

Modelagem estatística multivariada dos conceitos relacionados à Física Ambiental

Miguel Jorge Neto,^{1,*} Iramaia J. Cabral de Paulo,^{1,†} Sérgio Roberto de Paulo^{1,‡} e Carlo Ralph de Musis^{2,§}

¹Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Correa, SN, 78060-900, Cuiabá-MT

²Universidade de Cuiabá, Rua Manoel Fernandes Guimarães, 3100, 78056-900, Cuiabá-MT

O advento das mudanças climáticas globais provocou uma redefinição do escopo da Física Ambiental, enquanto domínio de conhecimentos. A partir de análise bibliográfica, entrevista com especialistas e análise léxica de resumos de teses e dissertações de um programa de Física Ambiental, este trabalho buscou um levantamento das origens, domínio conceitual e possível futuro para a Física Ambiental. Os resultados obtidos identificaram as Ciências Agrárias como origem dos métodos e princípios que a embasam, mas situaram qual o seu atual domínio de conceitos, bem como apontam a Teoria da Complexidade como sua referência básica futura.

I. INTRODUÇÃO

A preocupação crescente com o quadro de mudanças climáticas globais tem levado a uma reestruturação do direcionamento de pesquisas que se dedicam à aplicação de princípios físicos a temas do meio ambiente. Tal preocupação se evidencia na própria evolução dos relatórios do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*): segundo a apresentação do seu último relatório feito para a comunidade europeia em novembro de 2013 [1], em Bruxelas, o primeiro relatório (1990) apontou para a elevação da temperatura média da Terra “uniquivocal detection not likely for a decade”; o segundo (1995), “balance of evidence suggests discernible human influence”; o terceiro (2001), “most of the warming of the past 50 years is likely (odds 2 or 3) due to the human activities”; o quarto (2007), “most of the warming is very likely (odds 9 out of 10) due to greenhouse gases” e o quinto (2013), it is extremely likely (odds 95 out of 100) that human influence has been the dominant cause”.

Aliado às emissões crescentes de carbono está a ampliação de ações de mudança da ocupação do solo, com ecossistemas naturais dando espaço à agricultura e pecuária em expansão, fato este particularmente importante no caso do Brasil [2]. Possivelmente esses fatores foram determinantes para a criação, na CAPES, da área de Ciências Ambientais.

Esses fatos – ocorridos principalmente nas duas últimas décadas – remetem a uma redefinição do termo Física Ambiental (FA). Anteriormente a esse período, a Física aplicada ao meio ambiente estava voltada a questões como poluição sonora e atmosférica e, principalmente, à meteorologia, com especial atenção ao setor agrônômico. Contudo, no momento, uma ênfase importante, na Física Ambiental, se refere, conforme apontam os dados discutidos adiante, à micrometeorologia e ao estudo de ecossistemas como sistemas complexos.

Tal mudança, entretanto, é recente e há ainda muitos aspectos em aberto no que diz respeito à relação entre a Física, enquanto área de conhecimento, e as Ciências Ambientais. Por exemplo, quais enfoques devem ter essas investigações? Quais princípios e conceitos físicos devem ser privilegiados?

Qual é o papel da Física Ambiental? Seria ela o carro-chefe de um novo corpo de conhecimentos adequado ao estudo do ambiente natural? Descobrir como o grupo de indivíduos que compõem a academia representam aquilo que se denomina Física Ambiental é um passo necessário na busca pelas respostas a essas questões.

Foi objetivo deste trabalho investigar a estruturação da Física Ambiental enquanto corpo de conhecimento a partir de conceitos e representações oriundas da Academia. Para atingir esta meta foram desenvolvidas as seguintes investigações:

1. Buscar na literatura definições consensuais de Física Ambiental;
2. Identificar as concepções dos pesquisadores da área de Física Ambiental acerca desta;
3. A partir das produções de um programa de pós-graduação em Física Ambiental, delinear um grupo conceitual pertinente aos objetos de pesquisa dessa área.

II. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Análise documental

A busca por referências diretas ao termo “física ambiental” (ou “*environmental physics*” / “*física del medio ambiente*”) na base de dados Google Scholar retornou uma lista de resultados com hiperlinks para documentos em texto integral ou apenas resumos de artigos em periódicos, citações ou versões eletrônicas de livros parcialmente disponíveis para consulta online em serviço da mesma empresa (Google Books). A análise dos resultados apresentados mostrou que o tipo de documento que mais efetivamente se aproximava do contexto pesquisado era o formato livros.

Por sua vez, a ferramenta Google Books abriu nova perspectiva de análise sobre os resultados encontrados, uma vez que, dentre outras informações, apresenta os termos mais característicos, isto é, com maior frequência de ocorrência nesses textos, sob a forma de lista dinâmica de hiperlinks pesquisáveis estruturada em nuvem de palavras (uma forma sofisticada de apresentação gráfica das diferentes frequências dos elementos textuais presentes no texto). As palavras com maior ocorrência são apresentadas em tamanhos maiores no esquema gráfico.

As referências foram agrupadas aqui com suas respectivas

*mjoe3br@gmail.com

†ira@ufmt.br

‡sergioufmont@gmail.com

§carlo.demusis@gmail.com

nuvens de palavras, ordenadas pelo parâmetro número de citações, conforme exposto na tabela I.

Dentre as bibliografias mais citadas, destacam-se das demais a obra de Monteith & Unsworth, 2013 [3] (4272 citações), seguido por Campbell & Norman, 1998 [4] (2801 citações) e Hillel, 1998 [5] (com 2005 citações), respectivamente. A primeira inclusive serve de base para outras, sendo referência recorrente em alguns dos outros livros listados.

O conjunto dos termos em destaque nos três principais referentes foi utilizado para a elaboração de um arquivo comum, submetido a análise de frequências para a elaboração da nuvem de palavras a seguir (figura 1).

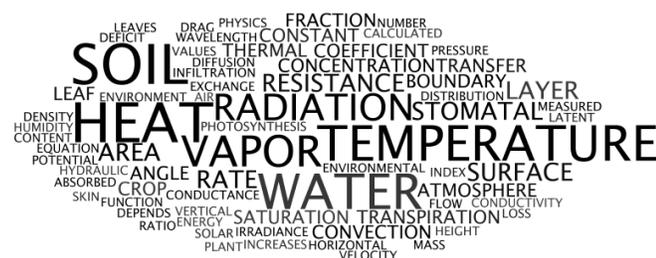


Figura 1: Nuvem de palavras para os referentes bibliográficos mais citados na base de dados *Google Scholar*.

Variáveis físicas, como o calor (heat) e a temperatura (temperature), mostraram-se tão recorrentes quanto os termos água (water) e solo (soil). Associados a esses, vemos emergir outros conceitos que permitem inferir o interesse pela relação entre elementos bióticos (plantas em especial), a propagação e disponibilidade de energia e características da atmosfera.

Sabe-se que, mesmo nos dias atuais, uma parte significativa dos métodos de análise de dados e instrumentos de medida utilizados por pesquisadores do meio-ambiente foram originalmente concebidos no contexto das ciências agrárias, como por exemplo, o método dos vórtices turbulentos (utilizado pelas medidas de fluxo de carbono e energia), a equação de Penman-Monteith (utilizada para se estimar a evapotranspiração) e o método de Bowen (para a estimativa da partição de energia no ar).

Evidentemente, as ciências agrárias se desenvolveram desde a Antiguidade, com o desenvolvimento da agricultura. Assim, naturalmente absorveu as características da ciência ao longo do tempo, desde o aristotelismo até o racionalismo cartesiano, que se firmou ao longo dos séculos XIX e XX. Como a Física é considerada uma das áreas de conhecimento de maior sucesso nesse período, pode-se observar com facilidade que as obras básicas que fundamentam o corpo de conhecimento das ciências agrárias está carregado com as leis básicas da Física.

Consequentemente, a pesquisa sobre a palavra-chave “Física Ambiental” indicou uma variedade de keywords/focos de interesse o que dificulta a delimitação de uma “Física Ambiental” enquanto ciência ou área científica, apontando para uma espécie de não-separabilidade com as ciências agrárias, quando a pesquisa está limitada à bibliografia básica utilizada nessas áreas de conhecimento.

Tabela I: Análise das referências relativas à busca por "física ambiental"/"environmental physics"/"física del medio ambiente" em base de dados da web.

Referência	Citações
<p>Termos e frases comuns indexadas pelo Google Books</p> <p>MONTEITH and UNSWORTH, 2013 [3] absorbed absorption aerodynamic aerosol air temperature angle animal assumed atmosphere boundary layer boundary layer resistance Bowen ratio calculated carbon dioxide cloudless coat components concentration constant crop cylinder decreases dened depends diameter diffusion drag coefficient eddy covariance emissivity energy environment environmental physics Equation es.T estimate exchange Figure foliage forest form drag fraction free convection gases gradient heat balance heat loss heat transfer heat ux height horizontal increases intercepted nuence Irradiance Journal laminar latent heat leaf area index leaves long-wave radiation mass transfer measurements metabolic Meteorology molecular molecules Monteith Nusselt number particles photosynthesis plane plant pores proportional radiative range ratio reected reaction coefficient reactivity relation Reynolds number Royal Meteorological Society saturation vapor pressure sensible heat skin soil solar radiation spectrum stomatal surface temperature thermal tion turbulent unit area ux density vegetation velocity vertical water vapor wavelength wet-bulb temperature windspeed zero</p>	5206
<p>CAMPBELL and NORMAN, 1998 [4] absorbed absorptivity air temperature animal approximate assimilation rate Assume atmosphere average beam radiation blackbody body temperature boundary layer conductance calculated canopy coat coefficient computed constant convection crop decreases depends diffuse radiation emissivity emittance emitted environment environmental biophysics estimate Example exchange FIGURE flow function heat transfer height hemi-surface area horizontal humidity increases infrared thermometer intercepted irradiance J/kg latent heat loss leaf angle distribution leaf area index leaf temperature leaves maximum measured metabolic rate mol m⁻² mole fraction NDVI operative temperature organism percent photons photosynthesis plant canopies radiant flux radiative ratio reflectance resistance saturation vapor pressure sensor skin soil surface solar radiation Solution sphere stomatal stomatal conductance sunlit surface temperature thermal conductivity transpiration transport turbulence units values vapor concentration vapor deficit variables variation view factor water content water loss water potential water vapor waveband wavelength wind speed zenith angle zero</p>	2801
<p>HILLEL, 1998 [5] adsorbed adsorption aeration aggregates aquifer atmosphere bulk density capillary cations clay coefficient compaction concentration constant contact angle crop curve Darcy's law decrease depends depth diameter diffusion drainage effect energy equation equilibrium erosion evaporation rate evapotranspiration field flow fluid flux traction function gravity groundwater heat hence Hillel horizon hydraulic conductivity hydraulic head hydrostatic pressure hysteresis increase infiltration rate intally irrigation kaolinite layer liquid mass matric suction measured minerals mm/day molecules montmorillonite neutrons organic matter oxygen particles permeability phase plants pores porosity porous potential properties radiation rainfall ratio root zone runoff salinity salts Sample Problem sand saturated shear soil moisture soil physics soil profile soil structure soil surface soil water soil wetness soil-water soil's solid solution stress temperature tend tensiometer thermal ton transpiration tube unit unsaturated soil vapor pressure velocity volume water content water table wetting front</p>	2005
<p>BOEKER and VAN GRONDELLE, 2011 [6] absorbed absorption albedo atmosphere atoms Calculate carbon carbon cycle Carnot efficiency cell charge separation chemical chlorophyll Climate Change coefficient combustion concentration constant converted cooling cross-section cycle defined density diffusion discussed effect efficiency electricity electron emissions enthalpy Environmental Physics equation equilibrium ethanol example excited exciton exergy factor finds fission flow fluid flux force free energy fuel function gases Gibbs free energy gives Gratzel groundwater Heat Engines hydrogen increase indicated JWST072-Boeker June 16 layer lidar mass molecular molecules neutrons nuclear power oxidation parameters particles photons photosynthesis power stations pressure Printer produce radiation radiative forcing reaction centre reactor redox Renewable Energy reservoir resulting Second Law efficiency shown in Figure solar solar cell spectrum storage surface Table temperature thermal thermodynamic turbine uranium vapour velocity vertical wavelength wind</p>	118
<p>ROSE, 2004 [7] applied aquifer assumed atmosphere average Bernoulli's equation calculated capillary fringe catchment Chapter characteristics chemicals clay commonly component contaminant decrease denoted deposition depth of water described displacement downslope earth's surface effect energy environmental equation equivalent ponded depth evaporation evapotranspiration example excess rainfall factors Figure fluid flux density force fraction given groundwater heat height hydraulic conductivity hydraulic head hydrological illustrated in Fig increase infiltration rate infiltrometer involved irrigation land surface layer liquid lysimeter magnitude mass measured move occur overland flow parameter particles period piezometer plot processes rainfall rate river rock root zone Rose runoff rate salinity sand saturated scale sediment concentration shear stress shown in Fig slope soil erosion soil profile soil surface soil water solute peak Sorbed spatial stream temperature term thermal radiation transport turbulent unsaturated zone vegetation volume volumetric water content water content water table watershed wave Whist</p>	49

Referência Termos e frases comuns indexadas pelo Google Books	Citações
HUGHES and MASON, 2001 [8] absorbed amount atoms average body building Calculate carbon CFCs Chapter chemical cloud concentration convection crop cycle density dew point dioxide Earth's atmosphere Earth's surface effect efficiency electricity emissions energy loss energy transfer entropy environment Environmental Physics equation evaporation example Figure flow fluid flux force fuel gases geostrophic wind global warming gradient greenhouse growth heat Hence human humidity increase insulation irradiance land surface layer leaf leaf area index light London mass measure metabolic molecules Northern nuclear oceans orbit organic matter oxygen ozone ozone depletion particles permanent wilting point photosynthesis plants pollution pores potential processes produce radius rainfall regions result satellite saturation soil profile soil water solar radiation specific heat capacity stratosphere suction surface temperature Table thermal conductivity thermal energy Thermodynamics ton transport troposphere vapour pressure vegetation velocity water potential water vapour wavelength waves weather wind speed	21
SMITH, 2001 [9] absorbed absorption spectrum adiabatic lapse rate amount of energy aquifer atmosphere atomic Bernoulli's principle biomass calculated carbon Carnot cycle cent climate change concentration constant contain converted cooling Coriolis force decay decibel density depends diffusion distance Earth effect efficiency electricity electromagnetic electrons emissions emitted entropy environmental Equation evaporation Figure fission flow rate fluid force frequency friction fuel gases gravity greenhouse groundwater heat capacity height higher increase instance isotopes latent heat layer light liquid magnetic field mass material measured molecules momentum movement neutrons noise nucleus ocean ozone P-waves particles photosynthesis physical plant plutonium pollution power stations pressure produced protons radiation radioactive radioactive decay reaction reactor reduce reflected result rocks rotation soil solar solid sound specific heat capacity spectrum speed surface temperature thermal tropic level turbine Velocity vibrate volume warming waste wavelength waves wind	10
BLAKE and ROBSON, 2008 [10] adiabatic adiabatic lapse rate air parcel analysis anemometer assume atmosphere averaging period boundary layer calculated canopy Chapter CO2 flux coefficient component constant contain converted cooling Coriolis force decay air Earth's surface eddy correlation Eight day mean error five minute means flow flux measurements geostrophic wind gradient heat loss heat transfer height hence hydrostatic equilibrium intentionally left blank isobaric lapse rate latent heat flux m/sec mass Mean temperature mean variance mean vertical wind method mixing ratio northern hemisphere planetary boundary layer pressure Problem quantity radiation radiative radiosonde rainforest rotation sampling rate saturated scalar Schematic representation Section sensible heat sensors series five minute shear shown in Figure solar spectra spectrum for sugar sugar cane surface temperature thermal turbulent velocity amplitude spectrum Vertical velocity water vapour wind shear wind speed WPL correction	3
JAQUE RECHEA, and AGUIRRE DE CARCER, 2000 [11] aceleración aceleración centrípeta adiabática agujero de ozono albedo angular antelación APAX atmosfera átomos Bernoulli borrasca Calcular caliente calor campo eléctrico campo magnético cantidad de movimiento capa de ozono capítulo carga central CFCs Oión concentración conductor considerado Consideremos constante Coriolis cuerpo negro dada debe decibelios define denomina densidad depende desplazamiento dirección disminuir distancia dosis dt dt ecuación efecto ejemplo electrones emisión emite energía cinética expresión Física fluido flujo foco fotones frecuencia fuerza fuerza de Coriolis gas ideal gradiente de presiones gravitatorio indica la figura intensidad interacción isobaras km/h llamada longitud longitud de onda magnitud máquina térmica módulo moléculas mundo neutrones Newton nivel de ruido nuclear núcleos obtener onda sonora ondas electromagnéticas parcela de aire partículas potencia potencial produce protones radiación ultravioleta radiactiva radio realiza sistema sonora superficie tabla temperatura térmica Termodinámica termoelectricas Tierra unidad utiliza Valor vapor de agua variación vector viento	2
FORINASH, 2010 [12] albedo amount approximately assuming atmosphere atoms average band gap battery biodiesel biofuels blackbody calculation cancer carbon dioxide Carnot Carnot cycle cause Chapter chemical coal constant converting cooling cost cycle deaths decay earth earth's surface economic effect efficiency electricity electrons emissions emitted energy needed energy sources energy storage entropy environmental Equation estimated example exposure extracted factors Find a discussion fossil fuels fuel cells gasoline given global heat engine heat flow higher hybrid cars hydrogen increase kinetic energy law of thermodynamics layer levels mechanisms methane molecules natural gas nuclear occur ocean petroleum plug-in hybrid pollution population power plant pressure production quad radiation radioactive radon reactor reliable sources reservoir result risk second law solar cells solar energy solid speed summary surface temperature Table tion transportation United vehicle wavelengths Wikipedia wind turbine	2

Referência Termos e frases comuns indexadas pelo Google Books	Citações
FARAONI, 2006 [13] acceleration approximation aquifer Assume atmosphere average axis boundary condition coefficient Compute concentration continuity equation coordinates cylinder defined derivative described different differential equation diffusion dimensions dispersion relation Earth effect efficiency electric electromagnetic environmental equilibrium exponential field find first fluid flux density flywheel frequency function gradient graph gravity groundwater group velocity heat equation heat flux hence homogeneous horizontal hydraulic hydraulic conductivity ideal gas initial condition integration constant kinetic energy lake Laplacian latent heat linear liquid mass molecules moment of inertia normal area obtain oceans particles phase physical planet pollutant pressure problem propagate radiation radius rotational satisfies saturated vapor pressure soil solar solar constant Solution specific speed Stefan-Boltzmann law surface temperature tensor thermal tion unit vapour vector volume wavelength waves yields	2

B. Entrevistas

Nesta etapa do trabalho, foram entrevistados quatro pesquisadores que, em função de sua experiência acadêmica, são considerados especialistas ou informantes-chaves, constituindo rica fonte de conceitos e representações para o delimitamento do escopo da FA.

SUJ.01 possui graduação em Ecology And Evolution - University Of California Santa Barbara (1987), mestrado em Ecology - San Diego State University (1993) e Doutorado em Ecology - San Diego State University (1997). Atualmente é professor titular na California State University, San Marcos e encontra-se credenciado no Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental (PPGFA) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Tem larga experiência na área de Ecologia, com ênfase em Ecologia de Ecossistemas, atuando principalmente nos seguintes temas: medições das densidades de fluxo de energia e matéria nos ecossistemas tropicais, produtividade primária dos ecossistemas tropicais, ciclo do carbono nos ecossistemas tropicais. De acordo com a base de dados bibliográfica Scopus, já foi citado mais de 1400 vezes, tendo trabalhos publicados em periódicos de destaque internacional como a prestigiada Nature (OECHER et al., 1993, 1994; WALKER et al., 1998).

Tendo orientado cerca de 11% dos trabalhos analisados, o SUJ.02 apresenta o segundo maior índice de orientações no que se refere às dissertações concluídas no PPGFA entre 2002 e 2010. Formado em Física pela Universidade Estadual de Campinas (bacharelado em 1986 e doutorado em 1991). Na Física Ambiental tem se destacado pelas análises das séries temporais nos dados coletados e como estas refletem as características complexas típicas dos sistemas abertos, fora do equilíbrio, promovendo assim a intersecção entre a Teoria da Complexidade e o estudo dos sistemas ambientais.

Como a FA tem estreita ligação com as ciências agrárias, buscou-se a seguir um referente não vinculado ao PPGFA mas que desenvolvesse pesquisas afins aos temas recorrentes observados nos trabalhos analisados. Assim, foi convidado e prontificou-se a colaborar, no contexto da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária na Amazônia Oriental, o SUJ.03.

Bacharel em Ciências Náuticas pelo Centro de Instrução Almirante Braz de Aguiar (1993), o professor SUJ.03.E possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal Rural da Amazônia (1999), tornou-se Mestre em Ciências Geomicrobiológicas pela Vrije Universiteit Amsterdam (2004), e Doutor pela Vrije Universiteit Amsterdam (2009). Possui experiência

na área de geociências, com ênfase em micrometeorologia de florestas tropicais e secundárias, atuando principalmente em micrometeorologia de florestas primária e secundária, cultivos agrícolas na Amazônia central e oriental, radiação, particionamento da precipitação, trocas gasosas de CO₂ e vapor d'água na interface biosfera-atmosfera, isótopos estáveis do carbono, transporte lateral de CO₂ em floresta tropical, armazenamento e trocas de carbono em floresta tropical. A base Scopus registra mais de 430 citações a seus trabalhos.

Pode-se dizer que a envergadura acadêmica do quarto e último pesquisador convidado tem representatividade decisiva para o sucesso da investigação proposta neste trabalho. SUJ.04. atua tanto na vanguarda da pesquisa ambiental quanto na esfera das políticas públicas que definem não só o cenário científico mas as ações civis no âmbito dos fenômenos climáticos em escala global.

Graduado em Engenharia Eletrônica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (1974) e doutorado em Meteorologia pelo Massachusetts Institute of Technology (1983), iniciou sua carreira profissional no Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), em 1975. É pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desde 1983. Foi coordenador científico do Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA) durante o período de 1996 a 2002, tendo portanto, colaborado indiretamente com o surgimento do PPGFA/UFMT. Preside os Conselhos Diretores da Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas (Rede CLIMA) e do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Foi um dos autores do Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (2007), agraciado com o Prêmio Nobel da Paz.

Em suas pesquisas, atua sobre os seguintes temas: ciências atmosféricas, clima, meteorologia, Amazônia e modelagem climática, interação biosfera-atmosfera, mudanças climáticas e desastres naturais. Ministra as disciplinas Interação Biosfera-Atmosfera e Introdução à Ciência do Sistema Terrestre em Programas de PG do INPE. Sua produção científica foi citada mais de 4 mil vezes (dezembro de 2010) no ISI (índice h = 28) e mais de 5 mil vezes no Google Scholar.

A entrevista dos especialistas se constituiu de sete questões, sendo que as duas primeiras se referem à caracterização de dados profissionais. Em seguida, é apresentada uma síntese das respostas:

P. 3 Como você situa a Física dentro do conhecimento científico?

A partir da análise das respostas podemos inferir que a Física tem um caráter fundamental no sentido de subsidiar outras áreas do conhecimento incluindo as ciências ambientais com seus princípios e leis universais. Adicionalmente, oferece ferramentas metodológicas para medidas e análise de dados. Contudo, um dos entrevistados destaca que a Física também tem as suas limitações uma vez que falha ao tentar explicar a vida, a inteligência, a cognição e a capacidade de linguagem.

P. 4 Para você, qual o escopo das Ciências Ambientais?

Os depoimentos são consensuais no sentido de que o escopo das Ciências ambientais é entender o meio ambiente que nos cerca, os processos, as interações e a dinâmica que o permeiam. Além disso, os entrevistados destacam a ação antrópica como determinante e a incluem nesse escopo. As Ciências Ambientais buscam compreender as interações entre os sistemas naturais bem como os efeitos transformadores da interação com a espécie humana, envolvendo para isso conhecimentos multidisciplinares.

P. 5 Fale sobre a relação entre a Física e as Ciências Ambientais.

Para os pesquisadores podemos inferir que a Física oferece a base para a compreensão das Ciências Ambientais. Essa relação foi destacada em diferentes aspectos: um deles destaca que é necessário para a compreensão do fenômeno natural as soluções mecanicistas oferecidas pela Física, outro destaca a necessidade da sua capacidade preditiva, outros simplesmente o papel fundamental que a Física tem entre as demais ciências. Algumas limitações também são apontadas, uma delas, que a Física não é capaz de ajudar na compreensão da componente humana da interação homem ambiente, outra, a dificuldade que se tem em relacionar o comportamento das variáveis medidas com os princípios básicos da Física como a Conservação de Energia e Quantidade de Movimento.

P. 6 Isso posto, você poderia tecer algumas considerações sobre a Física Ambiental?

A proposta da Física Ambiental, segundo um dos entrevistados, consiste de um caminho de apropriação teórico e experimental da Física, para entender o clima, as mudanças climáticas, as interações que permeiam os sistemas naturais. Os demais, destacaram que as pesquisas que desenvolvem nos seus grupos, programas e instituições não poderiam ser chamados propriamente de Física Ambiental - embora reconheçam a grande importância da Física e por vezes reclamem da ausência dela - pois trata-se de atividades que envolvem ecologia, dimensão humana, metabolismo de ecossistemas, etc.

P. 7 Cite os 5 primeiros objetos de estudo em Física Ambiental que lhe vierem a cabeça.

A tabela II relaciona os temas citados pelos pesquisadores entrevistados. Em adição as perguntas formuladas, constatou-se o aparecimento de falas recorrentes que apontam caminhos para o desenvolvimento futuro da Física Ambiental. Embora não tenha sido perguntado diretamente sobre a importância da Teoria da Complexidade como um caminho para os estudos dos fenômenos naturais, das respostas as questões das entrevistas emerge uma abordagem clara que enfatiza a visão sistêmica que deve permear os objetos de estudo. Isso posto, vale ressaltar que os sistemas naturais são abertos e a necessidade de conhecimento dos mesmos passa pela compreensão das suas dinâmicas e interações.

Tabela II: Temas de pesquisa citados pelos especialistas.

Ordem de evocação dos temas	SUJ.01.I	SUJ.02.I	SUJ.03.E	SUJ.04.E
1°	Uso da terra	Dinâmica dos ecossistemas	Trocas de CO ₂ e H ₂ O entre a biosfera e a atmosfera	Perturbação do sistema climático global
2°	Mudanças climáticas e seus efeitos sobre o balanço de energia e os ciclos de H ₂ O e CO ₂	Interação entre sistemas	Fração evaporativa em ecossistemas florestais	-

Há ainda elementos comuns nas respostas dos entrevistados que permitem o agrupamento destas em categorias cujos significados remetem a cinco dimensões ou temas inter-relacionáveis: “Física”, “Ciências Ambientais”, “Física Ambiental”, “Sistema Ambiental” e “Sociedade”. Os aspectos (categorias) desses temas são apresentados a seguir, assim como as respostas sintéticas que lhes fundamentam.

Quanto à Física

Sobre a base para ciências do meio ambiente – (P01.3.1) A Física e a Química estão na base do conhecimento biológico: a compreensão desses saberes permite um maior entendimento dos processos biológicos. (P01.5.4) Apesar de a Física estar na base do entendimento sobre o ambiente, o aspecto social (ação humana) sobre os ecossistemas é um fator que deve compor o escopo das ciências ambientais. (P03.3.2) A “ciência do ambiente” depende da Física. (P04.3.4) Ciências Ambientais estão relacionadas a um entendimento profundo da Física. Sobre as possibilidades da Física nas ciências ambientais: (P01.6.6) Um grupo de pesquisa com base forte em Física permite pontos de vista diferenciados sobre os objetos de estudo. Há um amplo leque de pesquisas na área. (P02.5.5) É preciso estabelecer conexões entre leis físicas universais (como a conservação da energia e a conservação da quantidade de movimento), e os dados ambientais obtidos. (P02.6.6) A Física Ambiental deveria estudar os ecossistemas, com ênfase nas leis e princípios da Física, incorporando esses conceitos para o entendimento de questões ambientais, como o funcionamento do clima, as mudanças climáticas e as interações dos ecossistemas com a atmosfera. (P03.3.4) A Física propicia, com suas teorias, ferramentas para a instrumentação ambiental. (P03.3.6) A Física dá capacidade preditiva das condições futuras do ambiente (e estas terão implicações para a vida em sociedade). (P03.5.8) A compreensão física dos fenômenos, traduzida pragmaticamente, permite o desenvolvimento de ferramentas aplicadas nas ciências ambientais. (P04.5.9) A Física se manifesta dentro do ambiente natural (não como uma disciplina científica, mas como uma dinâmica de interações interna ao ambiente).

Sobre o questionamento amplo do Universo – (P02.3.1) A Física é a ciência que se propõe a entender o universo (incluindo a vida). (P04.3.1) A Física é o elemento central (dentro do conhecimento científico). Ela é fundamental para entendermos o universo. (P02.3.2) A compreensão da Física dá

às pessoas novas visões sobre as coisas.

Sobre as limitações frente ao sistema ambiental – (P03.3.3) A Física possui limitações, pois assume simplificações diante de um sistema complexo (ambiental). (P04.3.2) A vida é uma questão que escapa ao poder explicativo da Física. (P04.3.3) Outras coisas importantes que desafiam o escopo da Física e da própria Biologia (que estuda a vida) são: a inteligência, a cognição e o desenvolvimento das linguagens.

Sobre a Física enquanto empresa humana – (P03.3.1) Há necessidade de uma boa Física, ou seja, aquela que: 1) apresenta teorias rebatidas pelos pares e comprovada e 2) que tenha aplicabilidade.

Quanto às Ciências Ambientais

Sobre a condição de área multidisciplinar e intersecção entre ciências sociais e da natureza – (P01.4.2) As ciências ambientais não tem foco único. Entender o sistema ambiental é uma demanda multidisciplinar. (P02.4.5) Nas ciências ambientais não há fronteiras bem definidas (entre as disciplinas científicas). (P04.4.5) Não existe uma ciência ambiental no singular. (P02.4.7) As ciências ambientais articulam disciplinas científicas de enfoque natural, como a biologia e a climatologia, e questões eminentemente humanas, como os costumes, a cultura e políticas públicas. (P04.4.6) A ciência ambiental, enquanto corpo de conhecimento (ou disciplina intelectual, conforme Toulmin), precisa quebrar o paradigma da superespecialização. Ela (ciência ambiental) seria uma intersecção inteligente (racional, “razoável”...) entre disciplinas das ciências naturais e das ciências sociais. (P04.5.8) O ambiente natural surge no acoplamento de um meio físico (abiótico) com o meio biótico. (P01.5.4) Apesar de a Física estar na base do entendimento sobre o ambiente, o aspecto social (ação humana) sobre os ecossistemas é um fator que deve compor o escopo das ciências ambientais. (P04.6.10) O ambiente é um sistema complexo. Mesmo modelos ambientais exitosos, desenvolvidos na perspectiva da complexidade, ainda não comportam a dimensão humana. Esses trabalhos e o debate sobre as implicações do elemento humano (no sistema ambiental) ainda precisam avançar. (P03.6.9) Não classificaria as pesquisas em nosso âmbito como “física ambiental”. Proponho a denominação “biogeofísica”, considerando os aspectos físicos, biológicos e do solo nestes trabalhos.

Sobre a forte dependência da Física – (P01.6.6) Um grupo de pesquisa com base forte em Física permite pontos de vista diferenciados sobre os objetos de estudo. Há um amplo leque de pesquisas na área. (P03.3.2) A “ciência do ambiente” depende da Física. (P03.5.8) A compreensão física dos fenômenos, traduzida pragmaticamente, permite o desenvolvimento de ferramentas aplicadas nas ciências ambientais. (P04.3.4) Ciências Ambientais estão relacionadas a um entendimento profundo da Física.

Sobre o seu desenvolvimento – (P01.4.3) São pesquisas básicas (as realizadas nas ciências ambientais). (P02.4.4) Ainda encontram-se em uma fase indutiva (as ciências ambientais). (P02.4.6) As ciências ambientais ainda estão se estruturando (enquanto disciplinas científicas). Sobre a preocupação em relação ao elemento humano: (P02.4.3) As ciências ambientais visam compreender as relações entre os ecossistemas, o clima e o homem. (P03.3.5) A ciência ambiental trabalha para a qualidade de vida das pessoas. (P03.4.7) É tarefa das ciências ambientais resgatar a relação fundamental (mas esquecida) entre a Física e a Biologia (vida), pois os seres são parte integrante de um meio que responde a “forçantes” físicas.

Quanto à Física Ambiental

Sobre ser uma disciplina científica em estruturação – (P01.6.5) Nossa pesquisa (em Física Ambiental) é mais focada em ecologia do que propriamente em física. (P03.6.9) Não classificaria as pesquisas em nosso âmbito como “física ambiental”. Proponho a denominação “biogeofísica”, considerando os aspectos físicos, biológicos e do solo nestes trabalhos. (P04.4.5) Não existe uma ciência ambiental no singular.

Sobre os desafios e fatores a considerar – (P01.6.7) Entender como pensam os pesquisadores em “física ambiental” pode indicar caminhos de mudança ou de continuidade. (P02.6.6) A Física Ambiental deveria estudar os ecossistemas, com ênfase nas leis e princípios da Física, incorporando esses conceitos para o entendimento de questões ambientais, como o funcionamento do clima, as mudanças climáticas e as interações dos ecossistemas com a atmosfera. (P02.5.5) É preciso estabelecer conexões entre leis físicas universais (como a conservação da energia e a conservação da quantidade de movimento), e os dados ambientais obtidos. (P03.3.2) A “ciência do ambiente” depende da Física. (P03.3.3) A Física possui limitações, pois assume simplificações diante de um sistema complexo (ambiental). (P03.3.6) A Física dá capacidade preditiva das condições futuras do ambiente (e estas terão implicações para a vida em sociedade). (P04.5.8) O ambiente natural surge no acoplamento de um meio físico (abiótico) com o meio biótico. (P04.5.9) A Física se manifesta dentro do ambiente natural (não como uma disciplina científica, mas como uma dinâmica de interações interna ao ambiente). (P04.6.10) O ambiente é um sistema complexo. Mesmo modelos ambientais exitosos, desenvolvidos na perspectiva da complexidade, ainda não comportam a dimensão humana. Esses trabalhos e o

debate sobre as implicações do elemento humano (no sistema ambiental) ainda precisam avançar.

Quanto ao sistema ambiental

Sobre a complexidade e fator humano – (P04.6.10) O ambiente é um sistema complexo. Mesmo modelos ambientais exitosos, desenvolvidos na perspectiva da complexidade, ainda não comportam a dimensão humana. Esses trabalhos e o debate sobre as implicações do elemento humano (no sistema ambiental) ainda precisam avançar. (P04.5.8) O ambiente natural surge no acoplamento de um meio físico (abiótico) com o meio biótico. (P04.4.7) A ação humana pode perturbar o sistema ambiental em magnitude equiparável à “forças” naturais que operam em escala geológica ou mesmo à evolução biológica.

Sobre a insuficiência da abordagem estritamente física – (P03.3.3) A Física possui limitações, pois assume simplificações diante de um sistema complexo (ambiental). (P03.6.9) Não classificaria as pesquisas em nosso âmbito como “física ambiental”. Proponho a denominação “biogeofísica”, considerando os aspectos físicos, biológicos e do solo nestes trabalhos. (P04.5.9) A Física se manifesta dentro do ambiente natural (não como uma disciplina científica, mas como uma dinâmica de interações interna ao ambiente). (P02.5.5) É preciso estabelecer conexões entre leis físicas universais (como a conservação da energia e a conservação da quantidade de movimento), e os dados ambientais obtidos.

Quanto à sociedade

Sobre a componente consciente e modificadora do sistema ambiental – (P04.4.7) A ação humana pode perturbar o sistema ambiental em magnitude equiparável à “forças” naturais que operam em escala geológica ou mesmo à evolução biológica. (P04.6.10) O ambiente é um sistema complexo. Mesmo modelos ambientais exitosos, desenvolvidos na perspectiva da complexidade, ainda não comportam a dimensão humana. Esses trabalhos e o debate sobre as implicações do elemento humano (no sistema ambiental) ainda precisam avançar.

Sobre a orientação a disciplinas específicas para a reflexão sociedade-ambiente – (P03.3.5) A ciência ambiental trabalha para a qualidade de vida das pessoas. (P03.3.6) A Física dá capacidade preditiva das condições futuras do ambiente (e estas terão implicações para a vida em sociedade). (P03.4.7) É tarefa das ciências ambientais resgatar a relação fundamental (mas esquecida) entre a Física e a Biologia (vida), pois os seres são parte integrante de um meio que responde a “forçantes” físicas. (P04.3.3) Outras coisas importantes que desafiam o escopo da Física e da própria Biologia (que estuda a vida) são: a inteligência, a cognição e o desenvolvimento das linguagens. (P04.4.6) A ciência ambiental, enquanto corpo de conhecimento (ou disciplina intelectual, conforme Toulmin),

precisa quebrar o paradigma da superespecialização. Ela (ciência ambiental) seria uma intersecção inteligente (racional, “razoável”...) entre disciplinas das ciências naturais e das ciências sociais (P04.3.2) A vida é uma questão que escapa ao poder explicativo da Física.

C. Análise de conteúdo - Análise lexical

Foram submetidos a análise os resumos de 35 dissertações coletadas no banco de dissertações e teses do PPGFA. Os trabalhos selecionados foram publicados no período de 2002 à 2010 dentro da linha de pesquisa “Interação Biosfera-Atmosfera”.

Ao corpus obtido aplicou-se o software Analyse Lexicale par Contexte d’un Ensemble de Segments de Texte (ALCESTE), um programa de análise de dados textuais que permite a modelagem estatística multivariada de dados textuais por meio de uma análise lexical. A opção justificou-se pelo fato de que o uso do programa permite obter um maior número de dados em um menor espaço de tempo, e por gerar relatórios dos quais foi possível extrair um grande número de informações. Essas análises permitiram a realização de categorizações das palavras em unidades significativas, favorecendo a compreensão das relações entre os elementos oferecidos. A análise da produção do PPGFA pelo ALCESTE gerou como resultados os gráficos de uma decomposição hierárquica descendente associada a um modelo fatorial por correspondência.

O ALCESTE identificou a presença de três classes distintas de discursos nos resumos dos trabalhos analisados. A distribuição dos Conjuntos de Sequência de Palavras (UCEs) em função das classes encontradas é apresentada na figura 2.

Percebe-se a existência de uma classe hegemônica que agrega a maioria (77%) das UCEs resultantes do particionamento do corpus original. Há, portanto, dois conjuntos de discursos que buscam se diferenciar de um eixo temático principal. As análises subsequentes permitem a caracterização dessas classes.

O grafo da análise hierárquica descendente (figura 2) indica como as classes relacionam-se entre si e apresenta os agrupamentos de lexemas (radicais de palavras) que mais e menos aderem às classes discursivas. Na figura, os conjuntos superiores de lexemas são os mais representativos dos vocabulários próprios de cada classe, enquanto que os conjuntos inferiores praticamente inexistem nesses discursos. A interpretação desses elementos textuais permite uma caracterização inicial dos discursos.

A leitura dos resultados sugere que a classe 1 (16% das UCEs) está associada à análise dos dados microclimáticos da área de transição entre o cerrado e a floresta amazônica, enquanto a classe 2 (7% das UCEs) estuda o sequestro e emissão de carbono pelos elementos bióticos que compõem o ecossistema (vegetação e organismos no solo), bem como a observância de variáveis que regulam esses processos, como a umidade e a temperatura.

Na classe 3 são mais evidentes os termos relativos aos balanços de massa e energia, como o fluxo de calor latente e sensível e a evapotranspiração.

A classificação hierárquica descendente (figura 3), aponta



Figura 2: Distribuição das UCEs nas classes de discursos identificadas nos trabalhos da PGFA.

os lexemas (ou radicais de palavras) mais e menos característicos de cada uma das classes, além de indicar que as classes 1 e 2 apresentam discursos mais próximos entre si do que para com a classe 3.

A análise fatorial por correspondência (figura 4) ilustra a relação entre os conceitos mais característicos de cada classe, além dos discursos típicos, ou seja, os que são representativos das classes em que entre as UCEs classificadas foram distribuídas.

Com esse último resultado, é possível delinear mais claramente a caracterização das classes discursivas, que compõem algumas das UCEs definidoras dos discursos típicos dessas classes.

Classe 1: “Teoria da Complexidade no estudo de séries temporais”

Esta classe está relacionada a estudos realizados na floresta de transição, envolvendo séries temporais associadas à modelagem por Teoria da Complexidade, enfocando principalmente a interação entre solo (fluxo de calor), planta (índice de área foliar) e atmosfera (micrometeorologia).

Classe 2 - “CO2 no solo, dinâmica dos vegetais e composição de serrapilheira”

Essa classe corresponde, principalmente, a estudos do sequestro de carbono, associados a um posicionamento favorável às considerações relacionadas às mudanças climáticas globais.

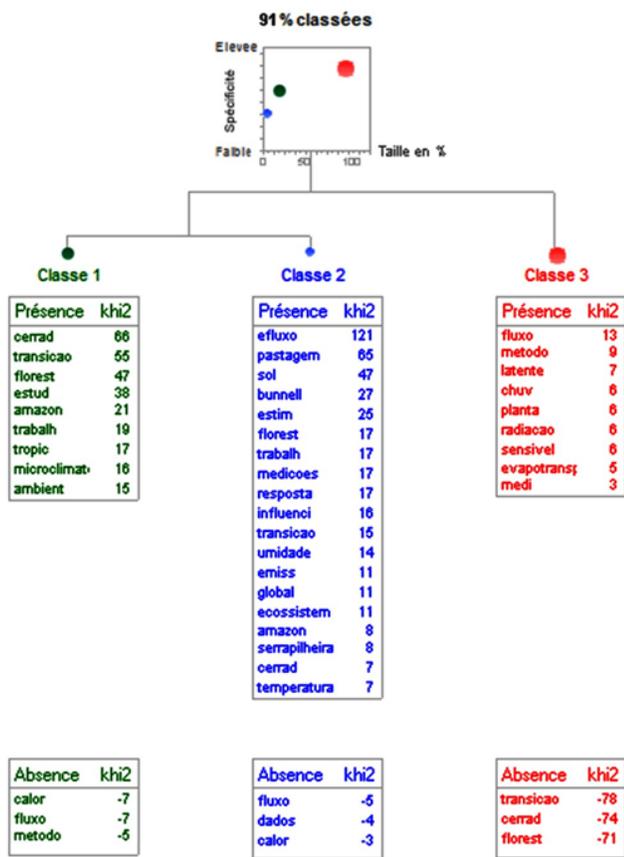


Figura 3: Resultados da análise lexical.

Classe 3: “Balanço de energia”

As pesquisas associadas a estas UCEs voltam-se também a questão do efluxo, mas com um discurso mais neutro em relação a ideologia das mudanças climáticas globais, tratando principalmente de componentes dos balanços de massa e energia nos ecótonos associados a Floresta Amazônica e Pantanal Mato-grossense.

A análise dos resumos dos trabalhos da PGFA, facilitada pelo ALCESTE, confirmou a preocupação com a análise dos dados obtidos respeitando a complexidade inerente ao sistema ambiental em certa sintonia com o debate das mudanças climáticas globais, mas essas duas dimensões mostraram-se pouco presentes na classe que agrupa a maioria das UCEs. Esta, por sua vez, apresenta ênfase na instrumentação e coleta de informações que permitam a caracterização da dinâmica de massa e energia nos ecossistemas estudados.

III. CONCLUSÕES

Identificou-se uma linha evolutiva de um corpo de conhecimentos acadêmico/científicos que sugere o escopo da Física

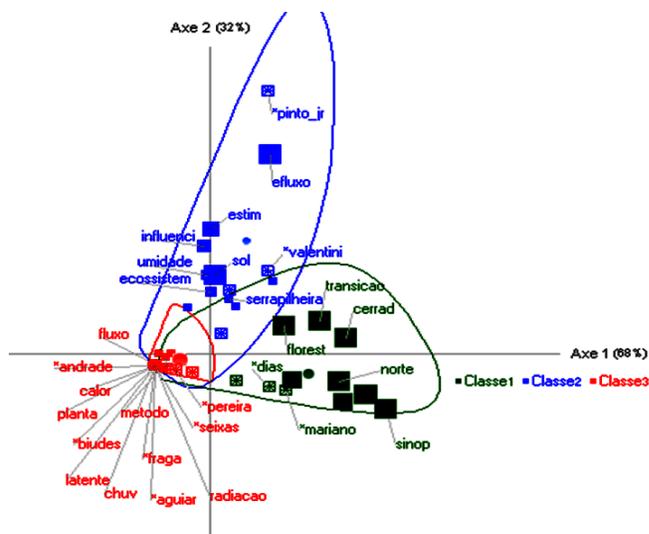


Figura 4: Análise fatorial por correspondência.

Ambiental, bem como as raízes desta e a tendência para o futuro. Pode-se afirmar, após a análise da literatura básica que serve de aporte para os estudos desenvolvidos, que as raízes da FA estão nas Ciências Agrárias.

As Ciências Agrárias, subjacentes à FA, apresentam uma população de conceitos que têm evoluído a partir da Física Clássica e de outras ciências fundamentais como a Química, Biologia e Geologia, incorporando inovações que buscam explicar questões relativas à dinâmica de ecossistemas, trocas de energia, matéria e momento nas diferentes esferas do sistema terrestre, bem como as implicações das mudanças climáticas globais.

Das entrevistas com os especialistas foram obtidas dimensões temáticas e objetos de estudo que podem auxiliar a FA a definir seu papel junto às ciências ambientais. São os problemas, questões-foco e a profundidade com que se busca a resposta a essas questões que vão desenhar as características das disciplinas científicas, assim como a população conceitual que as compõe. Constata-se, nas concepções dos pesquisadores entrevistados, que a Física Clássica, com suas leis e princípios universais, não dá conta de propiciar os avanços necessários na análise dos objetos de estudo inerentes aos sistemas naturalmente abertos, caracterizados por muitas interações com os elementos lhe constituem e com outros sistemas.

Em outras palavras, percebe-se, na fala dos especialistas, que “falta algo” para a compreensão dos seus objetos de estudo. Não existe consenso entre os entrevistados acerca do que seria esse “algo”, nem mesmo terminologia comum para sua melhor identificação. Adicionalmente, sua descrição envolve termos como “sistemas complexos”, “sistemas abertos”, “fora do equilíbrio” e “interdisciplinaridade”. Ou seja, existe uma percepção, por parte dos pesquisadores, de que os elementos que tem potencialmente o papel de preencher a lacuna representada por esse “algo” são aqueles que estão a compor a Teoria da Complexidade. Tal resultado também emerge na análise das dissertações do PPGFA.

A análise estatística indicou ainda que a classe hegemônica,

dentre as três identificadas, apresenta uma influência leve da ideologia associada ao discurso das mudanças climáticas globais e enfatiza questões associadas a instrumentação e ecologia de ecossistemas.

A questão humana, mais especificamente a influência da ação antrópica sobre a configuração dos sistemas ambientais, destacada pelos referentes, se mostra ainda pouco evidente nas pesquisas produzidas no PPGFA. Segundo os especialistas en-

trevistados, o diálogo entre as ciências sociais e naturais ainda é um desafio a ser superado.

A Teoria da Complexidade, por outro lado, tem se dedicado já há algum tempo a investigar mesmo os sistemas nos quais o elemento humano está inserido. Esse viés, que tem se desenvolvido na PPGFA, pode ajudar a definir o status da FA no conjunto das Ciências Ambientais.

-
- [1] I. Change, *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge University Press, 2014) ISBN 9781139917193.
 - [2] J. A. Marengo, *Revista USP*, 25(2014).
 - [3] J. Monteith and M. Unsworth, *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere* (Elsevier Science, 2013) ISBN 9780123869937.
 - [4] G. Campbell and J. Norman, *An introduction to environmental biophysics* (Springer, 1998) ISBN 9780387949376.
 - [5] D. Hillel, *Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations* (Elsevier Science, 1998) ISBN 9780080544151.
 - [6] E. Boeker and R. van Grondelle, *Environmental Physics: Sustainable Energy and Climate Change* (Wiley, 2011) ISBN 9780470666753.
 - [7] C. Rose, *An Introduction to the Environmental Physics of Soil, Water and Watersheds*, An Introduction to the Environmental Physics of Soil, Water and Watersheds (Cambridge University Press, 2004) ISBN 9780521536790.
 - [8] P. Hughes and N. Mason, *Introduction to Environmental Physics: Planet Earth, Life and Climate* (CRC Press, 2014) ISBN 9781482273069.
 - [9] C. Smith, *Environmental Physics*, Routledge introductions to environment series (Routledge, 2001) ISBN 9780415201902.
 - [10] D. Blake and R. Robson, *Physical Principles of Meteorology and Environmental Physics: Global, Synoptic and Micro Scales* (World Scientific, 2008) ISBN 9789812813848.
 - [11] F. Rechea and I. de Cárcer, *Bases de la física medioambiental*, Ariel ciencia (Ariel, 2002) ISBN 9788434480452.
 - [12] K. Forinash, *Foundations of Environmental Physics: Understanding Energy Use and Human Impacts* (Island Press, 2010) ISBN 9781597269605.
 - [13] V. Faraoni, *Exercises in Environmental Physics* (Springer, 2006) ISBN 9780387358352, Chap. Evapotranspiration, Soils, and Hydrology, pp. 251–286.