tempo. Quando a distância for superior ao lado da célula é gerada uma direção ao acaso, entre zero e 360 graus. Com estes valores se calcula a célula de destino no processo de dispersão. Após todas as células de origem e destino ter sido computadas é feita a introdução de material infectado na nova célula, proporcional a intensidade de infecção na célula de destino

Estas distribuições foram escolhidas para permitir uma avaliação dos possíveis mecanismos de disseminação da doença.

Os gráficos das funções de densidade de probabilidade das distribuições disponíveis são apresentados na Figura 40. Estes gráficos devem ser interpretados considerando-se o eixo horizontal como a distância de disseminação do inoculo em um intervalo de tempo e o eixo vertical como a frequência que a disseminação naquela distância ocorre na realidade. Assim, a distribuição uniforme por exemplo, pressupõe que qualquer distância de disseminação entre o valor mínimo e máximo estabelecido tem a mesma probabilidade de ocorrência.

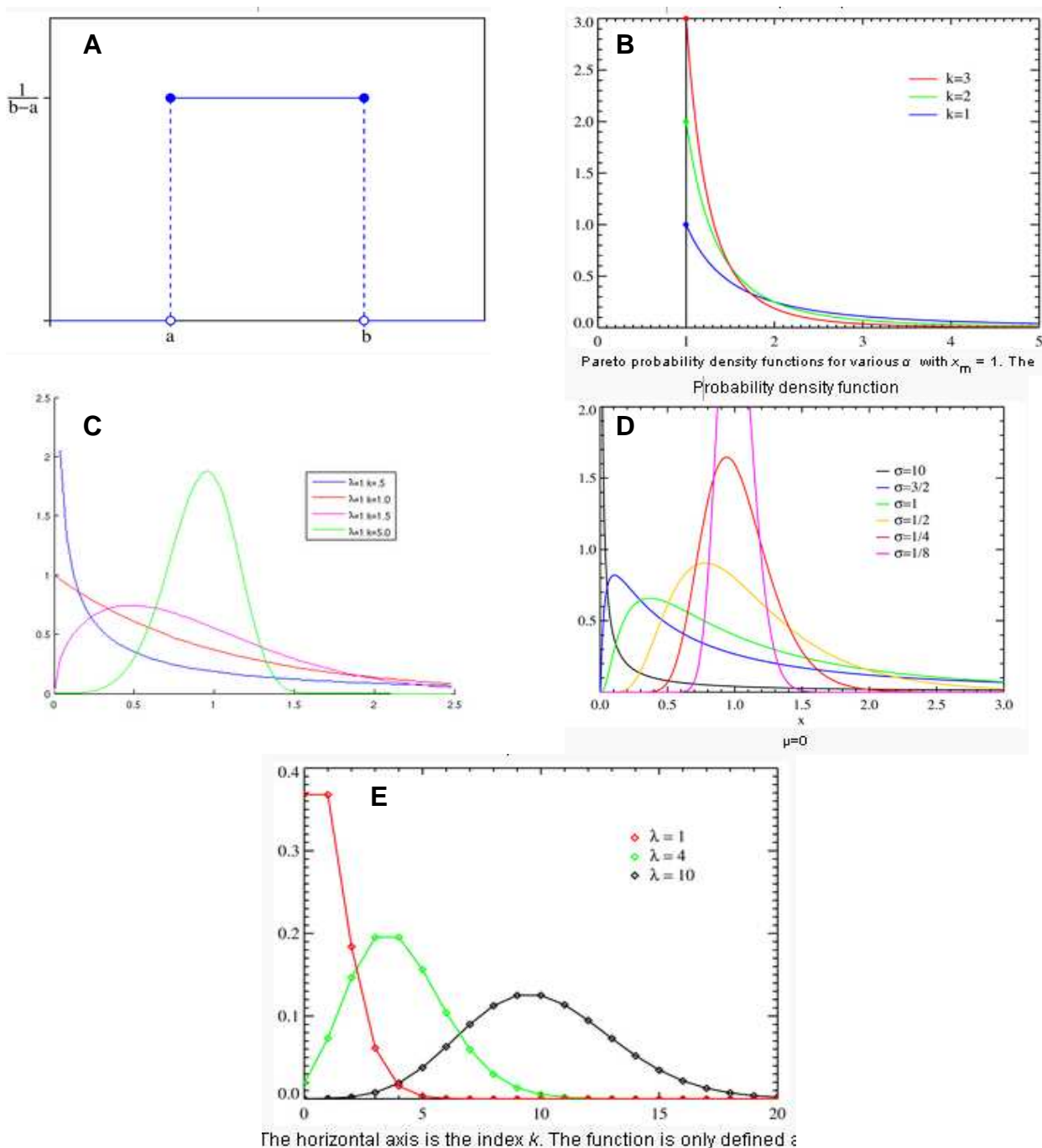


Figura 40. Funções de densidade de probabilidade das distribuições disponíveis no modelo: A - Uniforme²¹, B - Pareto²², C - Weibull²³, D - LogNormal²⁴ e E - Poisson²⁵

²¹ [http://en.wikipedia.org/wiki/Uniform_distribution_\(continuous\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Uniform_distribution_(continuous)) - consultado em 13/08/2009

²² http://en.wikipedia.org/wiki/Pareto_distribution - consultado em 13/08/2009

²³ http://en.wikipedia.org/wiki/Weibull_distribution - consultado em 13/08/2009

²⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Lognormal_distribution - consultado em 13/08/2009

²⁵ http://en.wikipedia.org/wiki/Poisson_distribution - consultado em 13/08/2009

9.2.2 O programa

O programa usado para implementação do modelo foi desenvolvido em Visual Basic 6.0.

O fluxograma simplificado é apresentado na Figura 41. Os cálculos são repetidos para cada célula da grade em cada intervalo de tempo, nos loopings do eixo X e Y.

A taxa de mudança populacional dx é calculada, para cada célula em cada intervalo de integração, com a equação 45 modificada de Van der Plank (1965):

$$\frac{dPopI_{(x,y)}}{dt} = PopS_{(x,y)} \times PopI_{(x,y)} \times tX \times inD_{(x,y)} \dots 45$$

$$\frac{dPopS_{(x,y)}}{dt} = -PopS_{(x,y)} \times PopI_{(x,y)} \times tX \times inD_{(x,y)} \dots 46$$

Nesta equação tX é a taxa de infecção e $inD_{x,y}$ é uma variável que indica as condições ambientes na célula x, y . Se $inD_{x,y}$ for zero não há condições para a doença se desenvolver. Se $inD_{x,y}$ for um as condições são ideais. $inD_{x,y}$ pode ter qualquer valor entre estes dois extremos. $PopS_{(x,y)}$ e $PopI_{(x,y)}$ são as populações sadias e infectadas, respectivamente, na célula x,y e dt é o intervalo de integração.

O numero de unidades infectadas e sadias (frutos ou plantas, dependendo da escala da área) é calculado em cada iteração integrando-se numericamente as equações 45 e 46.

A distancia de dispersão do inoculo de Monilia em cada intervalo de tempo é gerada ao acaso de acordo com a distribuição estatística escolhida antes da simulação. As distribuições disponíveis para gerar distancias ao acaso são a Uniforme, de Pareto, de Weibull, LogNormal e Poisson.

A distancia é gerada com a distribuição Uniforme pela equação 47:

$$Dist = v1 \times Rnd() \times 2 \times media \dots 47$$

Onde $Dist$ é a distancia gerada, $v1$ é um fator de correção para a intensidade do vento, $Rnd()$ é a função do Visual Basic que gera números ao acaso de zero a um e $media$ é a distancia media de dispersão informada pelo usuário. A multiplicação de $Rnd()$ por dois é necessária porque o valor máximo gerado deve ser o duplo da do valor médio desejado, quando a distribuição Uniforme é utilizada.

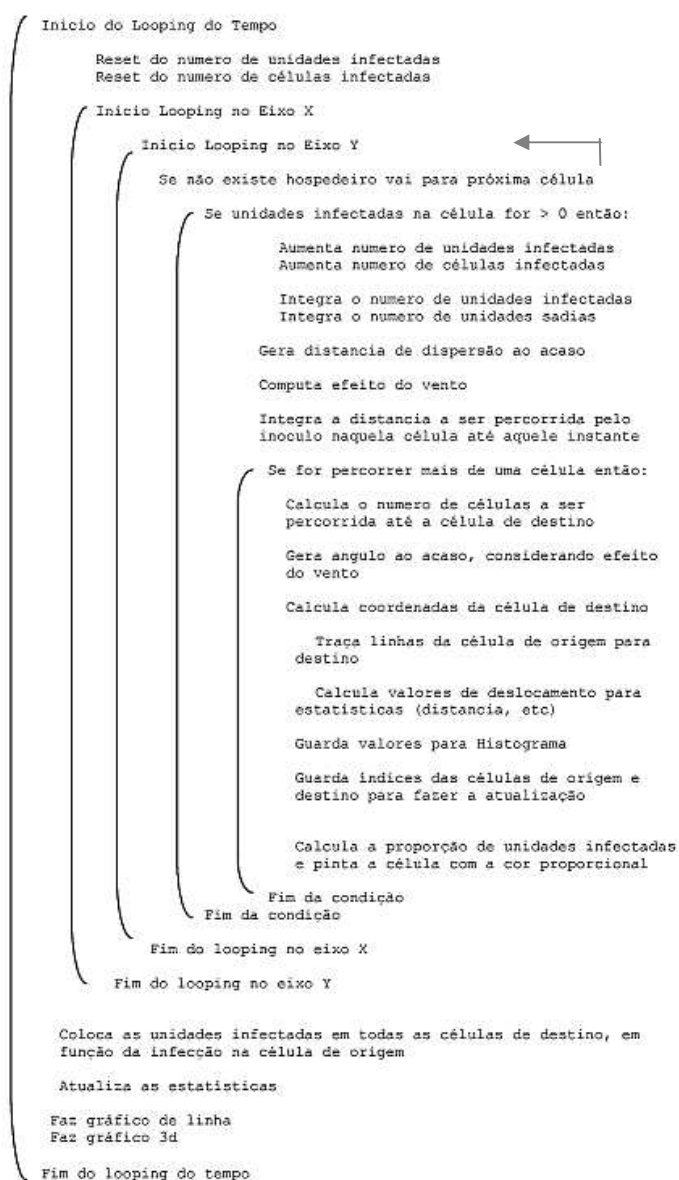


Figura 41. Fluxograma simplificado do programa para simulação da dispersão da Monilia.

Para a geração de números ao acaso seguindo a distribuição de Pareto se utilizou o método proposto por Kaj e Gaigalas (2005) utilizando-se a distribuição uniforme, conforme equação 48:

$$Dist = v1 \times \frac{paretoB}{\frac{1}{Rnd()^{paretoC}}} \dots 48$$

Onde *paretoB* é o menor numero que poderá ser gerado e *paretoC* é o parâmetro chamado de Índice de Pareto e estabelece o nível de agregação dos números gerados.

Para a geração de números ao acaso da distribuição de Weibull também pode ser usada a distribuição uniforme, conforme a equação 49, adaptada de Wittwer(2004):

$$Dist = v1 \times weibullB \times \left(-LN(Rnd()) \right)^{\frac{1}{weibullC}} \dots 49$$

Onde *weibullB* é o parâmetro de escala da distribuição de Weibull e *weibullC* o parâmetro de forma.

Na utilização da distribuição Lognormal os números ao acaso são gerados a partir da equação 50:

$$Dist = v1 \times e^{media + desvio \times \sqrt{-2 \times LN(Rnd())}} \times \cos(2 \times PI \times Rnd()) \dots 50$$

Onde *media* e *desvio* são a média e o desvio padrão da distribuição Lognormal, respectivamente.

Para gerar números ao acaso seguindo a distribuição de Poisson é utilizado o seguinte algoritmo:

```
Function Randpoisson(lambDa)
temp = Rnd()
N = 1
While (temp > Exp(-lambDa))
N = N + 1
temp = temp * Rnd()
Wend
Randpoisson = N - 1
End Function
... 51
```

A distancia gerada em cada iteração é integrada em cada célula em cada célula, de acordo com a equação 52:

$$\frac{dDisp_{(x,y)}}{dt} = Dist \times Ind_{(x,y)} \dots 52$$

onde $Disp_{(x,y)}$ é a distancia total de dispersão em cada célula e *Dist* é a distancia instantânea de dispersão calculada por uma das equações 47-51. A equação 52 é integrada numericamente a cada iteração. Quando a distancia integrada ultrapassa o tamanho do lado da célula o programa calcula para qual célula ocorrera a dispersão da doença naquele instante. Inicialmente é calculado o numero de células equivalente a distancia de dispersão, conforme equação 53:

$$nCel = Int\left(\frac{Disp_{(x,y)}}{ladoCel} + 0.5\right) \dots 53$$

onde *nCel* é o numero de células equivalente a distancia de dispersão e *ladoCel* é a dimensão do lado de uma célula da grade.

O angulo de dispersão, a partir da célula considerada, é calculado gerando-se um angulo ao acaso, entre 0° e 360° utilizando-se a distribuição uniforme:

$$alfa = Rnd() \times 2 \times PI \dots 54$$

onde *alfa* é o angulo de dispersão.

As coordenadas da célula de destino são então calculadas pelas equações em 55:

$$xDest = nCel \times \cos(alfa) + xOrig$$

$$yDest = nCel \times \sin(alfa) + yOrig \dots 55$$

onde $xDest$ e $yDest$ são as coordenadas da célula de destino e $xOrig$ e $yOrig$ são as coordenadas da célula de origem.

O numero de frutos que será infectado na célula de destino é função da percentagem de frutos infectados na célula de origem, conforme equação 56:

$$NfrInfec = PopS_{(xDest,yDest)} \times 1 - \exp^{-propFrInfec} \dots 56$$

onde $NfrInfec$ é o numero de frutos infectados na célula de destino, naquele instante, e $propFrInfec$ é a proporção de frutos infectados na célula de origem.

9.2.3 Interface Principal

A interface principal permite a comunicação do programa com o usuário tanto para configuração das simulações como para obtenção dos resultados. Esta interface (Figura 42) permite:

- definir a matriz de células e suas dimensões;
- definir o índice de favorabilidade de diferentes regiões da área a ser modelada;
- definir o numero e distribuição espacial dos hospedeiros;
- informar variáveis de controle da simulação
- informar taxa de infecção e distribuição e respectivos parâmetros de dispersão espacial;
- informar intensidade e direção predominante dos ventos;
- selecionar opções para apresentação dos resultados;
- realizar simulações;
- apresentar resultados;
- gravar e carregar simulações

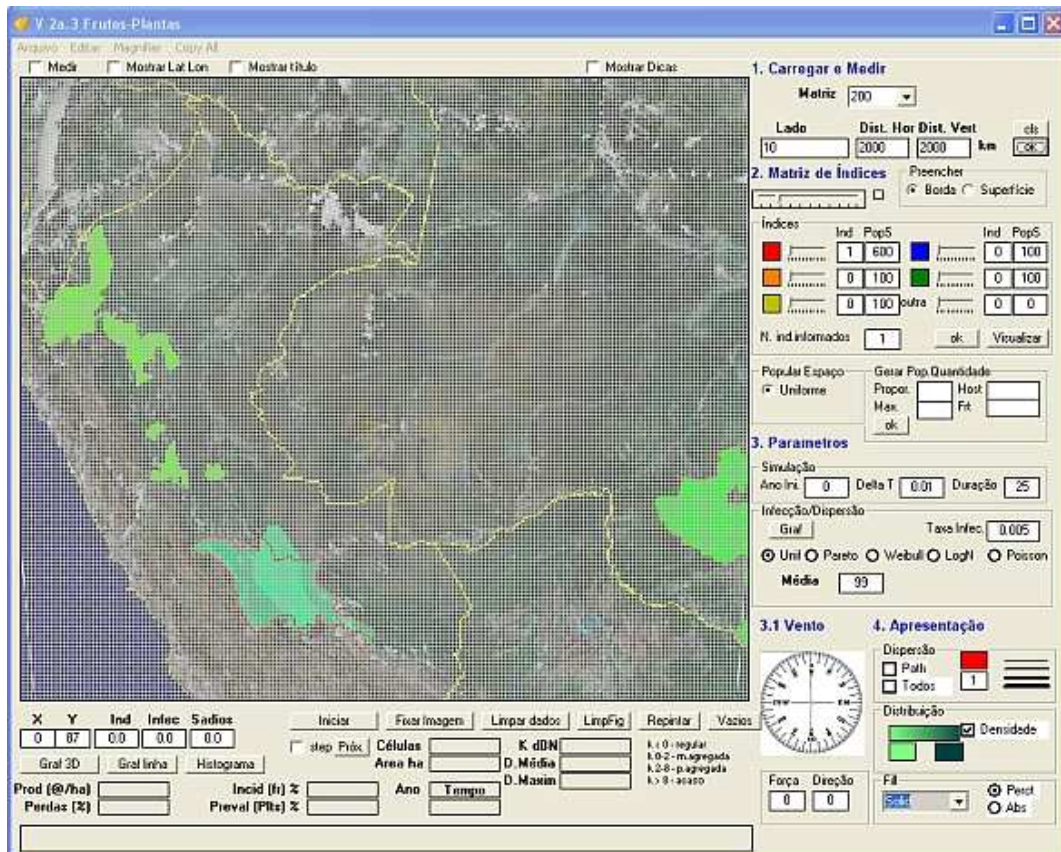


Figura 42. Interface do programa MDM para simulação da dispersão da Monilia

9.2.3.1. Definição dos parâmetros para simulação

Inicialmente o usuário carrega um mapa ou desenho da área a ser simulada, através das opções disponíveis no menu *Arquivo*. Informa então o tamanho da grade (Matriz) e as dimensões horizontal e vertical. Estas dimensões poderão alternativamente ser calculadas a partir das coordenadas geográficas de dois vértices opostos da figura carregada.

A favorabilidade ao desenvolvimento da doença, em cada célula, é indicada através de diferentes cores, utilizadas para demarcar estas áreas, conforme Figuras 42 (Grupo de opções *Índices*) e 43. A cor laranja na Figura 43 indica uma favorabilidade próxima a zero, por não haver, nas áreas demarcadas, hospedeiros da *Monilia*. As áreas marcadas com os tons de verde são bastante favorável, diferindo na densidade de hospedeiro. A cor vermelha demarca área com baixa favorabilidade, uma vez que a densidade de cacau nativo nesta área é muito baixa, cerca de 2 a 3 plantas por hectare. Embora neste exemplo só se tenha utilizado a densidade de hospedeiro como fator de favorabilidade o programa permite que seja indicado, para cada célula, a densidade de hospedeiros e um índice de favorabilidade. Uma vez que as características das células sejam indicadas através das diferentes cores, pintadas sobre o mapa, o programa monta as matrizes com os índices.

Opcionalmente, para simular a disseminação da doença em áreas nativas, pode-se distribuir o hospedeiro aleatoriamente na área, fazendo-se também que a densidade do hospedeiro seja aleatória, utilizando-se a distribuição uniforme.

As variáveis de controle da simulação devem também ser especificadas, no grupo de opções *Simulação*, e incluem o ano inicial da simulação, o intervalo de integração e o ano final.

A seguir deve ser escolhida, no grupo de opções *Distribuição/Infecção* a distribuição estatística que descreve a disseminação e os parâmetros correspondentes e a taxa de infecção da *Monilia*.

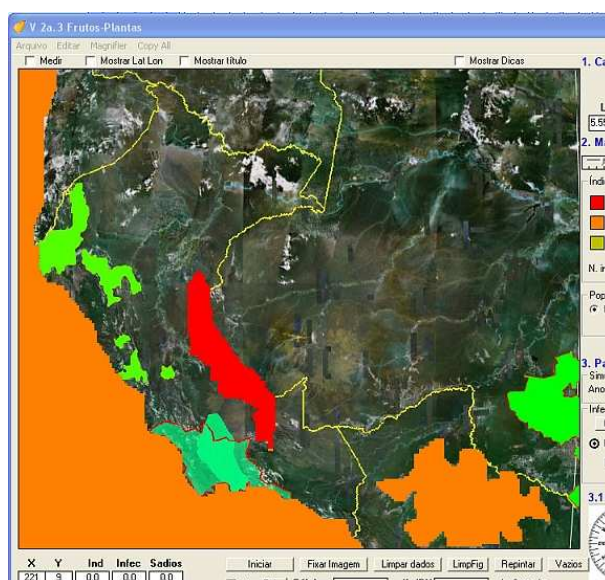


Figura 43 . Interface do programa MDM para simulação da dispersão da *Monilia*

As distribuições disponíveis são aquelas apresentadas na Figura 40. Para auxiliar na escolha da distribuição e estabelecimento dos parâmetros o programa pode apresentar, clicando-se no botão *Graf*, um gráfico dinâmico das funções de densidade, conforme Figura 44. Os valores numéricos são apresentados em uma tabela e os valores dos parâmetros e escalas podem ser alterados pelo usuário, conforme necessário.

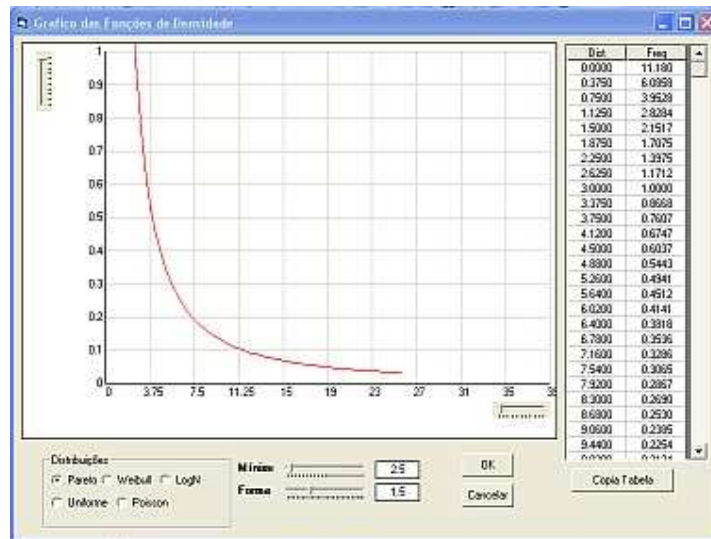


Figura 44. Gráfico e tabela com valores da função de densidade conforme respectivos parâmetros.

Os parâmetros necessários para simular o efeito do vento na dispersão da monilia são informados nos campos *Força* e *Direção*, disponíveis para tal fim no grupo de opções 3.1 *Vento*. Alternativamente estes parâmetros podem ser informados clicando-se na rosa dos ventos disponível no grupo de opções, conforme Figura 45.



Figura 45. Estabelecimento dos parâmetros para simular o efeito do vento na dispersão da Monilia.

9.2.3.2. Representação gráfica da dispersão/distribuição

No grupo de opções 4. *Apresentação* é possível escolher a forma gráfica de apresentar os resultados de dispersão e distribuição da Monilia, conforme representado na Figura 46.

O grupo de opções *Dispersão* permite que seja mostrada linhas de conexão entre as células de origem e as células de destino do inoculo de monilia na cor e espessura estabelecidas nos campos correspondentes. A opção *Path* desenha as novas linhas de conexão em cada iteração. Neste caso só são representadas as linhas de conexão que causaram de fato uma nova infecção. A opção *Todos* retraça, em cada iteração, todas as linhas de conexão, inclusive aquelas que não resultam em novas infecções, pela ausência de hospedeiro na célula de destino.

No grupo de opções *Distribuição* pode ser escolhido mostrar graficamente a intensidade da doença (numero de frutos ou numero de plantas infectadas) em cada célula. A cor da escala a ser utilizada pode ser escolhida nos campos coloridos correspondentes.



Figura 46. Opções para representação gráfica da distribuição/dispersão da Monilia

O modo de preenchimento pode ser escolhido entre sólido, transparente (sem preenchimento), linhas horizontais, verticais ou linhas cruzadas.

Estas opções podem ser utilizadas separadamente ou em conjunto, conforme ilustrado na Figura 47.

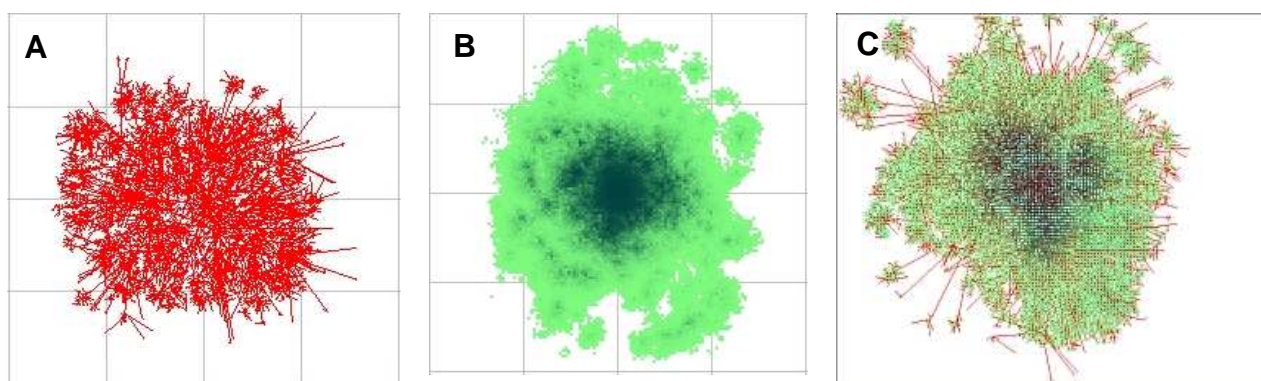


Figura 47. Algumas opções para apresentar a dispersão/distribuição da Monilia. A - Linhas ligando as células de origem e destino do inóculo (Path); B - Intensidade de infecção (densidade, preenchimento sólido); C - Intensidade de infecção (preenchimento transparente) e linhas de origem-destino.

9.2.3.3. Botões de comando

Os botões de comando realizam as simulações aplicando diferentes opções. O botão *Iniciar* inicia a simulação. Se este botão for acionado enquanto a simulação estiver ocorrendo a mesma é interrompida, reiniciando quando o botão for acionado novamente. As opções de apresentação podem ser alteradas enquanto a simulação estiver pausada.

O botão *Fixar Imagem* fixa a imagem de dispersão/distribuição presente no momento, tornando-a independente de simulações posteriores. Desta forma, pode-se realizar uma simulação em uma parte da tela, fixar a imagem, alterar os parâmetros e realizar outra simulação em outra parte da tela, comparando então os resultados gráficos.



Figura 48. Botões de comando para realização das simulações

O botão *Limpar dados* retorna os valores das células (numero de hospedeiros e índices de favorabilidade aos que foram carregados inicialmente. Desta forma é possível realizar diferentes simulações com os mesmos dados iniciais, mas utilizando-se diferentes distribuições de probabilidade, parâmetros, variáveis de controle e opções de apresentação.

O botão *Limpar imagem* limpa a imagem de distribuição, permitindo que a mesma seja repintada, com o botão *Repintar*, com diferentes opções de cor e padrão de preenchimento.

O botão *Vazios* preenche com a cor vermelha aquelas células onde não existem hospedeiros.

9.2.3.4. Apresentação dos resultados

Resultados numéricos

Na parte inferior da interface do usuário são apresentados resultados numéricos das simulações (Figuras 42 e 49).

	Células	1361	K dBN	1.392	k < 0 - regular k 0-2 - m.agregada k 2-8 - p.agregada k > 8 - acaso	
	Area ha	1.22	D.Média	10		
Incid (fr) %	76	Ano	0005.94	D.Maxim		1306
Preval (Plts) %	8.8		Novembro			

Figura 49. Resultados numéricos de uma simulação

O numero de células que apresentam infecção e a área correspondente são apresentadas nos campos *Células* e *Área ha*, respectivamente. O campo *KdBN* apresenta o parâmetros K da distribuição binomial negativa, calculado pelo método do momento, segunda equação 13:

$$KdBN = \frac{Dm^2}{Ds^2 - Dm} \dots 13$$

onde *KdBN* é o parâmetro *k* da distribuição binomial negativa, *Dm* é a distancia media de disseminação da Monilia, por unidade de tempo e *Ds²* é a variância das distancia de disseminação. Segundo Elliott (1979) o parâmetro *KdBN* mede o grau de agregação da disseminação da Monilia e, conseqüentemente, de agregação de sua distribuição espacial. Quando *KdBN* é negativo a distribuição espacial é uniforme ou regular, quando o parâmetro estiver entre zero e dois a distribuição é altamente agregada, formando clusters bem definidos. Valores entre 2 e 8 sugerem distribuição espacial moderadamente agregada e valores superiores a oito indicam uma distribuição espacial ao acaso (Toledo et all, 2006).

A distancia média de disseminação, até aquele instante no tempo, é apresentada no campo *D.Média* e a distância máxima no campo *D.Maxim*.

Nos campos *Incid (fr) %* e *Preval (Plts) %* são apresentadas as percentagens de frutos infectados e de plantas infectadas, respectivamente.

O tempo de simulação é apresentado no campo *Ano* e, logo abaixo, é apresentado o mês correspondente a parte decimal do ano.

Para a inspeção numérica da janela (grade) de simulação existem cinco campos numéricos que apresentam os características das células da grade, conforme o cursos do mouse é movimentado sobre a grade. Estes campos apresentam as coordenadas *X* e *Y*, o valor do índice (*Ind*) de favorabilidade, o numero de frutos (ou plantas) infectados (*Infec*) e o numero de frutos (ou plantas) sadios (*Sadios*), conforme apresentado na Figura 50.



Figura 50. Campos numéricos

Resultados gráficos

Varias alternativas de apresentação dos resultados são disponíveis. A Figura 51 apresenta um exemplo de gráfico de distribuição de Monilia em três dimensões.

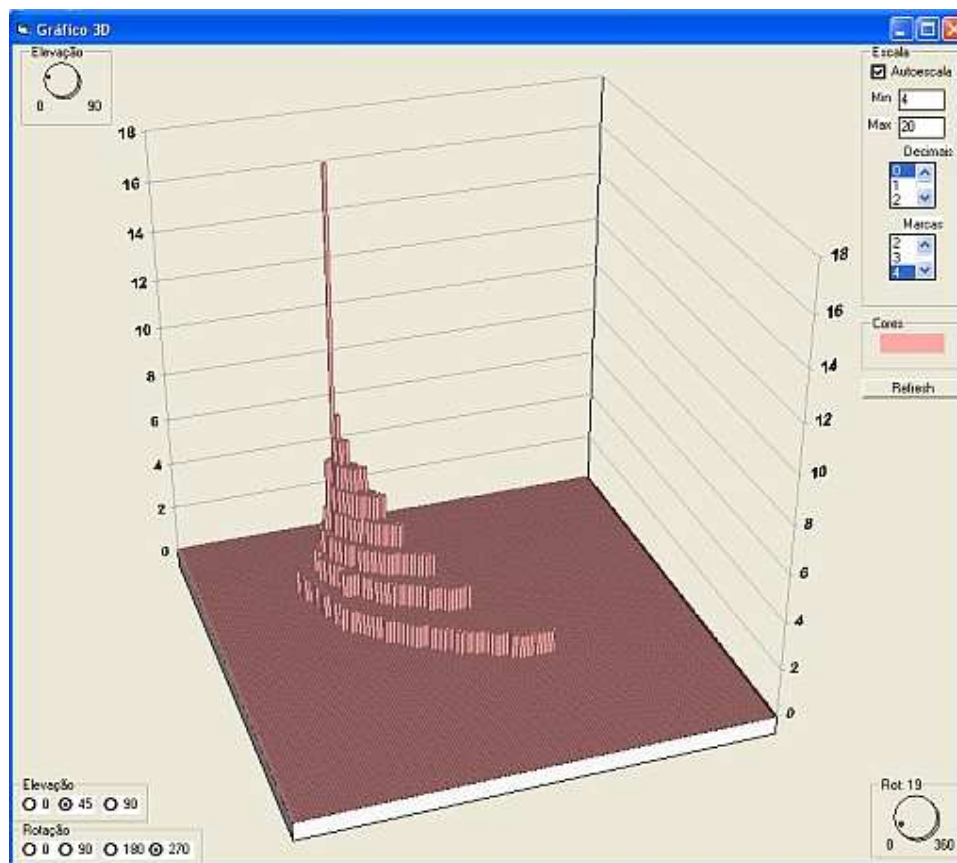


Figura 51. Resultados da distribuição da Monilia em gráfico de três dimensões.

A elevação e rotação deste gráfico pode ser ajustada continuamente. A escala pode ser automática ou estabelecida pelo usuário, assim como a cor do gráfico, numero de marcas nos eixos e decimais das escalas. O gráfico pode também ser copiado para a área de trabalho para ser colado posteriormente em outro aplicativo.



Figura 52. Evolução das intensidade e prevalência da Monília e das perdas causadas.

A Figura 52 apresenta um gráfico de linha ilustrando a evolução da intensidade da doença (percentagem de frutos infectados por planta infectada), de sua prevalência (percentagem de plantas que apresentam pelo menos 1 fruto infectado) e a percentagem de perdas, calculada considerando-se que os fruto infectados não produzem amêndoas aproveitáveis.

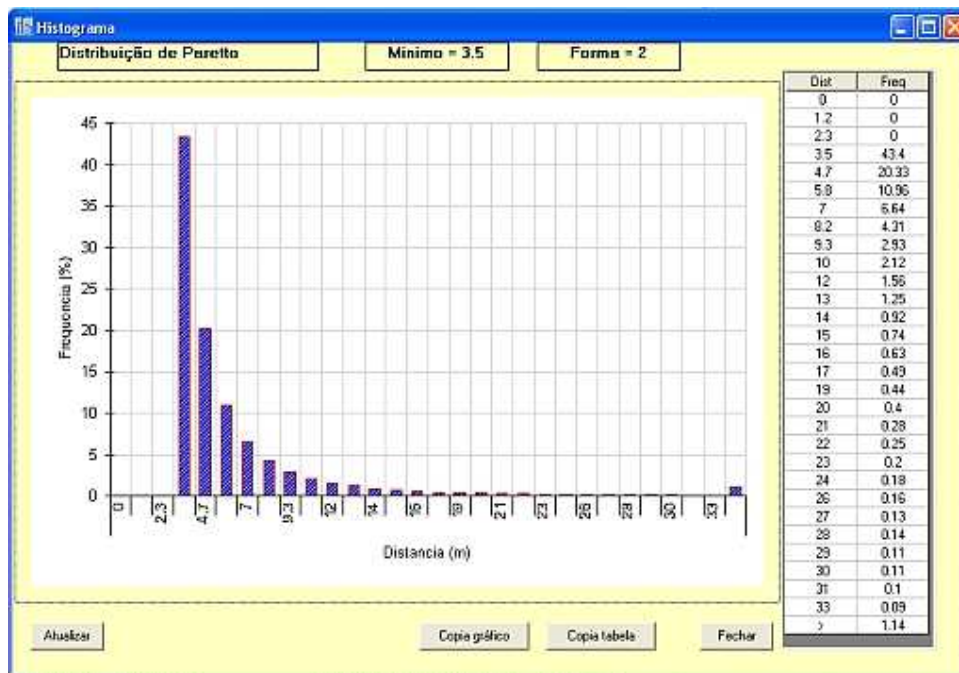


Figura 53. Histograma com distribuição das distancias de dispersão.

Outra opção para avaliação dos resultados simulados é através do histograma representando a distribuição das distancias geradas pelo programa, em cada iteração, conforme mostrado na Figura 53. A função principal deste gráfico é verificar se a geração dos números ao acaso esta dentro do esperado, em função da distribuição e parâmetros escolhidos, conforme apresentado na Figura 44.

Guardando e recuperando os resultados

O menu *Arquivo* oferece opções de armazenamento de dados. Os resultados das simulações podem ser armazenados, com a opção *Guardar simulação*, em arquivo do tipo *.can* que armazenam todas as opções de simulação assim como os valores das células no instante em que os dados foram guardados. As simulações podem ser também repetidas, carregando-se um arquivo já guardado e então utilizando-se o botão de comando *Limpar dados*. O programa neste caso, conserva somente o valor dos índices de favorabilidade das células e das opções de simulação, que podem ser alteradas para realização de novas simulações.

Opcionalmente, se a área simulada está georeferenciada as coordenadas das células assim como seus valores podem ser armazenados em arquivo tipo *.txt*, utilizando-se a opção *Guardar coordenadas*. O georeferenciamento é realizado indicando-se as coordenadas dos cantos superior esquerdo e inferior direito da grade nos campos disponíveis para este fim, que podem ser mostrados marcando-se a opção *Mostrar lat lon* na parte superior da interface. Os arquivos georeferenciados podem ser exportados para o *Google Earth* para representação gráfica da distribuição da Monilia, semelhante a da Figura 44, sobre a superfície da Terra.

Os resultados gráficos também podem ser guardados copiando-se a janela da grade através do menu *Editar* utilizando-se a opção *Copiar imagem*. A imagem com os resultados da simulação é copiada para o clipboard, podendo ser posteriormente guardada como arquivo de imagem ou colada em outros aplicativos. Alternativamente toda a interface do usuário pode também ser copiada em uma imagem utilizando-se a opção do menu editar *Copiar interface*.

9.2.3.5. Outras opções

Na parte superior da interface existe a possibilidade de apresentar um campo, na tala da grade, para ser digitado um título para a simulação. Assim imagem da simulação ou da interface poderá ser identificada com mais facilidade.

A opção *Medir*, na parte superior da interface, permite que se realize medidas de distancia entre pontos da grade de simulação, conforme ilustrado na Figura 54.

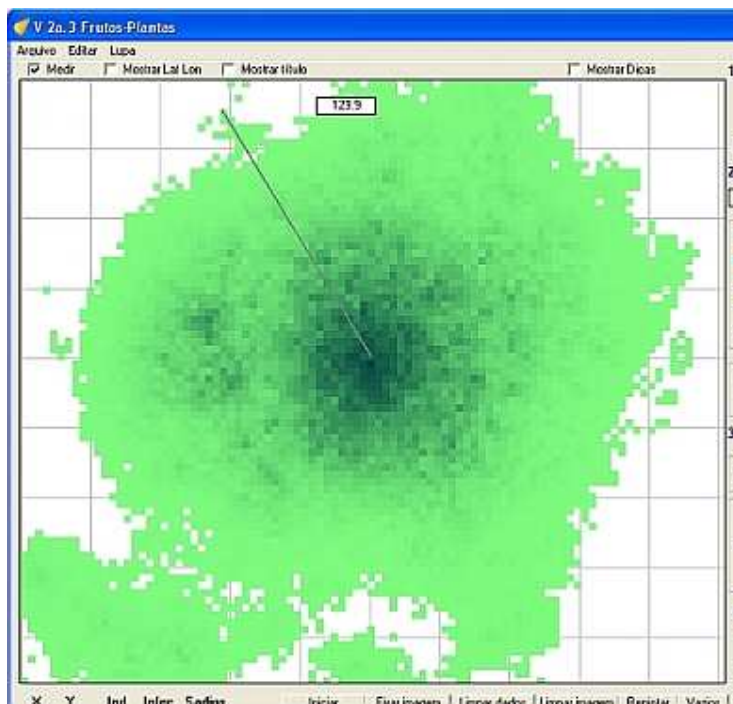


Figura 54. Exemplo de medida realizada com o mouse, na janela da grade.

A opção *Lupa*, apresentada na barra de menus, possibilita a utilização de uma pequena lupa para aumentar partes da imagem da dispersão da Monilia, conforme ilustrado na Figura 55.

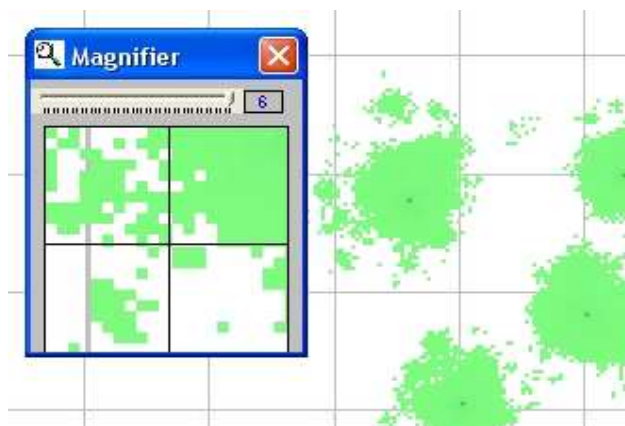


Figura 55. Exemplo de utilização da lupa na janela de simulação. A área aumentada é a que foi indicada pelo cursor.

9.3. Avaliação do Modelo/Programa

Não é possível no momento realizar plenas avaliações do modelo por não ser disponíveis dados de distribuição espacial da Monilia. No entanto é possível realizar uma avaliação preliminar utilizando-se dados da Vassoura de Bruxa relativos a sua introdução e disseminação na Bahia, de 1989 a 1992, conforme Pereira et al (1996), assim como dados de sua disseminação na América Central e no Peru.

Vassoura de Bruxa

A simulação da distribuição espacial da Vassoura de bruxa foi realizada sobre a imagem do mapa simplificado da região, mostrando a distribuição da VB em um, dois e três anos após sua introdução, conforme Figura 56. A altura (eixo norte-sul) da região com cacau, representada na figura é de cerca de 210 km e sua largura (eixo leste-oeste) cerca de 130 km.

Empiricamente escolheu-se a distribuição de Pareto para simular a dispersão, considerando-se que a doença em uma fase inicial, parece ter sido disseminada intencionalmente em diferentes locais da região. As simulações foram realizadas considerando-se o parâmetro de escala com valor 10 e o de forma com valor dois. A densidade de cacau informada foi de 600 plantas por hectare e o índice de favorabilidade a doença foi igual para todas as células.

As simulações, apresentados na Figura 56, permitem concluir que, embora os resultados da dispersão pareçam ter sido subestimados no primeiro ano, a dispersão no segundo e terceiro ano esta próximo aos resultados reais. Testes mais rigorosos de validação do modelo deverão ser aplicados quando dados reais sejam disponíveis.

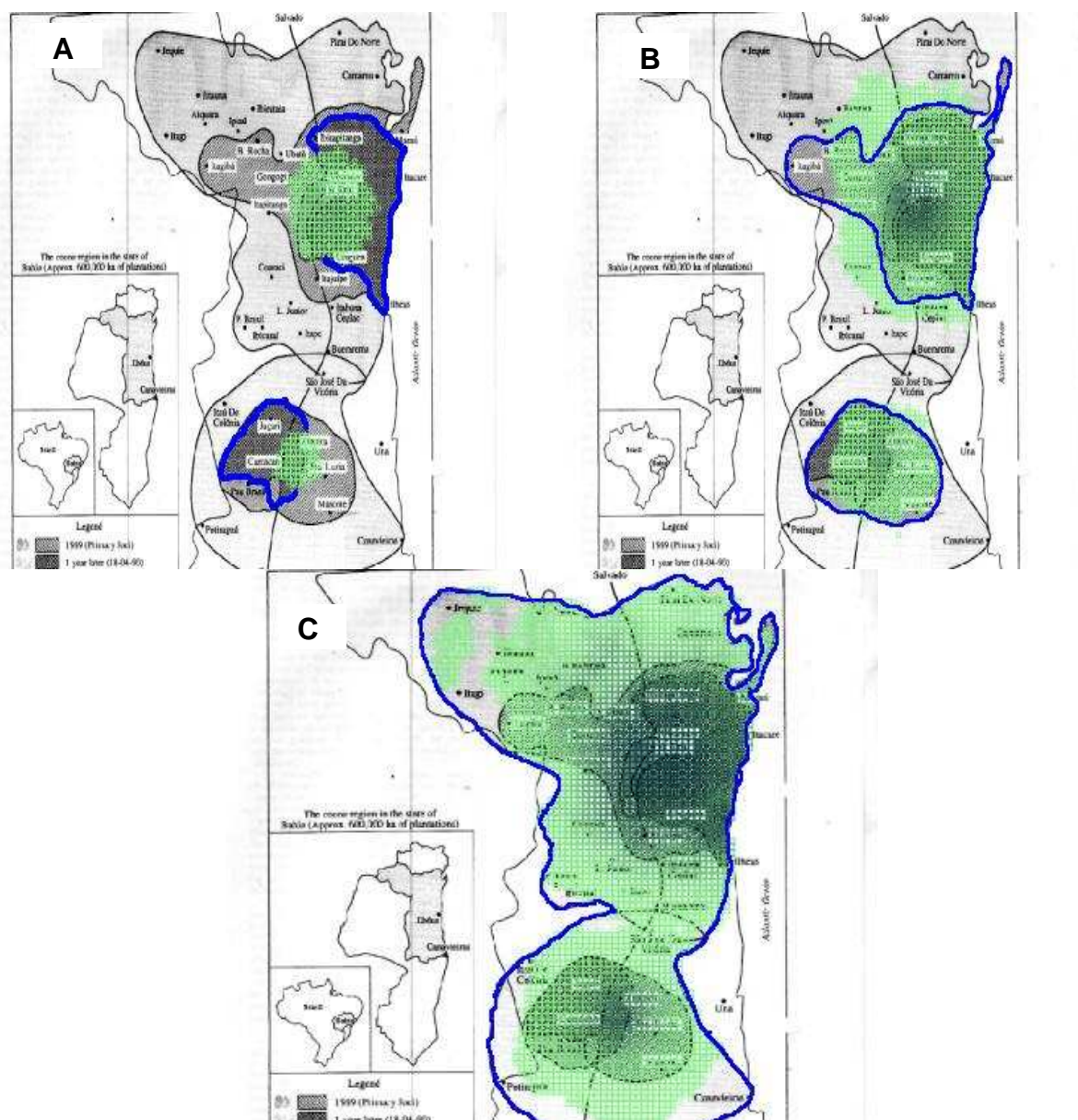


Figura 56. Simulação e distribuição real da Vassoura de bruxa na Bahia, em 1990 (A), 1991 (B) e 1992 (C).

América Central

Foram realizadas também simulações relativas a dispersão da *Monilia* na América Central utilizando-se dados de Phillips-Mora *et alii* (2006) que apresenta as localidades e respectivos anos de introdução da doença, conforme apresentado na Figura 57, que representa cerca de 2.000 km de cada lado. Foi utilizada uma matriz de 100 x 100, tendo, portanto, cada célula 22 km de lado. As áreas em verde claro representam regiões de florestas na América Central onde pode estar presente plantas de cacau em baixa densidade. Os pontos representam áreas comerciais de cacau e as datas indicam o anos na qual a *Monilia* foi encontrada em cada local.

A simulação foi inicializada no ano de 1956 com três áreas infectadas no Panamá. Nesta simulação foi utilizada a distribuição de Pareto, com parâmetro de forma 1.8 e de escala 34, que reproduz tanto a dispersão a curta distancia, de planta a planta, como é também adequada para simular simultaneamente eventos de dispersão a longa distancia, como os que ocorreriam esporadicamente pela dispersão aérea ou por agentes humanos.

Os resultados são coerentes com a dispersão real que a *Monilia* apresentou na América Central, conforme pode ser observado no gráficos da Figura 57.

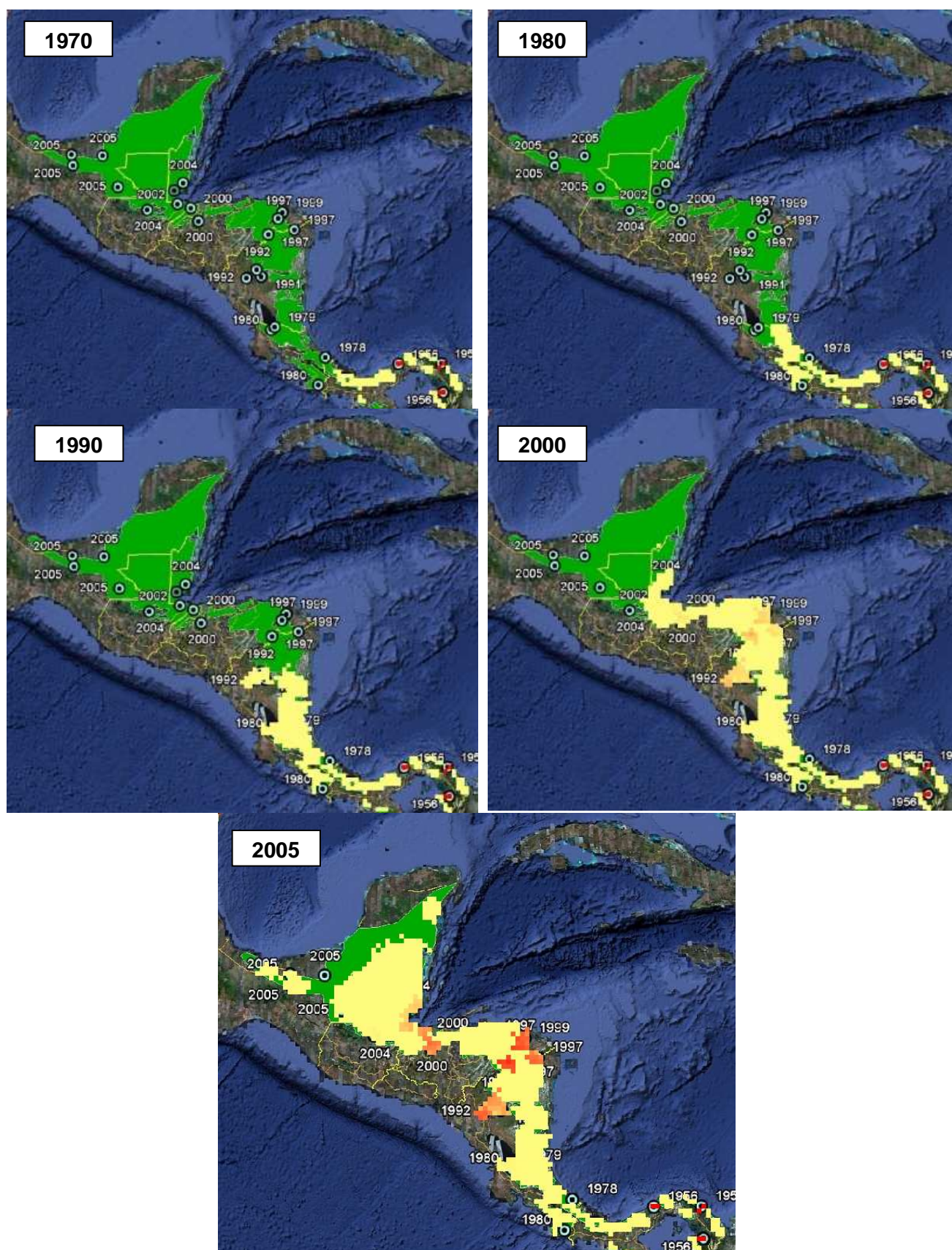


Figura 57. Resultados da simulação da dispersão da Monilia na América Central de 1956 a 2005. Os resultados mostram a área de ocupação da Monilia em 1970, 1980, 1990, 2000 e 2005, conforme indicado na figuras. Áreas em verde representam florestas com ocorrência de cacau em baixa densidade. Pontos representam áreas comerciais de cacau e as datas o ano de ocorrência da Monilia em cada localidade. Os resultados simulados são representados pelas áreas em escala de cor amarela/vermelha.

Peru

Foram utilizados também, na avaliação do modelo, dados da dispersão da Monilia no peru de Rios-Ruiz (2004), conforme Figura 58.

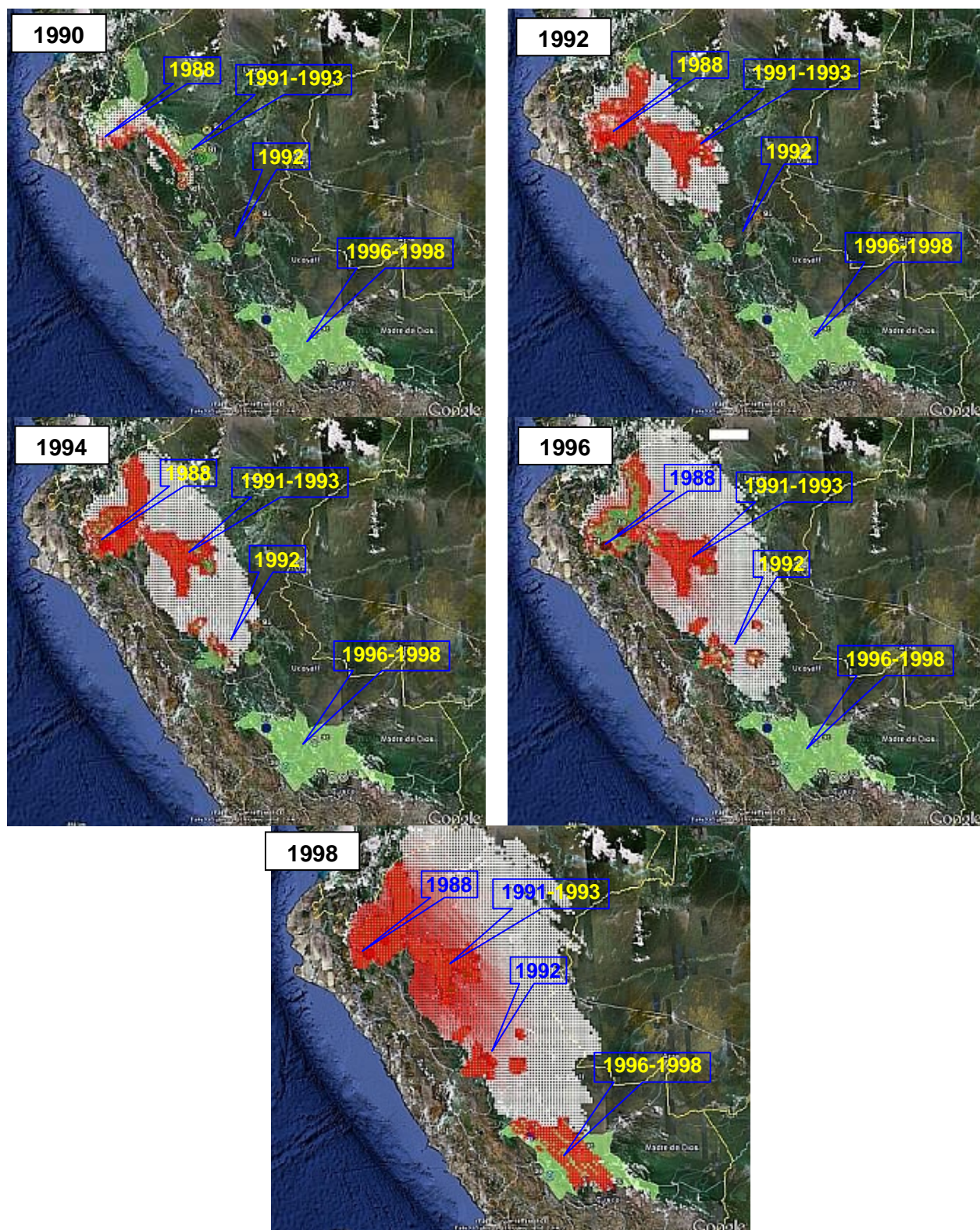


Figura 58. Resultados da simulação da dispersão da Monilia no Peru de 1988 a 1998. A figura superior esquerda mostra os anos de ocorrência em cada área. Os resultados apresentam a área de ocupação da Monilia em 1990, 1992, 1994, 1996 e 1998, conforme indicado na figuras. Áreas em verde representam florestas com ocorrência de cacao cultivado. Pontos representam áreas comerciais de cacao nos respectivos anos de ocorrência da Monilia em cada localidade. Os resultados simulados são representados pelas áreas em escala de cor branca/vermelha que indica a intensidade da doença em cada célula.

Neste caso a área simulada tem 1500 km de lado sendo a matriz de simulação de 150 x 150 0 que corresponde a células com lado de 10 km. Também neste caso foi utilizada a distribuição de Pareto, com parâmetro de forma de 3.8 e de escala de 62. Considerou-se, nesta simulação o efeito dos ventos predominantes que tem direção de 139°. Os resultados simulados reproduzem razoavelmente a evolução da distribuição da Monilia no Peru. Deve ser observado que mesmo que exista somente um planta infectada em uma célula a Monilia é mostrada como presente e representada pela célula em cor branca

Gradiente da doença

Nesta seção comparou-se os resultados obtidos por Ran (1989), que avaliou o gradiente da doença até 45 metros da fonte de inóculo, com resultados de simulação realizada para este fim. A grade da simulação foi de 33 x 33 células, cada célula representando uma planta em espaçamento 3 x 3 m, com 25 frutos, correspondendo a janela de simulação um hectare. Para geração das distancias de dispersão utilizou-se a distribuição de Weibull, com parâmetro de escala de 0.18 e de forma 3.81. Os resultados na janela da grade são mostradas na Figura 59A.

Os resultados obtidos nas simulações foram bastante semelhantes aos resultados reais, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 59B.

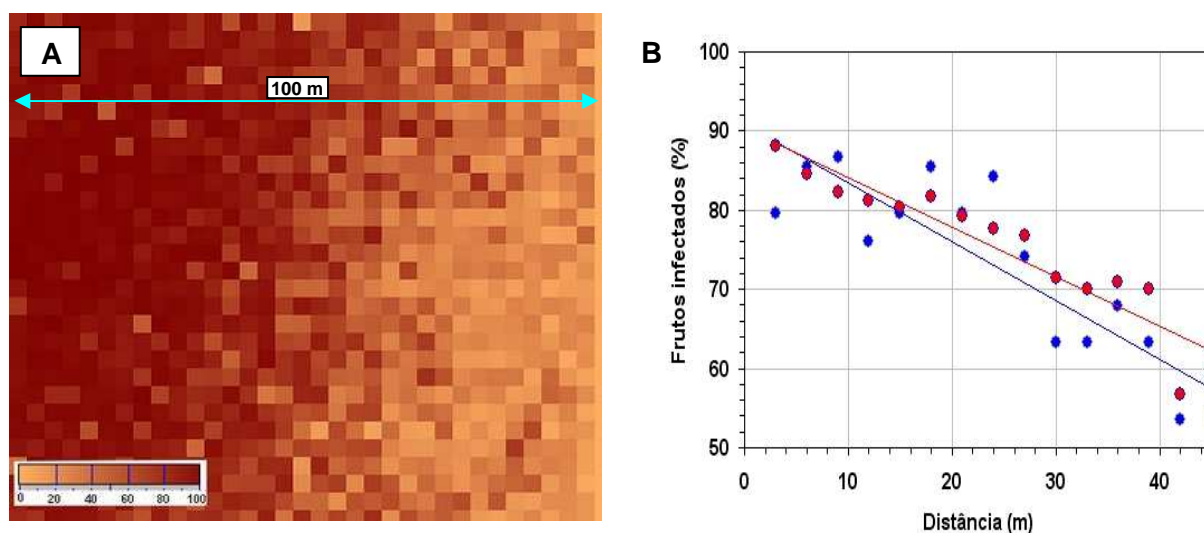


Figura 59. A. Resultados gráficos de uma simulação para calculo do gradiente da Monilia. Cada célula representa uma planta com 25 frutos e a escala em cores representa a percentagem de frutos infectados por planta; B. Gradiente da dispersão da Monilia. Os pontos e linha vermelha correspondem aos resultados experimentais de Ran (1989); os pontos e a linha azul são referentes a média de simulações realizadas, utilizando-se os parâmetros descritos no texto.

Conclui-se que apesar de não ter sido realizada a validação formal do sistema de simulação os resultados simulados são semelhantes aos resultados reais e, uma vez estabelecidos os parâmetros e a distribuição conveniente para simulação, os resultados obtidos poderão ser indicativos dos resultados reais esperados em diferentes situações.

9.4. Simulações

Para investigar possíveis fatores que possam afetar a velocidade e padrão de disseminação da Monilia foram realizadas diversas simulações alterando-se os valores dos vários parâmetros do modelo. Uma vez que o modelo não foi validado ainda os resultados não são conclusivos e devem ser considerados somente como tendência de comportamento da doença e como exemplos de utilização do programa MDM.

9.4.1 Densidade de Hospedeiro

Para se avaliar o efeito da densidade de cacau na dispersão da Monilia realizaram-se simulações considerando-se densidades de 600, 300 150 e 50 plantas por hectare. Utilizou-se a distribuição Uniforme para a geração das distancias sendo os resultados apresentados nas Figuras 60 e 61.

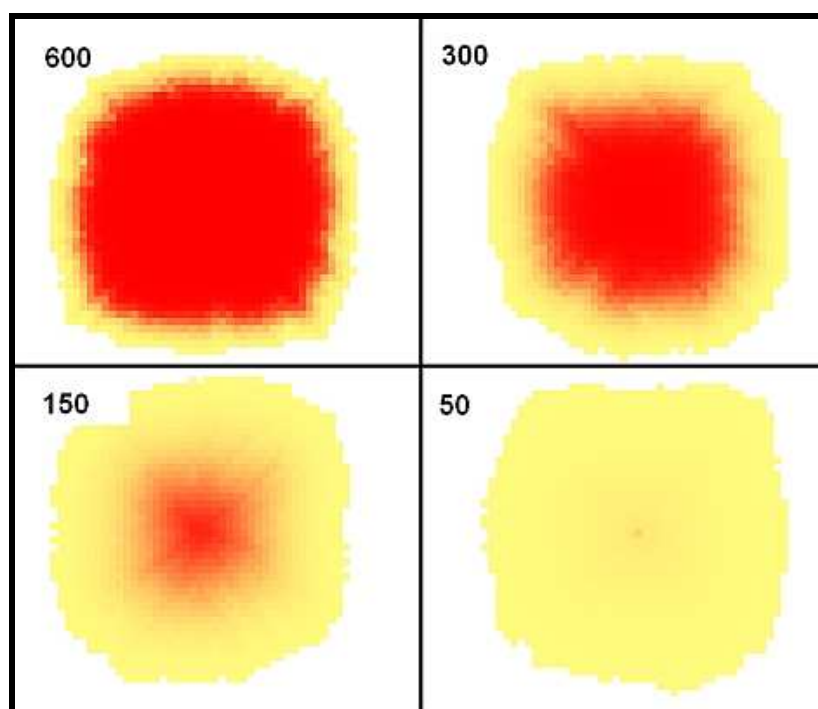


Figura 60. Padrão de disseminação da Monilia em diferentes densidades de plantas (600, 300, 150 e 50 plantas por hectare) conforme indicado nas figuras.

Pode ser observado que a área de distribuição da monilia (incidência) parece não ser influenciada pela densidade de hospedeiros mas a intensidade da doença (% frutos infectados), conforme representada pela escala de cor na Figura 59 é reduzida quando a densidade de plantas de cacau é menor. Essas observações são confirmadas pelos gráficos da Figura 61 que representam a evolução da doença (incidência e intensidade) no tempo, nas quatro densidades de hospedeiro consideradas.

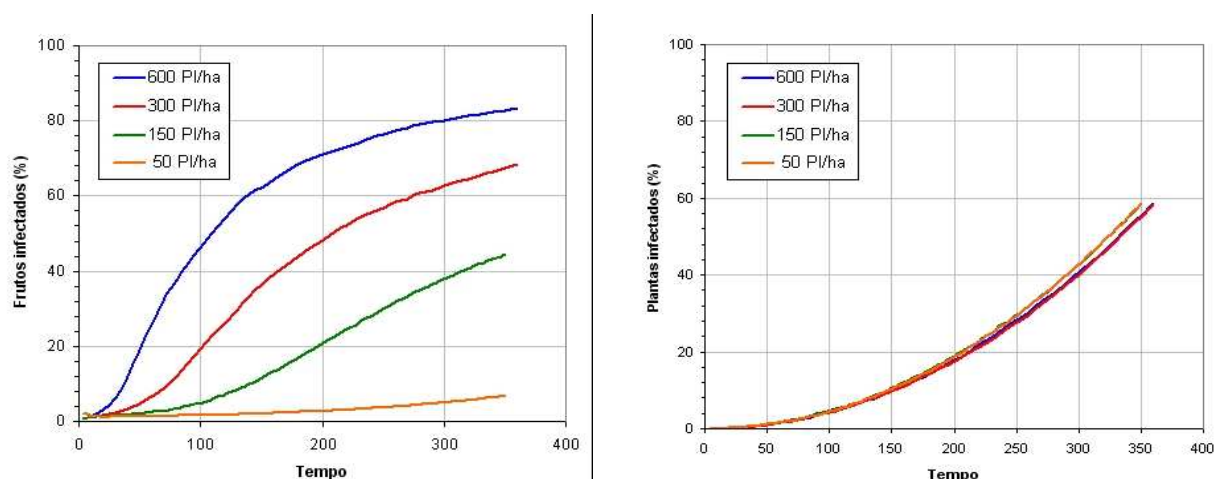


Figura 61. Simulação da evolução intensidade e incidência da Monilia, respectivamente nas figuras da esquerda e direita, em quatro diferentes densidades de hospedeiro.

Os resultados obtidos são os esperados para doenças policíclicas, pois quando maior for o numero de hospedeiros maior será a quantidade de inóculo produzido e maior também será a intensidade da enfermidade, conforme discutido por Batista (2006).

9.4.2 Intensidade do foco inicial

Para se avaliar o efeito da intensidade de inoculo inicial no progresso da Monilia realizou simulações considerando-se uma área de 1000 hectares, em matriz de 285 x 285 equivalendo, portanto, cada célula a uma planta (3.5 x 3.5m).

Foram realizadas simulações por dois anos, estabelecendo-se uma taxa de dispersão de 50 metros por ano, utilizando-se a distribuição uniforme para geração de números ao acaso. As simulações foram realizadas considerando-se 1, 10, 50 e 100 plantas infectadas com um frutos infectado por planta no início da simulação.

Os resultados são apresentados na Figura 62.

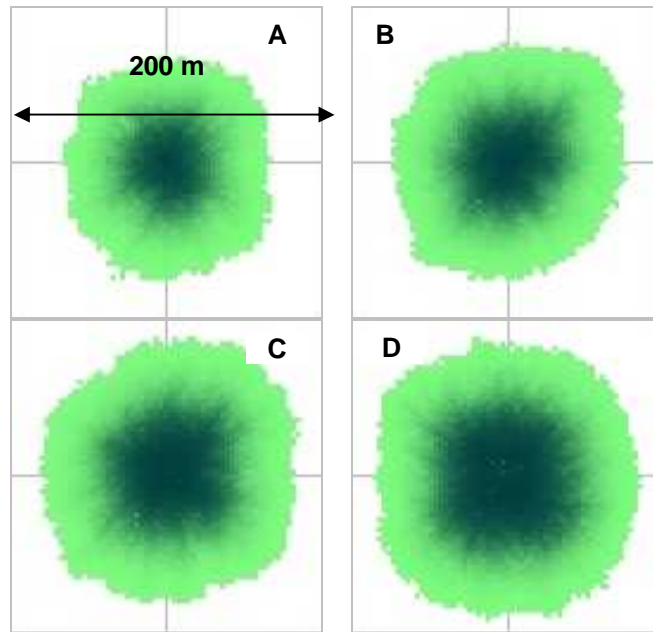


Figura 62. Disseminação da Monilia, após dois anos, assumindo um coeficiente de dispersão de 50 metros/ano utilizando-se a distribuição uniforme e taxa de infecção 0.2. Inoculo inicial correspondente a: A -1 planta infectada; B - 10 plantas infectadas; C - 50 plantas infectadas e D – 100 plantas infectadas

Estes resultados são coerentes com os resultados obtidos por Ran (1989), conforme comparações feitas entre as Figuras 63 A e B.

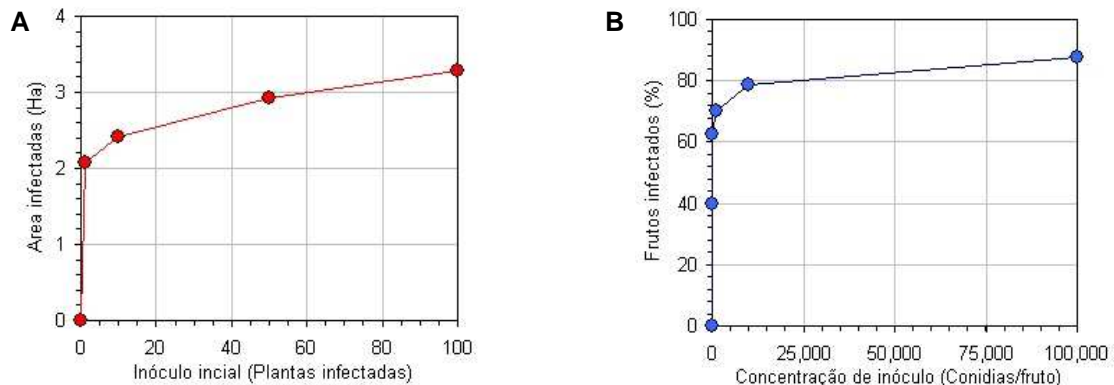


Figura 63. A – Relação entre área infectada e inoculo inicial, conforme resultados da simulação apresentada na Figura 62. B – Relação entre a percentagem de frutos infectados e a concentração de inoculo utilizada para infectar os frutos, segundo Ran, 1989.

Verifica-se que a forma assintótica das relações entre inoculo inicial e progresso da doença é bastante semelhante nos dois casos, apresentando um crescimento mais acentuado no início e então tendendo a estabilizar-se para valores mais elevados do inoculo inicial. Resultados similares foram observados por outros autores para outras doenças, conforme Araujo et all. (2006) e Miranda Filho (2006), por exemplo.

9.4.3 Agentes de dispersão

O efeito de possíveis agentes (vetores) na disseminação da *Monilia* foi investigado através da utilização das diferentes distribuições estatísticas associadas a diferentes parâmetros para geração dos padrões de disseminação. As linhas nas Figuras 64 a 66 não representam as trajetórias do inóculo, mas sim a planta de origem do inóculo no início da linha e a planta que foi infectada na extremidade distal, não significando, portanto, que a trajetória do vetor/inóculo foi reta. A área nestas figuras representa 10 hectares e a grade em cinza possui 32 m de lado.

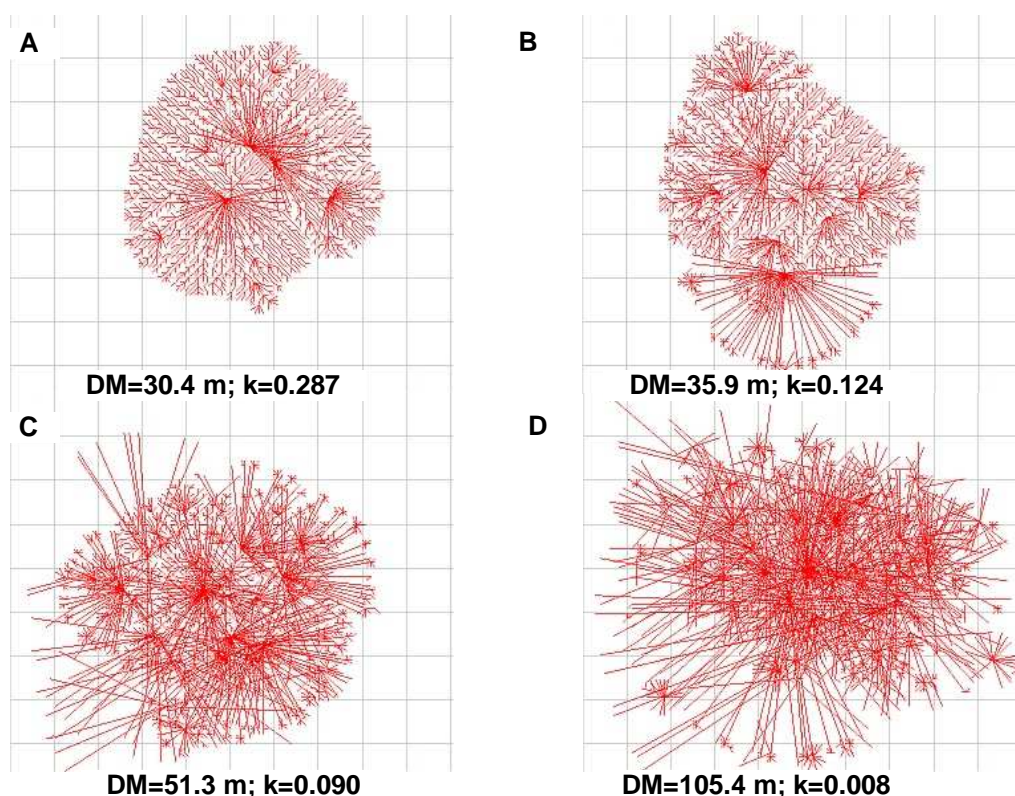


Figura 64. Padrões de disseminação gerados a partir da distribuição de Pareto com parâmetro $x_m = 0.015$ e parâmetro de forma com valores: A - 2.0; B - 1.8; C - 1.5; D - 1.2. DM é a distância média de disseminação em cada interação e k é o índice de agregação.

A Figura 64 apresenta os padrões de disseminação da *Monilia*, gerado através da distribuição da Pareto com parâmetro x_m igual a 0.015 e k variando de 1.2 até 2, conforme especificado na legenda da figura.

Cada simulação foi executada até que a área infectada correspondesse aproximadamente a dois hectares.

Em cada simulação foi anotada a distância média de dispersão (média das distâncias geradas pelo modelo em cada interação de tempo, para cada célula da matriz) e o índice de agregação k_{dbn} , calculado conforme a equação 13.

De modo similar a Figura 65 apresenta os padrões de disseminação espacial obtidos com a utilização da distribuição uniforme, variando-se a média da distribuição de 0.05 a 0.5, conforme legenda da figura.

De mesma forma a Figura 66 apresenta as informações referentes a utilização da distribuição lognormal, variando-se o desvio padrão da distribuição, conforme legenda da figura.

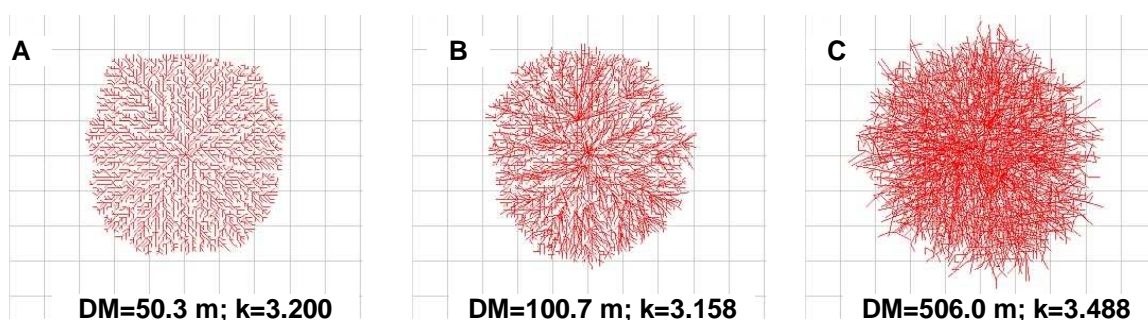


Figura 65. Padrões de disseminação gerados a partir da distribuição Uniforme com média com valores: A - 0.05; B - 0.1; C - 0.5

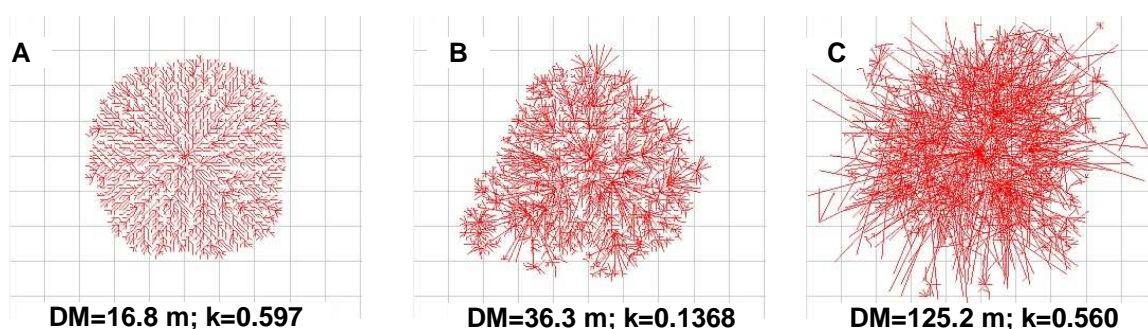


Figura 66. Padrões de disseminação gerados a partir da distribuição Lognormal com média igual a 0.015 e desvio padrão com valores: A - 1.0; B - 1.5; C - 2

Mamíferos

O trabalho de Pütker et al (2006) apresenta resultados referentes aos movimentos de sete mamíferos, quatro roedores e dois marsupiais, em áreas de mata Atlântica do estado de São Paulo. Os dados apresentados pelos autores referem-se a distância média percorrida pelos animais e a distribuição de frequência das distâncias e permitem comparações diretas com os resultados simulados e inferências quanto ao padrão espacial da disseminação da *Monilia*, se executada por estes agentes.

A Figura 67 mostra os padrões de movimentação do roedor *Akodon montensis* e a disseminação da *Monilia* que resultaria desta movimentação. Embora esta espécie pareça ocorrer no sudeste e sul do Brasil outras espécies do mesmo gênero, como *A. cursor*, por exemplo, possuem hábitos similares e ocorrem em regiões do Brasil onde cacau é cultivado. A distribuição que gerou resultados mais próximos dos reais foi a de Pareto com parâmetros 0.01 e 1.5. A Figura 67 A e B compara a distribuição de frequência real com simulada. Pode ser verificado que os resultados são semelhantes. Embora não correspondam com exatidão poderia ser esperado que o padrão de movimentação deste roedor fosse semelhante ao ilustrado na Figura 67 C, o que resultaria, se este animal fosse agente de dispersão da *Monilia*, em um padrão espacial de infecção conforme representado na Figura 67 D.

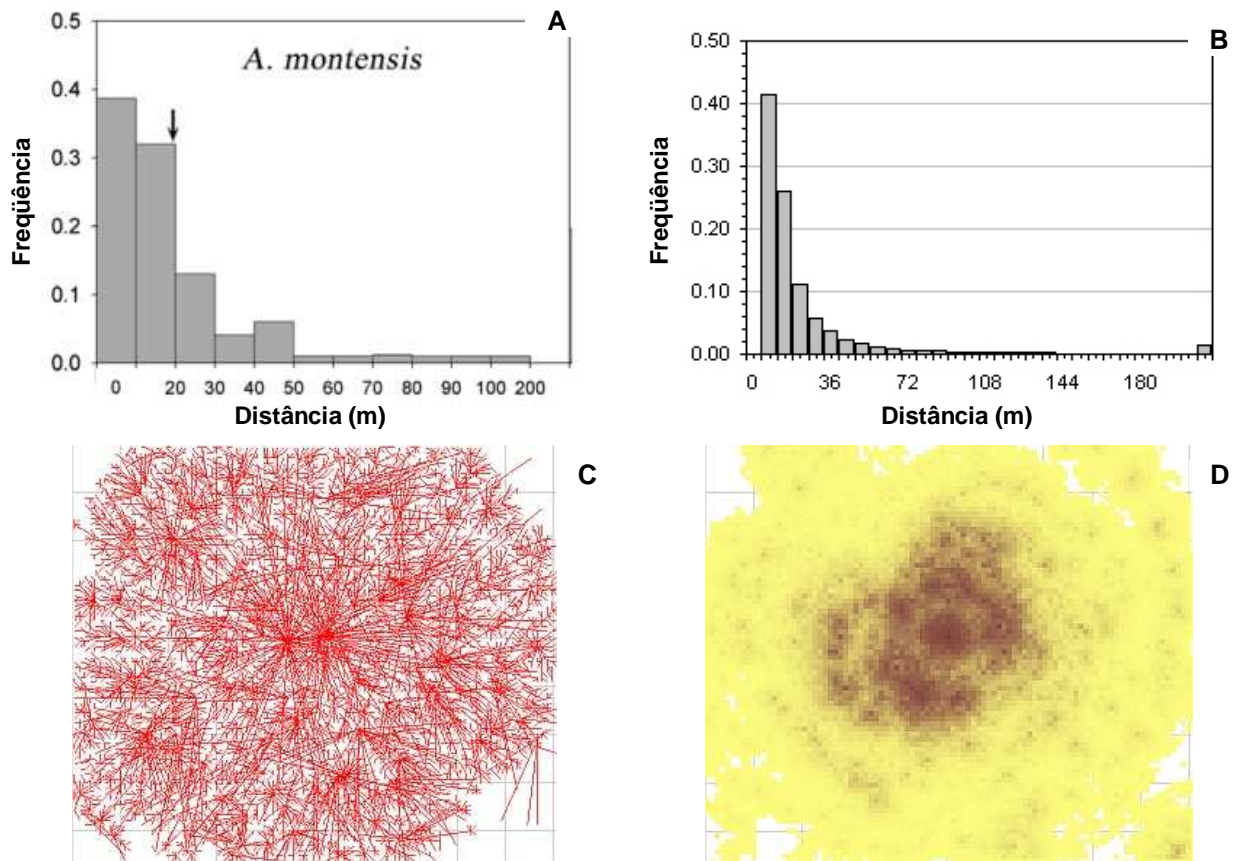


Figura 67. Padrões de movimento do roedor *Akodon montensis* e disseminação da *Monilia* que poderia ser resultante de sua movimentação. A – Distribuição de freqüências das distancias do movimento conforme Pütker et alli (2006), B – Distribuição de freqüências das distancias simulada (distribuição de Pareto com parâmetros 0.01 e 1.5); C – Caminhos resultantes e D – Densidade de infecção por *Monilia*.

A Figura 68 mostra os padrões de movimentação do marsupial *Marmosops incanus* a disseminação da *Monilia* que resultaria desta movimentação. Este marsupial possui ampla distribuição geográfica, sendo encontrado em florestas úmidas de planície e semidecíduais. É onívoro, mas alimenta-se predominantemente de frutos e artrópodes. Seus hábitos são escansoriais: move-se cerca de 70% do tempo no chão da mata, embora use o sub-bosque com freqüência (Papi ET alli.,2007).

A Figura 68 A e B compara a distribuição de freqüência real com simulada. A distribuição que gerou resultados mais próximos dos reais foi a de Weibull com parâmetros de escala e forma iguais a 0.042 e 1.4 respectivamente. Pode ser verificado que os resultados são semelhantes. Embora não correspondam com exatidão poderia ser esperado que o padrão de movimentação deste roedor fosse semelhante ao ilustrado na Figura 68 C, o que resultaria, se este animal fosse agente de dispersão da *Monilia*, em um padrão espacial de infecção conforme representado na Figura 68 D.

Análise semelhante poderia ser desenvolvida igualmente para as demais espécies estudadas por Pütker et all (2006), bem como com demais tipos de vetores, como pássaros, artrópodes e mesmo agentes humanos.

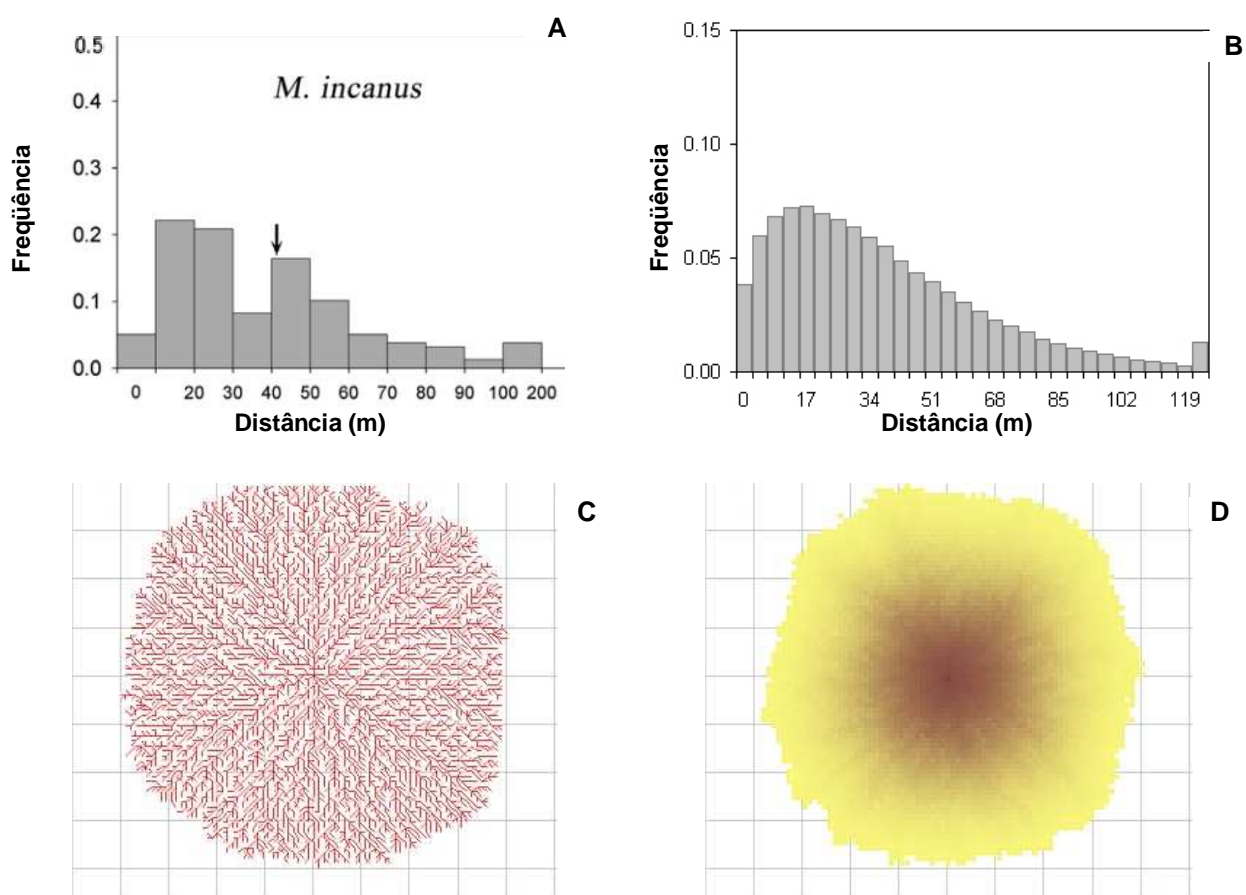


Figura 68. Padrões de movimento do roedor *Marmosops incanus* e a disseminação da Monilia que poderia ser resultante de sua movimentação. A – Distribuição de freqüências das distancias do movimento conforme Pütker et alli (2006), B – Distribuição de freqüências das distancias simulada (distribuição de Weibull com parâmetros 0.042 e 1.4); C – Caminhos resultantes e D – Densidade de infecção por Monilia.

9.4.4. Barreiras

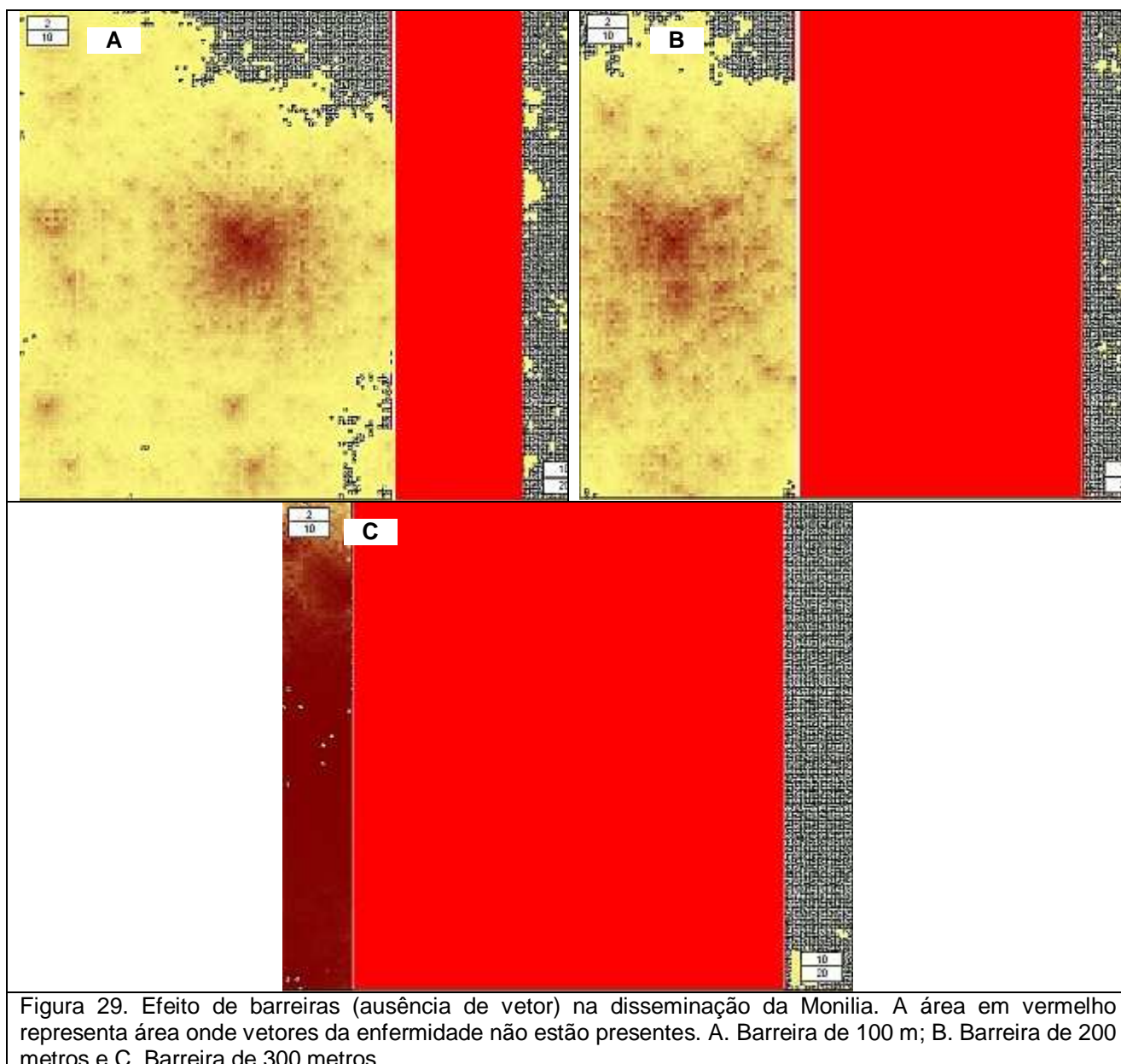
Outra aplicação do modelo refere-se à avaliação da eficácia de barreiras, formadas pela ausência de hospedeiros, para a contenção da Monilia.

A Figura 29 apresenta resultados de simulações realizadas para averiguar, teoricamente, o efeito de faixas, de diferentes larguras, com ausência do hospedeiro, na disseminação em curto prazo de Monilia. As simulações foram realizadas considerando-se uma área de 16 hectares com 600 plantas por hectare e faixas com ausência de hospedeiros de 100, 200 e 300 metros. Utilizou-se para estas simulações a distribuição de Pareto, com parâmetros de 0.05 e 1.2. Esta distribuição com os parâmetros escolhidos gera disseminação instantânea media de 26 metros para simular a presença de vetores mas também contempla disseminação aérea por ventos que, nas simulações realizadas atingiu a mais de 30km, embora com uma freqüência muito baixa.

Os pontos coloridos representam plantas infectadas e cores mais escuras representam maior intensidade de infecção na planta. As áreas em vermelho representam as faixas com ausência do hospedeiro.

Nas simulações a Monilia atravessa as barreiras de 100, 200 e 300 metros em cerca de um, um e meio e quatro anos respectivamente, em média. Essa técnica de contenção só poderia, portanto, retardar a disseminação da doença temporariamente.

No entanto também neste caso os resultados só serão conclusivos quando forem disponíveis os parâmetros reais de dispersão da enfermidade.



AGRADECIMENTOS

Agradecemos a CEPLAC e a ESALQ/USP pela oportunidade de desenvolver este trabalho. Agradecemos igualmente ao CNPq pela bolsa concedida no primeiro ano.

Agradecemos aos docentes e discentes do Dept. de Fitopatologia da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz ESALQ/USP, pela agradável convivência durante os dois anos de nossa permanência na instituição.

Agradecemos especialmente aos Prof.Drs. Armando Bergamin Filho e Lílian Amorim pelo apoio, orientação e auxílio prestado. Agradecemos igual mente ao Prof. Bernhard Hau, da Universidade de Hannover pela

Bibliografia

- Araújo, D.V., Pozza, E.A., Machado, J.C., Zambenedetti, E.B., Carvalho, E.M. e Celano, F.A.O. 2006. Relação entre níveis de inóculo de *Colletotrichum gossypii* var. *cephalosporioides* nas sementes e o progresso da ramulose do algodoeiro. *Fitopatologia Brasileira* 31:147-151.
- Aylor, D.E. e Flesch, T.K. 2001. Estimating spore release rates using a Lagrangian stochastic simulation model. *Journal of Applied Meteorology*, 40: 1196–1208.
- Batista, D.C. 2006. Dinâmica de inóculo da *Alternaria solani*, efeito da densidade de plantio na intensidade da pinta preta e requeima e previsão destas doenças em tomateiro e batateiro. *Tese apresentada a UFV para obtenção do título de Doutor*. Viçosa, Brasil. 106 pp.
- Brown, J.K.M. and Hovmoller, M.S. 2002. Aerial dispersal of pathogens on the global and continental scales and its impact on plant disease. *Science*, 297: 537–541.
- Burrows, F.M. 1986. The aerial motion of seeds, fruits, spores and pollen. In.: D.R. Murray, ed. *Seed dispersal*. Academic Press, Sydney, pp. 1–47.
- Campbell, I.D., McDonald, K., Flannigan, M.D. and Kringayark, J. 1999. Long-distance transport of pollen into the Arctic. *Nature*, 399: 29–30.
- De Jong, M.D., D.E. Aylor and G.W. Bourdot. 1999. A methodology for risk analysis of plurivorous fungi in biological weed control: *Sclerotinia sclerotiorum* as a model; *BioControl* 43: 397–419
- Draxler, R.R., and G.D. Hess, 1997, Description of the Hysplit_4 modeling system, *NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224*, December, 24p.
- Draxler, R.R., and G.D. Hess, 1998, An overview of the Hysplit_4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition, *Australian Meteorological Magazine*, 47: 295-308.
- ELLIOTT, J. M. 1979. Some methods for the statistical analysis of sample benthic invertebrates. 2nd ed. *Ambleside: Freshwater Biological Association*. 157p.
- Evans, H. V., D. F. Edwards, et al. 1977. Research on cocoa diseases in Ecuador: past and present. *PANS* 23: 66-80.
- Evans, H.C., J.A.Stalper, R.A.Samson e G.L.Benny. 1978. On the taxonomy of *Monilia roreri*, an important pathogen of *Theobroma cacao* in South America. *Canadian Journal of Botany*, 56: 2528-2532
- Evans, H. C. 1981. Pod rot of cocoa caused by *Moniliophthora roreri* (*Monilia*) *roreri*. *Phytopathological Papers. Commonwealth Mycological Institute, Kew, UK*. 24: 44.
- Evans, H.C. 1986. A reassessment of *Moniliophthora* (*Monilia*) pod rot of cocoa. *Cocoa Grower's Bulletin* 37: 34-43
- Evans, H.C., K.A. Colmes, W. Phillips, e M.J. Wilhinson. 2002. What's in the name: *Crinipellis*, the final resting place for the frosty pod rot pathogen of cocoa? *Mycologist* 16: 1-4
- Evans, H.C. 2002. Invasive neotropical pathogens of tree crops. In Walting, R, Frankland, J.C., Ainsworth, A.M., Isaac, S. and Robinson, C.H. eds. *Tropical Mycology. Micromycetes*, 2:83-112
- Filipe, J A N and Maule, M M. 2004. Effects of dispersal mechanisms on spatio-temporal development of epidemics. *J Theor Biol.* 226(2): 125-41 – http://www.find-health-articles.com/rec_pub_14643183-effects-dispersal-mechanisms-spatio-temporal-development-epidemics.htm
- Formenti, P., M. O. Andreae, J. Cafmeyer, W. Maenhaut, B. N. Holben, L. Lange, G. Roberts, P. Artaxo, and J. Lelieveld. 2001. Saharan dust in Brazil and Suriname during the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA) - Cooperative LBA Regional Experiment (CLAIRE) in March 1998, *J. Geophys. Res.*, (106):14, 14.919–14.934,
- Forrester, J.W. 1961. Industrial dynamics. Cambridge, Massachusetts, *The MIT Press*, 1v.
- Fulton, R. H. 1989. The Cacao Disease Trilogy: Black Pod, Monilia Pod Rot, and Witches'-Broom. *Plant Disease* 73(7): 601-603.

- Garner, MG & Cannon, RM 1995. Potential for wind-borne spread of Foot-and-Mouth Disease virus in Australia: a report prepared for the Australian Meat Research Corporation, *Bureau of Resource Sciences*, Canberra. 88 p.
- Gierke, J. S. 2002. River Velocity, Michigan Technological University, *Department of Geological and Mining Engineering and Sciences*, 6.
- Gregory, P.H. 1945. The dispersion of air-borne spores. *Trans. Brit. Mycol. Soc.* 28:26-72
- Gregory PH (1961) The Microbiology of the Atmosphere. *Leonard Hill*, London, 377 pp.
- Hernández TA, Aranzazu HF, Arévalo E, Ríos RR. 1990. La moniliasis del cacao en el Perú. *Agrotrópica* 2, 56–8.
- Holmes, N.S. and L. Morawska. 2006. A review of dispersion modeling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. *Atmospheric Environment* 40: 5902–5928,
- Isard, S., C. Main, T. Keever, R. Magarey, S. Redlin, J. Russo. 2004. Weather-Based Assessment of Soybean Rust Threat to North America - Final Report to APHIS, http://www.aphis.usda.gov/plant_health/plant_pest_info/soybean_rust/downloads/sbrfinal15july.pdf
- Isard, S.A., Gage, S.H., Comtois, P. & Russo, J.M. 2005. Principles of the Atmospheric Pathway for Invasive Species Applied to Soybean Rust. *Bioscience* 55: 851-861.
- Kaj, I and R. Gaigalas. 2005. Stochastic simulation using MATLAB: Random numbers from simple distributions. Consultado em 20/01/2009. <http://www.math.uu.se/research/telecom/software/stprobdist.html>
- Kalnay et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437-470,
- Kleczkowski A., C. A. Gilligan, and D. J. Bailey. 1997. Scaling and spatial dynamics in plant-pathogen systems: from individuals to populations. *Proc Biol Sci.* 264(1384): 979–984. <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1688553>
- Leach, A. W., J. D. Mumford, et al. 2002. Modelling Moniliophthora roleri in Costa Rica. *Crop Protection* 21(4): 316-26.
- Lee, L.Y.L., Kwok, R.C.W., Cheung, Y.P., Yu, K.N., 2004. Analyses of airborne ⁷Be Concentrations in Hong Kong Using Back Trajectories, *Atmospheric Environment*, 38: 7033-7040
- Leopold, L.B. M. G. W. 1960. River Meanders. *Geological Society of America Bulletin* 71: 769-794.
- Mahura, A., Korsholm, Baklanov, Rasmussen, 2007. Elevated birch pollen episodes in Denmark: contributions from remote sources. *Aerobiologia*, 23: 171-179.
- Main, C.E., Keever, T., R.F. Koenning and R. Magarey. 2005. Predicting the 2005 Soybean Rust Epidemic: Methods and Results from the NAPDFC. Proceedings of the National Soybean Rust Symposium. 14-16 de Novembro de 2005, Nashville, Tennessee.: <http://www.plantmanagementnetwork.org/infocenter/topic/soybeanrust/symposium/presentations/Keever.pdf>
- Martins, M. L., G. Ceotto, S. G. Alves, C. C. B. Bufon, and J. M. Silva. 2000. Cellular automata model for citrus variegated chlorosis. *Phys. Rev.* 62: 7024-7030. http://prola.aps.org/abstract/PRE/v62/i5/p7024_1
- Miranda Filho, R.J. 2006. Perda de produtividade em feijoeiro comum cultivar pérola causada por *Curtobacterium flaccumfaciens* pv. *Flaccumfaciens*. *Dissertação. Universidade de Brasília*, Instituto de Ciências Biológicas, Departamento de Fitopatologia. Orientador: Carlos Hidemi Uesugi. Data da defesa: 06/04/2006
- Nagarajan, S. and D. V. Singh. 1990. Long-Distance Dispersion of Rust Pathogens. *Annu. Rev. Phytopathol.* 28:139-53
- Nicks, A.D. and J.F. Harp. 1980. Stochastic Generation of Temperature and Solar Radiation Data. *Journal of Hydrology*, 48: 1-17
- Pan, Z., E Del Ponte, L Xue, X Li, D Andrade, R.Pasken and X.B.Yang. 2005. Soybean Rust Dispersal Prediction and Analyses in the US for the 2005 Growing Season. Proceedings of the National Soybean Rust Symposium. 14-16 de Novembro de 2005, Nashville, Tennessee.: <http://www.plantmanagementnetwork.org/infocenter/topic/soybeanrust/symposium/presentations/Pan.pdf>

- Papi, B., P. Ferreira, D. Loretto e M.V. Vieira. 2007. Habitat do entorno de ninhos artificiais e naturais do marsupial *Marmosops incanus* (Didelphimorphia: Didelphidae). *Anais do VIII Congresso de Ecologia do Brasil*, 23 a 28 de Setembro de 2007, Caxambu - MG
- Pasquill, F., 1961. The estimation of the dispersion of windborne material. *Meteorology Magazine* 90(1063): 33–40.
- Pereira, J. L., L. C. C. de Almeida and S. M. Santos. 1996. Witches' broom disease of cocoa in Bahia: attempts at eradication and containment. *Crop Protection*, 15(8): 743-752
- Phillips-Mora, W., C. O., and C. A. Ortiz. 2006. Fifty Years of Frosty Pod Rot in Central America: Chronology of its Spread and Impact from Panama to Mexico. 15th *International Cocoa Research Conference*, San José Costa Rica, October 2006
- Porras V. H., I. D. 1997. Informe de rastreo de la moniliasis del cacao en la zona de la Mosquitia Nicaragüense y Hondureña. Honduras, *APROCACAO/MOPAWI/Pro Mundo Humano*: 7.
- Porras, V.H. e G. Enríquez. 1998. Spread of monilia pod rot of cocoa through Central America. IICA, San José, Costa Rica. 20 p.
- Püttker, T., Meyer-Lucht, Y. and Sommer, S. 2006. Movement distances of five rodent and two marsupial species in forest fragments of the coastal Atlantic rainforest, Brazil. *Ecotropica* 12: 131–139.
- Ran, A., R.R. Valle e E.A. Gardini. 2004. Monília do Cacaueiro. *Fundação Cargill, São Paulo*. 36 pp.
- Rios-Ruiz, R.A. 2004. Epidemiologia e Manejo da Monilíase do Cacaueiro no Peru. 80 f. *Tese de Doutorado Universidade Federal de Viçosa*.
- Ristaino, J.B., R.P. Larkin and C.L. Campbell. 1993. Spatial and Temporal Dynamics of *Phytophthora* Epidemics in Commercial Bell Pepper. *Phytopatology*, 83(12): 1311-1320
- Roebuck, L.W. N. M. F., Thomas C. Webster, Alberto Montes de Oca, Amy Harlan 2004. Water resource assessment of Bolivia, U.S. Army Corps of Engineers Mobile District and the Topographic Engineering Center: 75.
- SENAMHI/IRD 2005. HyBAm - Reportes de las campañas de aforo en territorio Peruano, SENAMHI-Peru.
- Schrodter, H., 1960. Dispersal in air and water-the flight and landing. In, *Plant pathology, an advanced treatise*, in: J.G. Horsfall and A.E. Dimond, Plant Pathology III. Academic Press, New York, pp. 169-227.
- Schulze, K. 2005. Simulating river flow velocity on global scale. *Advances in Geosciences* 5: 133-136.
- Sgrillo, R. B. e Araújo, K. R. P. 1994. Modelo para simulação da evolução da Vassoura de Bruxa na Bahia. *Agrotropica*, Ilhéus, BA, 6(3): 73-84.
- Sgrillo, R. B. e Sgrillo, K.R.P. de Araújo. 2004. Modelo para simulação da evolução da vassoura-de-bruxa do cacaueiro na Bahia: Validação do modelo. *Agrotropica*, Ilhéus, 15(1): 25-32.
- Spijkerboer, H.P., J.E. Beniers, D. Jaspers, H.J. Schouten, J. Goudriaan, R. Rabbinge and W. van der Werf. 2002. Ability of the Gaussian plume model to predict and describe spore dispersal over a potato crop. *Ecological Modelling* 155: 1–18,
- Tesmer, J and M. Schnittler. 2007. Sedimentation velocity of myxomycete spores. *Mycological Progress*, 6(4): 229-234.
- Toledo, F.R., J.C. Barbosa e P.T. Yamamoto. 2006. Distribuição espacial de *Toxoptera citricida* (kirkaldy) (Hemiptera: Aphididae) na cultura de citros. *Rev. Bras. Frutic*, Jaboticabal - SP, 28(2): 194-198
- USBR. 1997. Water measurement manual. Highlands Ranch, CO, USBR *United States Bureau of Reclamation*
- Van der Plank, J. E. 1965. Dynamics of plant disease. *Science* 147:120-24
- Ventana. 2003. Vensim software. Linking systems thinking to powerful dynamic models. <http://www.vensim.com/software.htm>
- Waggoner, P.E. 1965 Microclimate and Plant Disease. *Annu. Rev. Phytopathol.* 1965. 3:103-126
- Williams, E. 2008. Aviation Formulary V1.43. <http://williams.best.vwh.net/avform.htm>

Wilks, D.S. 1999. Simultaneous stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation at multiple sites in complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* 96: 85-101

Wittwer, J.W. 2004. Generating Random Numbers in Excel for Monte Carlo Simulation. Consultado em 2/4/2009. <http://www.vertex42.com/ExcelArticles/mc/GeneratingRandomInputs.html>

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.