

$$\frac{A3}{63}$$

Renato Baudo
Guido Perin

Ecotossicologia quantitativa applicata



Copyright © MMXI
ARACNE editrice S.r.l.

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

via Raffaele Garofalo, 133/ A-B
00173 Roma
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-4528-2

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: gennaio 2012

La preparazione di questo libro è stata molto sofferta e ben più lunga della gestazione (2 anni) nell'elefante africano. Infatti, la prima idea di questo parto letterario, in collaborazione tra un chimico ed un biologo, risale al 2003. Da allora le nostre mogli, Emilia ed Isa, hanno pazientemente atteso che dedicassimo loro un po' di tempo. Unico svago, qualche fugace visita a Venezia, in occasione dei nostri incontri di lavoro.

Ci sembra dunque doveroso riconoscere il loro appoggio morale e, senza dimenticare l'aiuto ricevuto da colleghi e dottorandi delle Università di Napoli e di Sassari (sedi gemmate di Nuoro e Oristano) e di Venezia (Martina Bano, Francesco Cavraro, Gioia Garavini, Maria-Letizia Giacchetto, Andrea Mao, Maria Maniero, Sabrina Manente, Luna Ravasio, Silvio Scagnetti, Diana Maria Zilioli), che con le loro critiche costruttive hanno grandemente contribuito a far... lievitare questo volume fino alle attuali dimensioni, è con grande piacere che dedichiamo il frutto di tanto lavoro alle nostre compagne.

Renato Baudo
Guido Perin

II *Presentazione*

13 *Introduzione all'Ecotossicologia*

31 **Capitolo I** *Principi di Ecotossicologia*

1.1. Introduzione, 31 – 1.2. Effetto ed esposizione, 31 – 1.3. Principali categorie di inquinanti, 32 – 1.4. Inquinanti inorganici, 34 – 1.4.1. *Metalli*, 34 – 1.4.2. *Anioni*, 38 – 1.5. Inquinanti organici, 39 – 1.5.1. *Idrocarburi*, 39 – 1.5.2. *Composti alogenati*, 40 – 1.5.3. *Pesticidi*, 41 – 1.5.4. *Composti metallorganici*, 44 – 1.5.5. *Detergenti*, 44 – 1.6. Isotopi radioattivi, 44 – 1.6.1. *Semi-vita*, 46 – 1.6.2. *Biochimica*, 46 – 1.7. Inquinanti gassosi, 46 – 1.7.1. *Ozono*, 47 – 1.7.2. *Ossidi di carbonio*, 48 – 1.7.3. *Ossidi di azoto*, 50 – 1.7.4. *Biossido di zolfo*, 51.

53 **Capitolo II** *Diffusione e distribuzione degli inquinanti nell'ambiente*

2.1. Inquinanti e ambiente, 53 – 2.1.1. *Ambienti acquatici*, 54 – 2.1.2. *Ambienti terrestri*, 56 – 2.1.3. *Emissioni nell'atmosfera*, 56 – 2.2. Movimenti degli inquinanti nell'ambiente, 59 – 2.2.1. *Trasporto nell'acqua*, 59 – 2.2.2. *Trasporto nell'aria*, 61 – 2.3. Modelli della distribuzione ambientale dei prodotti chimici, 62 – 2.3.1. *Modelli termodinamici*, 63 – 2.4. Il destino degli inquinanti inorganici nell'ambiente, 64 – 2.4.1. *Localizzazione*, 64 – 2.4.2. *Persistenza*, 64 – 2.4.3. *Bioconcentrazione e bioaccumulo*, 65 – 2.4.4. *Biodisponibilità*, 66 – 2.4.5. *Interazioni tra inquinanti*, 66 – 2.4.6. *Ambienti Terrestri*, 67 – 2.4.6.1. *Metalli*, 67 – 2.4.6.2. *Radioattività*, 69 – 2.4.7. *Ambienti acquatici*, 70 – 2.5. Il destino degli inquinanti organici, 70 – 2.5.1. *Destino all'interno degli organismi*, 71 – 2.5.2. *Processi di uptake*, 72 – 2.5.2.1. *Vertebrati ed invertebrati terrestri*, 74 – 2.5.2.2. *Invertebrati e vertebrati acquatici*, 74 – 2.5.2.3. *Piante*, 75 – 2.5.3. *Processi di distribuzione*, 75 – 2.5.4. *Immagazzinamento*, 76 – 2.5.5. *Siti di escrezione*, 78 – 2.5.6. *Inquinanti organici negli ecosistemi terrestri*, 79 – 2.5.6.1. *Trasferimento lungo la catena trofica terrestre*, 82 – 2.5.7. *Inquinanti organici negli ecosistemi acquatici*, 83 – 2.5.7.1. *Inquinanti nei sedimenti*, 83 – 2.5.7.2. *Trasferimento lungo le catene trofiche acquatiche*, 83.

85 **Capitolo III** *Le basi chimiche del comportamento dei tossici ambientali in ecotossicologia*

3.1. Bioaccessibilità e biodisponibilità, 85 – 3.2. Lo stato d'equilibrio, 88 – 3.2.1. *La costante d'equilibrio*, 88 – 3.2.2. *Le costanti di ionizzazione a stadi di acidi poliprotici*, 90 – 3.3. Il Potere Tampone, 91 – 3.3.1. *Sistemi di tamponi multipli*, 91 – 3.4. Il diagramma di concentrazione logaritmico, 91 – 3.5. Precipitazione, prodotto di solubilità e suo ruolo in Ecotossicologia, 96 – 3.5.1. *Effetto dello ione in comune*, 97 – 3.5.2. *Solubilità dei solfuri e significato ecotossicologico*, 97 – 3.6. Equilibri di ossido-riduzione e loro ruolo in Ecotossicologia, 98 – 3.6.1. *Gli equilibri di ossido-riduzione e la velocità di reazione*, 99 – 3.6.2. *I diagrammi Eh/(pH)*, 100.

103 **Capitolo IV** *Relazioni termodinamiche essenziali in ecotossicologia*

4.1. Gli strumenti di lavoro per la quantificazione certa dei processi ambientali, 103 – 4.2. Valutazione degli strumenti ambientali, 104 – 4.3. Uso dei potenziali chimici nei processi ambientali, 107 – 4.3.1. *Solubilità*, 108 – 4.3.2. *Ripartizione generica tra due matrici omogenee. Ripartizione fra due solventi: la costante K_{s,s_2}* , 111 – 4.3.3. *Ripartizione di un composto tra fase liquida e gassosa: la Costante della Legge di Henry*, 111 – 4.3.4. *Stima di K_H attraverso il contributo delle unità strutturali della molecola del composto*, 112 – 4.4. Il coefficiente di ripartizione ottanolo/acqua (K_{ow}), 112 – 4.5. Lo scambio di liquido e gas / all'interfaccia solida, 114 – 4.6. Le isoterme di adsorbimento, 115 – 4.6.1. *Ruolo dei componenti la matrice*, 116 – 4.7. Processi non in equilibrio: la diffusione. La 1^a legge di Fick ed il gradiente di concentrazione, 120 – 4.7.1. *Lo scambio aria/liquido all'interfaccia*, 121 – 4.7.2. *Trasferimento di materia all'interfaccia aria/acqua*, 122.

125 **Capitolo V** *Processi di trasformazione degli inquinanti nell'ambiente*

5.1. Principi di cinetica chimica applicati all'ambiente, 125 – 5.2. Processi esterni al sistema e quantitativi di trasformazione degli inquinanti nell'ambiente, 126 – 5.2.1. *Processi chimici e biochimici ambientali*, 126 – 5.2.1.1. *Processi*

idrolitici, 127 – 5.2.1.2. Processi di ossido-riduzione, 128 – 5.2.1.3. Processi fotochimici: generalità, 129 – 5.2.1.4. Processi fotochimici: assorbimento, 132 – 5.2.1.5. Fotolisi diretta: relazioni cinetiche, 133 – 5.2.1.6. Fotolisi indiretta, 134 – 5.3. Influenza delle variabili ambientali sui processi fotochimici, 135 – 5.3.1. Effetti della temperatura, 135 – 5.3.2. Effetti del solvente, della forza ionica e del pH, 135 – 5.3.3. Effetti di schermatura della luce di sostanze organiche naturali disciolte in acqua, 136 – 5.3.4. Effetti ottici di sedimenti sospesi, 136 – 5.3.5. Effetti chimici di sedimenti sospesi, 136 – 5.4. Processi biochimici, 137 – 5.4.1. Cinetiche delle biotrasformazioni: generalità, 137 – 5.4.2. Strategie iniziali di attacco dei microorganismi al composto xenobiotico, 138 – 5.4.3. Cinetica dell'assunzione del composto, 139 – 5.4.4. L'equazione di Michaelis-Menten, 139 – 5.4.5. L'equazione di Monod, 140 – 5.5. Processi di trasformazione di detossificazione o di esaltazione della tossicità, interni al sistema, 140 – 5.5.1. Processi ambientali interni, 140 – 5.5.2. Gli attori delle biotrasformazioni: gli enzimi, 141 – 5.6. Reazioni della Fase I dei tossici, 143 – 5.6.1. Le monoossigenazioni, 143 – 5.6.2. Le epossidazioni, 144 – 5.6.3. Le idrossilazioni, 144 – 5.6.4. L'idratazione epossidica, 145 – 5.6.5. Ossidazione di elementi non carbonici, 145 – 5.6.6. Deidrogenazione alcolica, 146 – 5.6.7. Riduzioni metaboliche, 146 – 5.6.8. Reazioni metaboliche d'idrolisi, 147 – 5.6.9. Le esterasi, 147 – 5.6.10. Le dealchilazioni metaboliche, 148 – 5.6.11. Le dealogenazioni, 148 – 5.7. Reazioni di Fase II dei tossici e degli xenobiotici, 149 – 5.7.1. Coniugazione per formazione di glucuronidi o glucuronidazione, 149 – 5.7.2. Coniugazione con glutatione, 150 – 5.7.3. Coniugazione con solfati, 151 – 5.7.4. Coniugazione per acetilazione, 152 – 5.7.5. Coniugazione per metilazione, 152 – 5.7.6. Coniugazione da aminoacidi, 153 – 5.8. Considerazioni finali, 153.

155 Capitolo VI

Il sistema ambientale: l'approccio globale

6.1. Modelli della distribuzione ambientale dei prodotti chimici, 155 – 6.2. La fugacità ed il LI $\{f\}$ ER, 155 – 6.2.1. Calcolo di Z, per un composto puro, per la fase vapore (A), la fase liquida (Acqua) e le fasi solide (Suolo e sedimento), 160 – 6.2.2. Calcolo di Z per le fasi biologiche, 161 – 6.3. L'applicazione della fugacità, 161 – 6.3.1. Livello Primo: distribuzione approssimata, 161 – 6.3.2. LIF $\{f\}$ ER Livello Secondo, 162 – 6.3.3. Livello Terzo: distribuzioni non in equilibrio, 165 – 6.3.4. Livello Quarto: distribuzioni in stato non stazionario, 168 – 6.4. Esempi di rappresentazioni grafiche del modello, 169.

171 Capitolo VII

Il comparto atmosfera

7.1. Movimenti delle masse d'aria, 171 – 7.1.1. Profili del vento, 171 – 7.1.2. Diffusione turbolenta, 171 – 7.1.3. L'andamento di dT contro dz , 173 – 7.2. Comportamento di una massa di inquinante emessa nell'atmosfera, 173 – 7.2.1. Condizioni di adiabaticità, 173 – 7.3. Innalzamento del pennacchio $-(\Delta h)$, 174 – 7.3.1. Comportamento di una massa di inquinante emessa nell'atmosfera: innalzamento del pennacchio, effetto del momento, 176 – 7.3.2. Comportamento di una massa di inquinante emessa nell'atmosfera: innalzamento del pennacchio, effetto della temperatura, 177 – 7.4. Comportamento di una massa di inquinante emessa da una sorgente nell'atmosfera: diffusione del pennacchio, 178 – 7.4.1. Il Modello Gaussiano della diffusione. Emissioni Continue. L'equazione di Sutton, 180 – 7.4.2. Validità del modello di Sutton: il criterio di Scorer, 183 – 7.4.3. Il Modello Gaussiano della diffusione. Emissioni discontinue. Emissioni a "puff", 183 – 7.5. La deposizione di composti corpuscolati: inquinamento atmosferico ed inquinamento del suolo, 186 – 7.5.1. Deposizione secca (Dry deposition), 186 – 7.5.2. Caso particolare di deposizione: il processo di washout (dilavamento), 188 – 7.6. I fattori d'emissione, 188.

191 Capitolo VIII

Il comparto acqua

8.1. Presenza di composti chimici d'origine naturale od antropogenica nelle acque, 191 – 8.1.1. Caratterizzazione generali delle acque, 191 – 8.1.1.1. Il ThOD (Theoretical Oxygen Demand), 192 – 8.1.1.2. Il TOC (Total Organic Carbon), 192 – 8.1.1.3. Il COD (Chemical Oxygen Demand), 192 – 8.2. Il BOD, 192 – 8.2.1. La cinetica del BOD, 193 – 8.2.2. Valutazione sperimentale del BOD, 194 – 8.3. Il Bilancio di Ossigeno nei corpi dell'acqua, 195 – 8.3.1. L'effetto di salti d'acqua (cascate e dighe) sui valori di ossigenazione di un corpo d'acqua, 201 – 8.4. Andamento della concentrazione di un carico inquinante lungo un corpo d'acqua. Dispersione di inquinanti, dispersione in un sistema lineare, 201 – 8.4.1. Miscelazione degli inquinanti immessi in un corpo d'acqua, miscelazione semplice in un sistema lineare, miscelazione e dispersione in un fiume, 204 – 8.4.2. Le equazioni della miscelazione. Determinazione della zona di miscelazione effettiva, 204 – 8.5. Analisi dell'inquinamento di un corpo d'acqua, 206 – 8.5.1. La tecnica della segmentazione analitica, 206.

209 Capitolo IX

Comparto suolo e sedimento

9.1. La struttura del suolo-sedimento, 209 – 9.2. Le tematiche primarie dei suoli in Ecotossicologia, 209 – 9.3. La qualità del suolo, 210 – 9.3.1. La degradazione fisica e biologica del suolo, 210 – 9.3.2. L'inquinamento, 211 – 9.3.3. Il degrado, 211 – 9.4. La contaminazione puntuale e la comparsa di siti contaminati, 212 – 9.4.1. Alcuni casi europei di siti contaminati, 213 – 9.5. Migrazione degli inquinanti nel suolo, 213 – 9.5.1. Movimenti dei fluidi, 213 – 9.5.1.1. Processi d'adsorbimento nel suolo e nel sedimento, 215 – 9.5.1.2. Ruolo della sostanza organica, 216 – 9.5.1.3. La sostanza organica del suolo/sedimento ed il ruolo degli acidi umici, 217 – 9.6. Dispersione degli inquinanti nel sottosuolo, 219 – 9.6.1. Flusso da sorgente localizzata con emissione istantanea, 219 – 9.6.2. Flusso da sorgente localizzata con emissione continua puntiforme, 220 – 9.6.3. Cinetiche d'adsorbimento, 221 – 9.6.4. Equazioni di diffusione nel sottosuolo, 223 – 9.6.4.1. Diffusione verticale dalla

superficie verso l'acquifero, 223 – 9.6.4.2. Diffusione nel sottosuolo da un pozzo profondo contaminato (Flusso Radiale), 223 – 9.6.4.3. Migrazione di inquinanti dal suolo a pozzi profondi, 224 – 9.7. Diffusione di inquinanti in falda: cinetiche di migrazione e aspetti ambientali, 224 – 9.8. Il sedimento come comparto ambientale, 227 – 9.8.1. Il ruolo dei sedimenti come destino finale degli inquinanti, 229 – 9.8.2. Metalli pesanti nei sedimenti, 229 – 9.9. Valutazione del rischio ambientale dei sedimenti, 233.

237 Capitolo X

Le Ergocinetiche

10.1. Inquinamento e bilanci energetici: il Trade-off, 237 – 10.1.1. Processi chemio-bio-cinetiche: i bilanci di energia, 238 – 10.2. I modelli energetici, 240 – 10.2.1. Processi ergo-fisiologici, 240 – 10.2.2. Processi chemio-bio-cinetiche: i bilanci di materia, 243 – 10.3. Modelli tossico cinetici, 245 – 10.3.1. Generalità, 245 – 10.3.2. Modelli tossicocinetici di bioconcentrazione e bioaccumulo, 247 – 10.4. Il fattore di bioconcentrazione (BCF), 247 – 10.4.1. Bioaccumulo: Trasferimento attraverso la catena alimentare, 248 – 10.5. La biomagnificazione ed il fattore di biomagnificazione, 249 – 10.6. Modelli compartimentali, 250 – 10.6.1. Il modello mono-compartimentale aperto, 250 – 10.6.2. Il volume apparente di distribuzione, 253 – 10.7. I modelli bi-compartimentali e multi-compartimentali, 257 – 10.7.1. Valutazioni quantitative in un modello bi-compartimentale, 259 – 10.7.2. Cinetiche delle esposizioni ripetute ad uno xenobiotico, 260 – 10.7.3. Cinetiche di sistemi non lineari o saturabili, 260.

263 Capitolo XI

Effetti fisiologici e biochimici degli inquinanti

11.1. Effetti a livello cellulare, 263 – 11.2. Effetti a livello di organi, 265 – 11.3. Effetto a livello dell'intero organismo, 265 – 11.3.1. Effetti sul comportamento degli animali acquatici, 265 – 11.3.2. Effetti degli organofosfati su comportamento, mortalità e successo riproduttivo in mammiferi e uccelli, 266 – 11.3.3. Effetti sulla produttività, 267 – 11.3.4. Effetti biochimici degli inquinanti, 268 – 11.4. Meccanismi molecolari della tossicità, 270 – 11.4.1. Composti genotossici, 271 – 11.4.2. Composti neurotossici, 272 – 11.4.3. Veleni mitocondriali, 273 – 11.4.4. Antagonisti della vitamina K, 274 – 11.4.5. Antagonisti della tirosina, 274 – 11.4.6. Inibizione delle ATPasi, 275 – 11.4.7. Estrogeni e androgeni ambientali, 275 – 11.4.8. Reazione con i gruppi sulfidrilici (SH) delle proteine, 275 – 11.4.9. Fotosistemi delle piante, 275 – 11.4.10. Erbicidi regolatori della crescita delle piante, 275 – 11.5. Interazioni tra inquinanti, 276 – 11.5.1. Potenzamento per inibizione della detossificazione, 277 – 11.5.2. Potenzamento per aumentata attivazione, 279 – 11.5.3. Rilevamento del potenziamento sul campo, 279.

281 Capitolo XII

Test previsionali di tossicità ambientale

12.1. Previsioni degli effetti ambientali, 281 – 12.1.1. Scelta degli organismi e modalità di esecuzione dei saggi, 283 – 12.1.2. I test biotossicologici o BIO-ASSAY, 286 – 12.2. Test di tossicità con organismi acquatici, 287 – 12.2.1. Test statici, 287 – 12.2.2. Test semi-statici, con rinnovo, 288 – 12.2.3. Test a flusso continuo, 288 – 12.2.4. Test su estratti, 288 – 12.2.5. Test con Crostacei, 289 – 12.2.6. Test con *Hyalella azteca*, 290 – 12.3. Metodi di bioassay algale con alghe unicellulari, 291 – 12.3.1. Test statici (culture in batch), 292 – 12.3.2. Test dinamici (Chemostato), 294 – 12.3.3. Bioassay algali per la determinazione della tossicità o stimolazione degli elutriati di sedimento o acqua interstiziale, 294 – 12.4. Test con Echinodermi, 295 – 12.5. Bioassay con Mitocondri. Test con mitocondri congelati di cuore di bue (FBHM = Frozen Beef Heart Mitochondria), 298 – 12.6. Test di tossicità con organismi terrestri, 301 – 12.6.1. Test sul solido, 301 – 12.7. Test con microorganismi, 301 – 12.7.1. Test con *Vibrio fischeri* (MICROTOX®), 301 – 12.7.2. Test sull'attività respiratoria dei batteri del suolo, 303 – 12.7.3. Test del potere nitrificante del suolo, 303 – 12.8. Test di tossicità con invertebrati, 303 – 12.8.1. Test con Anellidi: *Eisenia foetida*, 303 – 12.8.2. Test con Anellidi: *Lumbricus terrestris*, 304 – 12.8.3. Test con Anellidi: Tubificidi, 304 – 12.8.4. Test con Nematodi, 305 – 12.8.5. Test con Collemboli, 305 – 12.8.6. Test con Oniscidi (porcellino di terra), 305 – 12.9. Test con Insetti benefici, 306 – 12.10. Test con Vertebrati, 306 – 12.11. Test con piante, 306 – 12.12. Metodi fisiologici e biochimici, 307 – 12.12.1. Gli indicatori biologici di stress, 307 – 12.13. L'indice epatosomatico, 307 – 12.14. L'Adenylic Energetic Charge (AEC), 308 – 12.15. Induzione d'enzimi di detossificazione epatici, 308 – 12.15.1. Saggio di rilevamento del P_{450} , 308 – 12.15.2. Enzimi antiossidanti, 309 – 12.16. Bioindicatori morfologici, 309 – 12.16.1. L'asimmetria corporea, 309 – 12.17. Test dei micronuclei, 311 – 12.18. Biosensori, 311 – 12.19. Test in situ, 311 – 12.20. Metodi "omici", 312 – 12.20.1. Brevi richiami di genetica molecolare, 313 – 12.20.2. Applicazioni di Genomica funzionale, 316 – 12.20.3. Il metodo SELDI-TOF, 317.

321 Capitolo XIII

Metodi Chimici Previsionali basati sulle relazioni tra tossicità e struttura molecolare

13.1. Premesse, 321 – 13.2. Generalità sullo sviluppo processuale dei modelli relazionali tra struttura molecolare ed attività, 326 – 13.2.1. Criteri di "costruzione" di un modello SAR o QSAR, 329 – 13.2.2. Il Training Set, 329 – 13.2.3. I Descrittori, 329 – 13.2.3.1. I descrittori delle costanti di frammenti, 330 – 13.2.3.2. I descrittori conformazionali, 330 – 13.2.3.3. I descrittori elettronici e quanto-meccanici, 330 – 13.2.3.4. I descrittori di recettori, 330 – 13.2.3.5. I descrittori topologici, 331 – 13.2.3.6. Gli indici di connettività molecolare, 331 – 13.2.3.7. Gli indici di conformazione, 331 – 13.2.3.8. I descrittori di contenuto di informazione, 331 – 13.2.3.9. I descrittori di analisi di forma molecolare e del volume, 331 – 13.2.3.10. I descrittori spaziali, 331 – 13.2.3.11. I descrittori strutturali, 331 – 13.2.3.12. I descrittori termodinamici, 331 – 13.2.3.13. I descrittori di pK_a , 332 – 13.2.3.14. I descrittori d'analisi di campo molecolare (MFA), 332 – 13.2.3.15. I descrittori di recettori di analisi di

superficie (RSA), 332 – 13.2.3.16. *Il coefficiente di ripartizione (P)*, 332 – 13.2.3.17. *La Costante Idrofobica*, 332 – 13.2.3.18. *La costante di Hammett*, 333 – 13.2.3.19. *I descrittori sterici*, 333 – 13.2.3.20. *Il parametro di Taft*, 333 – 13.2.3.21. *La refrattività molare (MR)*, 334 – 13.2.3.22. *Descrittori QSAR computer-aided*, 334 – 13.2.4. *L'analisi statistica*, 334 – 13.2.5. *Il Modello*, 335 – 13.2.6. *Il Testing Set*, 335 – 13.3. Alcuni esempi applicativi dei QSAR, 335 – 13.3.1. *Previsione di effetti fisiologici, istologici ed anatomici*, 335 – 13.3.2. *Previsione di effetti generici in tossicologia acquatica*, 335 – 13.3.3. *Previsioni QSAR dell'attività cancerogena*, 336 – 13.3.4. *Previsioni QSAR di Bioconcentrazione*, 337 – 13.3.5. *Previsioni QSAR di relazioni interspecie*, 338 – 13.4. Lo sviluppo dei modelli QSBR (Quantitative Structure–Biodegradation Relationships), 339 – 13.5. Criteri di applicabilità dei QSAR e dei QSBR, 340.

341 Capitolo XIV

Biomarker

14.1. Premesse, 341 – 14.2. Classificazione dei biomarker, 341 – 14.3. Specificità dei biomarker, 344 – 14.4. Relazioni tra biomarker ed effetti avversi, 344 – 14.4.1. *Inibizione delle esterasi*, 345 – 14.4.2. *Le monoossigenasi*, 346 – 14.4.3. *Metallotioneina*, 347 – 14.4.4. *Proteine da stress*, 347 – 14.4.5. *Stress ossidativo*, 347 – 14.4.6. *Porfirine e sintesi dell'eme*, 347 – 14.5. Studi sul materiale genetico, 348 – 14.6. Alterazioni del sistema immunitario, 350 – 14.7. Alterazioni istopatologiche, 350 – 14.8. Biomarker fisiologici ed aspecifici, 350 – 14.9. Biomarker comportamentali, 350 – 14.10. Biomarker nelle piante, 351 – 14.11. Ruolo dei biomarker nella valutazione ambientale, 352 – 14.12. Biomarker negli studi di popolazioni, 354 – 14.12.1. *Assottigliamento del guscio delle uova in uccelli rapaci e piscivori dovuto al DDE*, 354 – 14.12.2. *Insuccesso riproduttivo in uccelli piscivori dei Grandi Laghi del Nord America*, 356 – 14.12.3. *Insuccesso riproduttivo dei molluschi dovuto allo stagno tributile*, 359 – 14.12.4. *Trattamento delle foreste in Canada Orientale per il controllo dei parassiti dell'abete*, 360.

361 Capitolo XV

Biomonitoraggio

15.1. Monitoraggio biologico *in situ*, 363 – 15.1.1. *Biomonitoraggio: indici*, 365 – 15.1.2. *Ecosistemi terrestri*, 366 – 15.1.3. *Ecosistemi di acqua dolce*, 367 – 15.1.4. *Ecosistemi marini*, 372 – 15.2. Bioconcentrazione degli inquinanti (Biomonitoraggio di tipo 2), 372 – 15.2.1. *Ecosistemi terrestri*, 373 – 15.2.2. *Ecosistemi di acqua dolce*, 373 – 15.2.3. *Ecosistemi marini*, 373 – 15.3. Effetti degli inquinanti (Biomonitoraggio di tipo 3), 374 – 15.3.1. *Ecosistemi terrestri*, 374 – 15.3.2. *Ecosistemi di acqua dolce*, 374 – 15.3.3. *Ecosistemi marini*, 375 – 15.4. Resistenza genetica all'inquinamento (Biomonitoraggio di tipo 4), 375 – 15.5. Il biomonitoraggio: conclusioni, 376.

377 Capitolo XVI

Effetti degli inquinanti a livello di popolazioni e comunità

16.1. Dinamica delle popolazioni, 377 – 16.1.1. *Velocità di crescita delle popolazioni*, 378 – 16.1.2. *Dinamica di popolazione ed ecotossicologia*, 380 – 16.2. Evoluzione della resistenza agli inquinanti, 381 – 16.2.1. *Inquinamento cronico come fattore di cambiamento ambientale*, 381 – 16.3. Cambiamenti a livello di comunità ed ecosistemi, 388 – 16.3.1. *Processi nel suolo*, 389 – 16.3.2. *Acidificazione di laghi e fiumi*, 391.

399 Capitolo XVII

L'uomo come target finale dell'ecotossicologia

17.1. Premesse, 399 – 17.2. Inquinamento dell'ambiente e popolazione ad alto rischio, 400 – 17.2.1. *Inquinamento dell'ambiente*, 401 – 17.3. Popolazione ad alto rischio, 403 – 17.3.1. *Generalità*, 403 – 17.4. Fattori di sviluppo, 403 – 17.4.1. *Sistemi enzimatici immaturi*, 403 – 17.4.2. *Sistemi immunitari immaturi*, 405 – 17.4.3. *Caso particolare: la gravidanza*, 405 – 17.4.4. *Il periodo dei ritmi biologici*, 406 – 17.4.5. *Ritmi psicofisiologici circadiani*, 407 – 17.4.6. *Suscettibilità ai batteri e alle infezioni*, 408 – 17.4.7. *I ritmi psicofisiologici circannuali*, 410 – 17.4.8. *Ritmo delle mitosi cellulari e tumori*, 410 – 17.4.9. *L'età*, 411 – 17.4.10. *I disordini genetici*, 411 – 17.5. Fattori che alterano i processi omeostatici ossia che producono disordini nei sistemi regolatori, 413 – 17.5.1. *Fattori genetici*, 413 – 17.5.2. *Fattori legati alla dieta*, 413 – 17.5.3. *Fattori comportamentali*, 414 – 17.5.4. *La popolazione ad alto rischio e la definizione degli standard di qualità*, 414 – 17.6. L'influenza dell'ambiente sulla salute degli esseri vitali. La risposta psicosomatica, 416 – 17.6.1. *Finalità delle emozioni e significato della malattia*, 416 – 17.6.2. *L'asse ipofisi-ipotalamo-surreni (sistema HPA) e sue interazioni sulle emozioni e sulle attività cognitive nella risposta agli stressori ambientali*, 417 – 17.6.3. *Fase di stimolo*, 419 – 17.6.4. *Fase d'elaborazione*, 419 – 17.6.5. *Fase di risposta*, 420 – 17.6.6. *Effetti degli stressori sull'immunità*, 420 – 17.7. Studi su animali, 420 – 17.8. Studi sull'uomo, 421 – 17.9. Relazione tra stress, sistema immunitario e patologie, 422 – 17.10. Analisi e ricerca degli eventi stressanti, 424.

Presentazione

Spesso, la principale motivazione per la stesura di un nuovo testo è la mancanza di un manuale adatto agli studenti che frequentano i propri corsi. Si cerca, così, di approntare un'opera che eviti il ricorso continuo a dispense, appunti e fogli vari che complicano uno studio puntuale e lineare e nello stesso tempo consenta una rapida consultazione per dubbi o approfondimenti.

Il testo diventa quindi uno strumento di lavoro molto personale che, a sua volta, sarà di difficile adozione da parte di altri docenti che lo troveranno lontano dalle proprie esigenze didattiche determinandone precoci abbandoni.

È quindi una grande soddisfazione presentare l'opera dei Professori Baudo e Perin che hanno percepito la possibilità, apparentemente remota, di coniugare conoscenze ed esperienze maturate in campo applicativo e didattico così distanti tra loro.

Si presenta quindi coronato da successo il tentativo di risolvere le difficoltà che, in genere, incontrano sia gli studenti che si indirizzano verso lo studio delle scienze ambientali, sia gli operatori e le istituzioni, nell'affrontare le tematiche ambientali, le loro interconnessioni e soprattutto gli effetti e il destino delle sostanze tossiche nei vari comparti. Infatti, tali interconnessioni sono interpretabili solo a condizione che si esaminino i vari aspetti (chimici, fisici e biologici) che incidono sui processi di distribuzione delle sostanze inquinanti nelle varie matrici e sui loro effetti sul biota.

Da qui la necessità di affrontare l'ecotossicologia sotto i diversi ma necessari punti di vista di un chimico e di un biologo in un lavoro a quattro mani, caratterizzato da un linguaggio piuttosto semplice, oltre che informale e accattivante (almeno per gli addetti), nella successione delle argomentazioni affrontate e della loro spiegazione ed interpretazione. Il testo è caratterizzato da uno stile narrativo mirato e da una grande quantità di esempi che consentono una facile lettura ed una rapida comprensione dei concetti.

Assolutamente non possiede una impostazione nozionistica, ma raggiunge un livello di approfondimento pregevole portando per mano il lettore da argomenti di base fino a ragionamenti complessi. Inoltre, l'opera tiene conto del fatto che il principale fruitore (leggi soprattutto studenti) è in genere poco abituato a continui riferimenti di chimica, fisica o passaggi matematici, perché discipline di base

che si affrontano durante i primi anni di università, mentre il vasto campo della biologia spesso non è neppure affrontato nei corsi di studio per chimici, ingegneri e architetti anche se, professionalmente, si indirizzano alle problematiche ambientali di intervento e risanamento.

Esistono ottimi libri di Chimica Ambientale ed altrettanti di Ecotossicologia, ma l'Ecotossicologia Quantitativa Applicata è una fonte nella quale si riesce a trovare, oltre ad una trattazione rigorosa dei principi dell'ecotossicologia, anche uno studio approfondito della chimica dei processi che si verificano nell'aria, nelle acque e nel suolo partendo dal presupposto che sia più appropriato affrontare tematiche complesse e multidisciplinari con una solida base chimica.

Il testo trasmette al lettore la passione per la scienza degli Autori ma anche la meticolosità ed il rigore di relazioni, processi e verifiche. L'attenzione estrema ai bisogni degli studenti, maturata in anni ed anni di insegnamento, ha condotto alla presentazione di figure e tabelle esplicative di immediata comprensione ed interpretazione che arricchiscono enormemente il testo.

Riteniamo che, oltre all'obiettivo di fornire gli strumenti per la comprensione dei meccanismi che sono alla base dei fenomeni ecotossicologici, l'obiettivo finale di quest'opera sia di rendere il fruitore in grado di utilizzare le conoscenze acquisite in modo critico per la propria professione allo scopo di valutare i rischi legati alla presenza di xenobiotici nell'ambiente, limitarne l'ingresso, applicare tecnologie per rimuovere gli inquinanti ed identificare i sistemi di risanamento più adatti.

Come docenti intendiamo ringraziare gli autori per la loro opera che rappresenta non solo un testo universitario valido per tutti i Corsi di Laurea ad indirizzo chimico-biologico-ambientale, ma anche un'ottima guida per professionisti, ricercatori, dottorandi e cultori della materia.

Caserta, Dicembre 2009

Prof.ssa Marina Isidori
Prof. Alfredo Parrella

Dipartimento di Scienze della Vita
Facoltà di Scienze MFN
Seconda Università di Napoli

Introduzione all'Ecotossicologia

L'Ecotossicologia nei confronti delle scienze, delle scienze ambientali e dell'ecologia

L'Ecotossicologia si pone, nell'ambito delle Scienze e delle Scienze Ambientali, in particolare, in una posizione apicale non perché sia superiore alle altre scienze ma perché rappresenta il coacervo delle stesse.

Senza la conoscenza di tutte le discipline scientifiche (almeno in una certa misura), non è possibile o è piuttosto difficile comprendere completamente la Ecotossicologia.

Per questo abbiamo ritenuto di inserire in questa introduzione, alcune parti di un ottimo lavoro del Prof. Alessandro Marani, dell'Università Ca' Foscari di Venezia.¹

Afferma Marani:

«Lo studio dell'ambiente presenta alcune peculiarità per le quali è opportuno riconsiderare il metodo scientifico nella forma che viene normalmente utilizzata dai ricercatori delle discipline classiche. Le revisioni riguardano gli strumenti e le modalità di lavoro per rendere riproducibili le esperienze condotte su fenomeni che non possono ripetersi né possono essere ricostruiti in laboratorio».

Si tratta di metodi che erano latenti nel pensiero scientifico del passato, ma che in difetto di esplicazione erano stati relegati a ruoli marginali o ignorati del tutto per pigrizia e povertà culturale dei ricercatori.

La difficoltà a sviluppare nuovi metodi rispetto alla facilità di fare misure in modo acritico ha condizionato le ricerche in campo che per molto tempo sono state condotte sulla falsa riga di quelle di laboratorio ipotizzando che lisimetri, parcelle, modelli fisici in scala e nicchie ecologiche fossero sufficienti a surrogare l'ambiente.

Di fatto la riproducibilità degli esperimenti che è richiesta dall'approccio scientifico alla conoscenza è ben altra cosa perché i fattori dell'ambiente sono tali e tanti che non possono essere tutti coscientemente contemplati quando si realizza un simulacro della natura o di una sua parte. In questa ottica anche le misure dirette devono essere guidate dagli obiettivi soprattutto perché il modo di effettuare il prelievo dei campioni da mandare all'analisi

non è indipendente dalla conoscenza che si cerca di acquisire.

Con lo scopo di porre delle domande nella direzione abbozzata e di impostare adeguate risposte vengono nel seguito esaminati e schematizzati i processi della conoscenza usuale e della conoscenza scientifica in modo da stabilire i passaggi che caratterizzano e distinguono le due modalità di conoscere.

Inoltre, partendo dalla classificazione moderna delle scienze, si introduce una nuova categoria delle scienze della natura, quella delle scienze ambientali appunto, che per definizione deve operare con esperimenti e misure effettuate direttamente nell'ambiente senza perturbarne i funzionamenti.

Questa caratteristica richiede che *le scienze ambientali siano multidisciplinari* e che adottino metodi di verifica scientifica basati sulla riproducibilità modellistica degli eventi che per loro natura non sono né riproducibili né ripetitivi (troppi fattori in gioco per riprodurli fedelmente e perché si ripresentino con le stesse modalità. Ovvero il cinese seduto sulla sponda del fiume ad aspettare il cadavere del suo nemico anche se lo vede passare non potrà farlo una seconda volta).

Saranno anche analizzati i risvolti di politica ambientale e quelli legati alle valutazioni di impatto. A questo riguardo saranno discussi termini di dominio pubblico usati con modalità equivoche spesso alimentate ad arte come avviene per lo "sviluppo sostenibile", la "educazione ambientale", il "ripristino ambientale", ecc.

Infine volendo completare questa introduzione con un cenno storico, si ricorda che per molto tempo, nel passato, la scienza è stata onnicomprensiva del sapere ed i filosofi ne furono i detentori, come, del resto, nelle comunità primitive lo sono ancora gli stregoni e i saggi. Galileo coltivava, come del resto i suoi colleghi contemporanei, una vasta gamma di interessi e solo nel secolo scorso il sapere si è specializzato in settori: fisica, matematica, chimica, medicina, ecc.

La specializzazione ha caratterizzato tutto il xx Secolo e la sua applicazione talvolta esagerata ha dato il destro al paradosso secondo cui lo specialista, approfondendo sempre di più un settore sempre più ristretto, finisce per sapere tutto di nulla.

La specializzazione e l'applicazione oltranzista di criteri riduzionisti hanno talvolta sviato la lettura

1. Si ringrazia il Prof. Sandro Marani per l'autorizzazione.

dei dati sperimentali e creato difficoltà di comunicazione fra le discipline. Bisogna arrivare alla scoperta del “caos” effettuata nel 1962 da un meteorologo del MIT, per valutare i limiti del metodo riduzionista² chiaramente espressi dall’effetto farfalla, per il quale il battito delle ali di una farfalla in Brasile può scatenare (ed equivalentemente anche inibire) un uragano in Texas: ovvero cause anche piccolissime possono produrre effetti grandissimi.

Spesso l’effetto farfalla viene interpretato in senso negativo (piccole cause possono produrre catastrofi), ma vale anche un’interpretazione ottimistica per la quale piccole cause possono evitare catastrofi.

Per stabilire i significati dell’ambiente in chiave scientifica è utile ricordare criteri e metodi in uso con successo nelle varie discipline cercando di rileggerli nella prospettiva dei nuovi problemi che hanno la peculiarità di essere interdisciplinari, multiscala e dinamici.

L’interpretazione dei fenomeni va rivista cercando di superare i settorialismi e le barriere linguistiche delle singole discipline ricorrendo anche ad esemplificazioni paradossali.

Il Metodo scientifico

Il termine “scienza” indica il sapere inteso come insieme organico di conoscenze correlate in modo logico. Si riferisce ad un tipo di conoscenza che ha in sé il metodo per verificare gli enunciati in modo da garantire la propria validità. Come tale, la scienza rappresenta il grado massimo della certezza ed è l’opposto dell’*opinione* che, invece, caratterizza l’assenza di garanzie.

Le componenti metodologiche fondamentali della scienza sono:

la *deduzione* che, partendo da principi indimostrabili (postulati o assiomi), sviluppa proposizioni consistenti fino anche a costituire l’intero apparato della disciplina (come nel caso delle scienze formali: logica, matematica e geometria);

l’*induzione* (presente nelle scienze della natura: chimica, fisica, biologia e geologia), che si basa sulla riproducibilità degli esperimenti e sulla verifica delle ipotesi poste per costruire le leggi di relazione tra i dati ottenuti con gli esperimenti;

la *tassonomia*, che costituisce la componente sistematica (classificatoria e descrittiva) necessaria e preliminare per tutte le discipline scientifiche.

2. Con il termine riduzionismo si indica un indirizzo epistemologico che traduce teorie, concetti e linguaggi di una disciplina in quelli di un’altra. Nel presente contesto il termine è usato in contrapposizione al termine “olismo”.



Figura 1. Schema di processo cognitivo semplice (opinione).

Una *metodologia* è l’insieme dei protocolli (norme e tecniche) di ricerca di cui si avvale una disciplina. Ogni metodologia per essere *scientifica* deve comprendere una fase tassonomica ed almeno una delle due fasi logiche di induzione e deduzione. La prima stabilisce il vocabolario sul quale operano (una o tutte e due) le componenti logiche.

Lo schema procedurale

La *conoscenza* dell’uomo deriva delle sue capacità di “rendere concettuali” le proprie osservazioni attraverso processi cognitivi del tipo schematizzato.

La *conoscenza scientifica* costituisce una parte della conoscenza umana e si ottiene completando il processo con l’introduzione di un ciclo di verifica.

Le verifiche si possono effettuare solo potendo disporre di simulatori che permettano di riprodurre gli oggetti ed i comportamenti da verificare. Si noti come anche il metodo scientifico non possa prescindere dalla fase soggettiva compresa nell’operazione di concettualizzazione propria dello schema (Fig. 1).

Per quanto riguarda i dati è bene tener presente che essi non derivano necessariamente da operazioni di misura (dati sperimentali), ma possono essere anche prodotti da operazioni concettuali (dati teorici, simulazioni, stime, ecc.) ed essere anche qualitativi.

Naturalmente, solo se le osservazioni di partenza sono *quantitative* si può raggiungere una conoscenza *quantitativa*, altrimenti il risultato sarà qualitativo. Ad esempio, qualche anno fa, un tale si diceva capace di piegare, tramite forze extrasensoriali, degli oggetti metallici. La *percezione dell’evento* era qualitativa (oggetti metallici che si piegano), il modello concettuale era che la piegatura avvenisse ad opera di forze non muscolari (“del pensiero”?) che quel tale diceva di saper controllare. Interrotto a questo punto, il processo cognitivo è quello abituale.

Alcuni ricercatori hanno sottoposto il tale a prove in condizioni diverse (simulazioni fisiche: Fig.

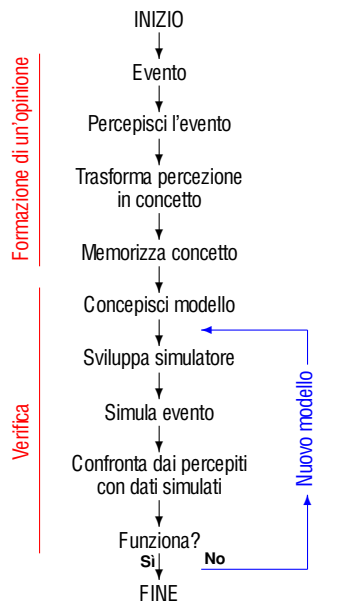


Figura 2. Schema logico del metodo scientifico.

2), con risultati non convincenti (è mancata la verifica per l'impossibilità di riprodurli) e si è deciso che il modello delle "forze extrasensoriali" non funzionava.

Altri (illusionisti di professione) hanno mostrato (nuovi eventi) che la piegatura era possibile con trucchi di prestidigitazione indicando come accettabile il modello della illusione (che si è visto essere riproducibile).

Allora non rimase altro che interrompere gli esperimenti in attesa di eventuali nuovi eventi capaci di promuovere il modello delle "forze extrasensoriali". Come si è detto, *l'osservazione era qualitativa* ed il risultato (quel tale era un impostore) non poteva che essere *qualitativo*.

Le discipline scientifiche

L'uomo accumula conoscenza basandosi su strumenti, metodi e ritrovati propri della *filosofia*, disciplina che studia i principi generali comuni alle varie branche del sapere e del conoscere essendo queste distinte in metafisica, estetica, epistemologia, gnoseologia, etica. La filosofia antica colloca tutta la conoscenza della natura nella *fisica* quale contrapposto della *metafisica* (o viceversa). Ai giorni nostri però la fisica è diventata una disciplina specifica del sapere scientifico come lo sono la chimica, la biologia, ecc.

In effetti il termine *scienza* designa il complesso di tutte le discipline che studiano sistematicamente un campo o un aspetto della realtà, intesa come la totalità degli oggetti dei quali la ragione afferma e giustifica l'esistenza.

Già Aristotele aveva stabilito che la scienza non è una semplice raccolta o descrizione di cose ed avvenimenti, ma un sapere organico, fondato sull'esperienza e costruito con la ragione, che indaga le connessioni tra i fenomeni.

Il termine scienza cominciò a contrapporsi a quello di filosofia nel tardo Seicento precisando che la scienza deve studiare il come, non il perché dei fenomeni e deve limitarsi a ricercare le leggi di natura, non le spiegazioni ultime della realtà.

Progressivamente la scienza ha accentuato sempre più il ricorso all'esperimento, come criterio di prova, ed alla matematica come strumento logico, per esprimere quantitativamente le caratteristiche dei fenomeni e le relazioni fra gli oggetti.

Oggi si ritiene che la differenza fra filosofia e scienza riguardi sia gli argomenti di studio, sia le metodologie usate. Alla scienza spettano i problemi generali verificabili empiricamente, alla filosofia quelli universali non verificabili con esperimenti.

La *metafisica* è quella parte della filosofia che studia l'essere in quanto tale ricercandone i principi primi. Il nome deriva da Aristotele che ha trattato l'essenza della realtà collocandola dopo (*meta*) quella della natura (*fisica*).

Il prefisso assunse poi il significato di "al di là, sopra" e la metafisica divenne la conoscenza assoluta, in grado di fornire i principi generali e universali, sulla base dei quali sviluppare le singole scienze.

Questa concezione della metafisica venne rigettata sia dall'Illuminismo che dal Positivismo ed il pensiero filosofico attuale respinge ogni filosofia che abbia la pretesa di spiegare in modo definitivo e universale tutta la realtà.

Il termine *estetica* indica la conoscenza delle cose sensibili ed è stato impiegato con riferimento a tutto quello che è *bello*. Originariamente Platone separò il bello, come idea, dall'attività artistica, considerata come imitazione. Il Vico rivendicò l'autonomia dell'arte come conoscenza, che si estrinseca tramite la fantasia, ed il positivismo classificò empiricamente le varie arti.

L'*epistemologia* è la disciplina filosofica che studia i fondamenti, la natura e i limiti della conoscenza scientifica e si propone di individuare criteri rigorosi per distinguere i giudizi scientifici da quelli di opinione (problemi morali, religiosi, metafisici, ecc.).

La *gnoseologia* è quella parte della filosofia che si occupa del problema della conoscenza, cioè dell'origine, della natura, del valore e dei limiti della nostra facoltà di conoscere, ovvero del rapporto tra la mente umana e la realtà considerata come esterna ed indipendente dal pensiero che la conosce. Quindi, la gnoseologia si distingue dalla logica che studia invece le norme del pensiero per stabilire i

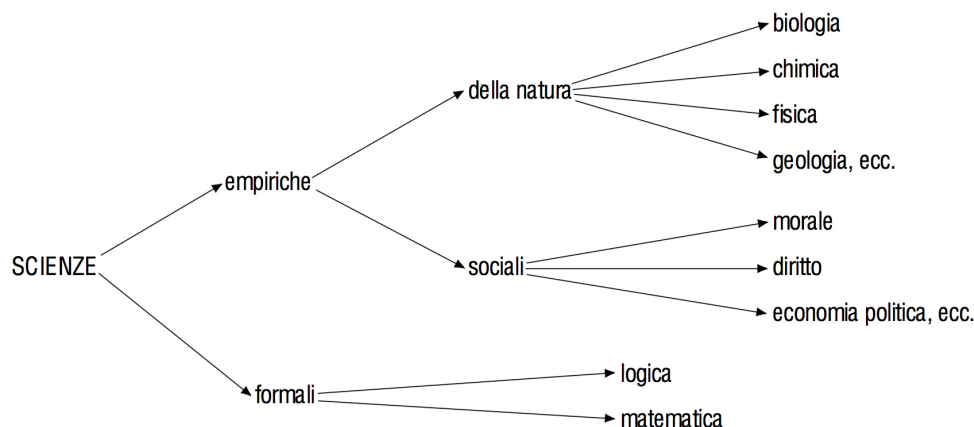


Figura 3. Schema di classificazione delle scienze. Le Scienze Ambientali non compaiono nella classifica perché non sono una disciplina ma un metodo.

criteri di verità e di errore prescindendo dalla realtà dell'oggetto. La gnoseologia si distingue anche dalla epistemologia che studia i criteri della conoscenza scientifica disinteressandosi della corrispondenza fra fenomeni e realtà in sé.

L'*etica* è quella parte della filosofia che ha come oggetto i valori morali che determinano il comportamento dell'uomo. Può essere *descrittiva* se descrive il comportamento umano e *normativa* o *prescrittiva* se fornisce indicazioni.

La *fisica* indaga i fenomeni naturali accoppiando metodi sperimentali ed elaborazioni matematiche in modo da formulare un sistema di leggi che di tali fenomeni permettano una conoscenza razionale e scientificamente corretta. Si inizia a parlare di fisica nell'accezione attuale a partire dal Rinascimento grazie a Galileo ed a Newton.

Con l'introduzione di alcuni concetti fondamentali di conservazione e di invarianza, la fisica diventa moderna e si dedica alla unificazione delle leggi della natura attraverso teorie sofisticate che, pur allontanandola da altre branche della scienza quali la biologia, l'astronomia, ecc., continua a fornire loro un solido supporto teorico ed un valido modello metodologico.

Per quanto riguarda la classificazione delle discipline scientifiche (Fig. 3), si distinguono le *scienze formali* che riguardano la struttura astratta del pensiero o degli elementi numerici (logica³ e matematica) da quelle *empiriche* che comprendono le *scienze della natura* (quelle che studiano i fenomeni naturali) e le *scienze sociali* (quelle che studiano i rapporti fra gli uomini: morale, diritto, economia, politica, filologia, ecc.). Rimangono escluse dallo schema le

discipline storiche alle quali, però, molti negano la qualifica di scienze.

Si deve ad Aristotele (che esaminò i concetti, le categorie, le proposizioni, i termini e i sillogismi) la prima formulazione della logica come scienza indipendente. Bacone cercò di costruire una nuova metodologia basata sull'induzione impostando la logica come strumento di indagine scientifica. Cartesio cercò di stabilire se il rigore tipico di un discorso matematico potesse essere alla base di qualsiasi sapere, compreso quello filosofico. Leibniz e i suoi seguaci cercarono di unificare il complesso delle strutture logiche in un linguaggio scientifico universale (logica simbolica).

Nella seconda metà del XIX secolo la logica torna a studiare gli aspetti formali del linguaggio (logica formale) portando alla creazione della logica matematica.

È fondamentale la consapevolezza (presente già in Aristotele) della distinzione tra *logica* e *gnoseologia*. La prima infatti riguarda i modi e le forme del ragionamento mentre la seconda studia ciò su cui si ragiona.

La *matematica* è nata nell'antichità come scienza cognitiva legata ai numeri (aritmetica) ed alle figure (geometria).

I greci ne fecero una scienza deduttiva, costruendo un sistema di assiomi sulla base dei quali studiare le varie entità cui essa era applicata.⁴ Da scienza delle entità numeriche e geometriche si è trasformata in logica (*logica matematica*) grazie a Boole ed a De Morgan che formalizzarono il simbolismo e il sistema di calcolo studiati due secoli prima da Leibniz.

3. La logica, talvolta definita come la "scienza delle leggi del pensiero", sviluppa le regole del linguaggio scientifico e studia i metodi e i principi che consentono di distinguere, nelle loro strutture formali, i ragionamenti corretti da quelli scorretti.

4. L'esigenza di precisare i significati dei termini del linguaggio e le regole del ragionamento nasce nella filosofia greca quando alcuni sofisti mostrarono come molti paradossi si sarebbero potuti evitare usando parole non equivoche.

Le Scienze della Natura

Le scienze della natura comprendono numerose discipline che si svilupparono con modalità diverse anche se, nell'attuale concezione, vengono tutte riferite a Galilei cui si attribuisce il merito di aver introdotto un metodo di lavoro comune basato sulla sperimentazione.

Il metodo scientifico consiste nell'osservare un fenomeno e concettualizzarlo in modo da renderlo riproducibile. A sua volta, la riproducibilità richiede che si realizzi un modello operativo del fenomeno con il quale chiunque possa verificare le osservazioni effettuate.

La verifica si effettua inserendo un ciclo logico interno alle funzioni, proprie della conoscenza generica descritta. Convienne in ogni caso osservare come anche il sapere scientifico abbia pur sempre (anche quando si effettuano i cosiddetti esperimenti pratici) una componente soggettiva che proviene dalle operazioni di "percezione dell'evento" e di sviluppo di un modello concettuale dell'evento percepito. In questa ottica, spesso è anche pretenzioso stabilire classifiche di "verità" nei contenuti di lavori condotti con rigore scientifico.

Gli eventi

Nella descrizione delle figure si parla di eventi e della loro percezione per intendere l'informazione che si riceve su oggetti e fenomeni attraverso i sensi (direttamente o tramite prolungamenti, ovvero strumenti di misura e di osservazione). La trasformazione della percezione sensoriale in conoscenza avviene tramite trasferimento della sensazione al pensiero.

La percezione di un evento avviene tramite un "modello mentale" dell'evento che riporta necessariamente valutazioni personali. Queste, siano esse di tipo qualitativo o quantitativo, diventano verificabili solo quando vengono inserite in un modello "esportabile".

Per effettuare un tale passaggio è necessario costruire un "vocabolario" (fase tassonomica) per comunicare ad altri le proprie percezioni ed uno strumento di confronto per effettuare operazioni logiche. Solo allora si potrà dire che "un oggetto è un tavolo" (modello esportabile) perché la parola tavolo avrà un significato (tassonomia) che sarà indipendentemente dalle sue dimensioni.

È immediato osservare che descrivendo un tavolo si possono fornire attributi qualitativi (ad esempio è di legno) ed attributi quantitativi (è lungo due metri).

Questi attributi vengono indicati con il termine di "dati" ed acquistano una connotazione scientifica solo se vengono precisati in ordine al metodo di acquisizione: ad esempio la natura lignea del tavolo potrebbe non essere certa se l'osservazione è fatta da lontano e la lunghezza potrebbe essere diversa se misurata con un calibro o con un metro. Il corredo di queste precisazioni costituisce il "metadato" del dato «tavolo di legno lungo due metri». In altre parole i dati sono le informazioni relative all'oggetto ed i metadati sono le informazioni relative ai dati.

I modelli ed i simulatori

Nello schema logico del modello scientifico (Fig. 2) sono stati utilizzati due termini, *modello* e *simulatore*, con significati che è opportuno precisare anche perché nel linguaggio comune vengono spesso accreditati di accezioni discoste da quelle dell'attuale contesto.

Il *modello*, in matematica e fisica, è la riproduzione schematica di un fenomeno o di un sistema.

Costruendo uno schema dell'ente o fenomeno da studiare, in modo tale che il comportamento dello schema corrisponda all'evento reale, si realizza un *modello teorico*. È quindi possibile applicare il modello a sistemi di elaborazione elettronica, eliminando via via le semplificazioni e le approssimazioni introdotte per poter studiare il fenomeno.

In alcuni campi, quali la fisica atomica, la meccanica quantistica e la teoria della relatività, l'uso di modelli rappresenta l'unico sistema possibile d'indagine.

Del modello teorico fa parte il *modello matematico*, ovvero l'insieme di ipotesi ed equazioni quantitative necessarie per spiegare il fenomeno.

Il quadro dovrebbe essere sufficiente per rendere ragione della preoccupazione espressa nei confronti di possibili lacune di chiarezza e dell'utilità di alcune precisazioni. In particolare, risalta la varietà dei significati e le parziali sovrapposizioni di alcune voci il cui uso in funzione di sinonimi può produrre confusione di significati. Inoltre, l'idea che solo la matematica e la fisica usino "modelli teorici" per studiare oggetti ed eventi reali è fuorviante.

Infatti, una qualsiasi conoscenza umana e non (anche gli animali conoscono ed accumulano conoscenza) richiede astrazioni.

Con l'intento di ridurre gli equivoci, nel presente contesto si useranno i seguenti significati: (i) *modello*, ogni "strumento" in grado di rappresentare un evento e (ii) *simulatore*, ogni "strumento" in grado

di riprodurre eventi, cioè di rappresentarli in modo verificabile.

In altre parole, il termine modello ha l'accezione più generale potendo rappresentare un evento anche in modo opinabile mentre il termine simulatore si riferisce a modelli verificabili.

Ovvero, un simulatore è sempre un modello, ma non viceversa.

Un esempio che può dare un'idea della generalità dei termini e caratterizza in modo paradossale il concetto di simulazione fornendo anche una nota frivola al discorso, è un film distribuito negli USA nel 1947 con il titolo di "Magic Town". Il film narra la storia di un opinionista, Rip Smith (interpretato da James Stewart) che scopre un "miracolo matematico" in una cittadina chiamata Grandview: la comunità di Grandview pensa esattamente come l'intera comunità USA. Smith ed un suo compare usano Grandview come modello comportamentale degli USA.

Il film, depurato delle vicende accessorie, ricorda che cercare un modello equivale a cercare Grandview.

Non importa se la cittadina ha le sembianze di un marchingegno di laboratorio (modello fisico) o di un algoritmo⁵ (modello formale) purché emuli il sistema da studiare.

A completamento di quanto detto si osserva che la simulazione di un ambiente e dei suoi comportamenti si effettua con l'obiettivo di interpretare e/o prevedere.

Non sempre però l'interpretazione e la previsione si effettuano con lo stesso strumento. In particolare, per interpretare un processo è sempre necessario collegare le cause con gli effetti e ciò si raggiunge:

sempre con simulatori deterministici che stabiliscono nessi certi fra le variabili (dipendenti e indipendenti)

non sempre con simulatori stocastici che stabiliscono invece nessi statistici.

D'altra parte i simulatori deterministici non sono in grado di tener conto delle componenti casuali (fluttuanti) sempre presenti nei processi ambientali. Per questo i simulatori deterministici e quelli stocastici spesso sono di fatto complementari gli uni agli altri e non si possono classificare in contrapposizione fra loro esistendo simulatori buoni e cattivi sia nella categoria di quelli deterministici che in quella dei simulatori stocastici.

5. Algoritmo: Insieme di regole e procedure di calcolo che permettono di risolvere un problema con un numero finito di operazioni; il nome deriva da quello del matematico arabo al-Khuwarizmi (IX sec.)

Il metodo scientifico nelle discipline classiche

Il metodo scientifico può essere applicato con diverse modalità perché la simulazione degli eventi percepiti può essere effettuata con modelli diversi.

Nel caso delle discipline classiche i simulatori sono modelli fisici, cioè apparati (generalmente di laboratorio) che rendono il fenomeno allo studio riproducibile anche da terzi.

Emblematiche al riguardo le vicende della "fusione fredda"⁶ quando, in una famosa conferenza tenuta il 23 marzo 1989, Martin Fleischmann e Stanley Pons (Università dello Utah) annunciarono di aver ottenuto significative quantità di energia usando una cella elettrolitica a temperatura ambiente.

L'annuncio ebbe grande rilievo sui *media*, ma, soprattutto, mise in agitazione il mondo scientifico che stigmatizzò l'evento o sperò nella conclusione della sfida energetica, la maggiore fra quelle attuali.

Purtroppo il processo non è mai stato riprodotto e quindi oggi si dubita della sua realizzabilità anche se poggia su basi non del tutto peregrine. Ora non si mettono in discussione le capacità di Fleischmann e Pons, ma la loro affidabilità scientifica per aver voluto annunciare un risultato non ancora verificato.

La vicenda mostra anche come il metodo scientifico abbia in sé gli strumenti per la certificazione

6. In campo nucleare la fusione è una reazione fra nuclei di Deuterio (isotopo D dell'Idrogeno H) che forma nuclei di Elio (He). Si ottiene con urti ad alta temperatura e produce grandi quantità di energia residua. La fusione fredda è la stessa reazione realizzata a temperatura ambiente producendo le stesse quantità di energia residua e dovrebbe avvenire fra nuclei di deuterio dispersi in un solido. L'idea della fusione fredda ha le sue radici in ricerche degli anni Venti e si basa sull'ipotesi che gli atomi di idrogeno e dei suoi isotopi (Deuterio e Tritio) possano permeare particolari strutture solide fino a raggiungere concentrazioni tanto elevate da far sì che i loro nuclei si avvicinino l'un l'altro più di quanto previsto per la loro fase solida. L'addensamento sarebbe anche favorito dal fatto che le cariche elettriche negative degli elettroni del solido ospite sopprimerebbero parzialmente la repulsione fra i nuclei. Gli esperimenti del passato non rilevarono alcun segno di fusione e moderni calcoli mostrerebbero che gli effetti proposti se ci fossero risulterebbero comunque troppo piccoli per essere misurabili. Tuttavia, alla fine del secolo scorso, l'elettrochimico Martin Fleischmann ed il fisico Stanley Pons decisero di rivisitare la fusione fredda facendo passare corrente elettrica in una cella elettrolitica costituita da un catodo di Palladio, da un anodo di Platino e da un elettrolita di LiOD (un composto di Litio, Ossigeno e Deuterio) in acqua pesante (acqua contenente Deuterio al posto di Idrogeno). La reazione catodica libererebbe atomi di Deuterio che entrerebbero nel Palladio molto più rapidamente delle molecole di Deuterio. In condizioni appropriate la concentrazione arriverebbe e supererebbe 0,9 atomi di Deuterio per atomo di Palladio e la perdita di Deuterio sarebbe bilanciata dalla velocità con la quale il Deuterio entra nel Palladio. Le celle elettrolitiche di Pons e Fleischmann erano parte di un calorimetro (apparecchio che misura il calore) la cui temperatura sarebbe aumentata in alcune occasioni indicando una produzione termica netta dell'ordine del 10% rispetto alla potenza elettrica consumata per alimentare la cella. Fleischmann e Pons pensarono anche di aver misurato radiazione gamma emessa da neutroni rallentati dall'acqua. Ma questi risultati sono stati successivamente ritrattati.

ne dei propri risultati e garantisca una ragionevole oggettività delle osservazioni.

A questo proposito è interessante notare che, come già osservato, anche la conoscenza scientifica è mediata da operazioni soggettive, ma che il metodo permette di contenere entro limiti ragionevoli gli aspetti negativi di aleatorietà. In altre parole, ogni osservazione ha un contenuto informativo che va a beneficio solo di chi l'ha effettuata quando questi la fornisca senza produrre tutte le notizie necessarie per verificarla.

L'insieme di queste notizie viene indicato con il termine di *metadati* che costituiscono un accessorio del dato (il dato esiste anche senza i suoi metadati), ma ne *fornisce la connotazione scientifica*. Inoltre, i dati possono essere confrontati solo se i relativi metadati lo consentono e quindi ogni operazione con essi, a partire da quelle di relazione (maggiore, uguale e minore), è possibile solo dopo averne valutato le caratteristiche, ovvero i metadati.

Ed ogni considerazione sulla qualità di una qualsiasi informazione è demandata alla qualità dei suoi metadati. Infine, si deve tener presente che, in generale, il giudizio sul contenuto informativo di un dato scientifico compete solo all'utente (non al produttore) al quale spetta decidere se quel dato è coerente con il particolare contesto nel quale intende utilizzarlo. Per non rimanere nel vago, la lunghezza di un tavolo ottenuta con il metro o a spanne può avere lo stesso contenuto informativo se si deve decidere sulle dimensioni della tovaglia da usare per imbandirlo ed un contenuto diverso se lo si deve far passare per una porta.

Il metodo scientifico nelle scienze ambientali

È ambientale ogni disciplina che basa la sua conoscenza su osservazioni raccolte direttamente nell'ambiente e lo fa senza perturbarlo.

Le discipline classiche si distinguono da quelle ambientali perché operano con eventi artificiali che realizzano in laboratorio o isolando (e quindi perturbando) porzioni di eventi naturali (vedi ad esempio, le "nicchie ecologiche" degli ecologi).

Nella tabella 1 è schematizzata la situazione delle scienze in relazione agli eventi che studiano ed alle verifiche (simulatori) che attuano. Il punto interrogativo stigmatizza l'impossibilità di simulare eventi naturali con modelli fisici. Le scienze classiche effettuano le osservazioni realizzando esperimenti in laboratorio (eventi artificiali) e producono le verifiche ripetendo e/o variando gli eventi, eventualmente inquadrando in schemi formali le informazioni raccolte.

Tabella 1. Schema di approcci scientifici applicati a diverse tipologie di eventi.

	Simulatori	
	Fisici	Formali
Eventi artificiali	scienze classiche	scienze classiche
Eventi naturali	?	scienze naturali

Le scienze ambientali trattano eventi naturali che, per definizione, non possono essere ripetuti e quindi non hanno alternative all'uso di simulatori formali⁷. In questo senso le scienze ambientali non sono una disciplina, ma un metodo scientifico e vengono indicate al plurale perché necessariamente multidisciplinari dovendo studiare gli eventi nella completezza della loro struttura fenomenica.

Il Riduzionismo

Il "Riduzionismo" è argomento caro ai fisici ed ai filosofi che lo classificano secondo tipologie diverse, indicando un qualsiasi indirizzo epistemologico imperniato sulla trasposizione di teorie, concetti e linguaggi derivate da altre discipline. In particolare, si fa del Riduzionismo tutte le volte che si studia un processo simulandolo con un altro come, ad esempio, quando con un esperimento di laboratorio si cerca di riprodurre un evento naturale od una sua parte.

Questa forma di Riduzionismo è alla base delle usuali discipline sperimentali ed implica la possibilità di scomporre i processi in componenti separabili e di isolarne parti per riprodurle con strumenti appropriati.

Talvolta a questi concetti si contrappongono altri che vengono indicati come olistici, ma più propriamente, il termine *Olistismo* indica una teoria biologica generale che deriva dal *Vitalismo* secondo il quale le manifestazioni vitali degli organismi devono essere interpretate sulla base delle relazioni e delle dipendenze funzionali fra le parti che costituiscono l'individuo.

Il significato è stato esteso ad indicare la necessità di considerare i sistemi come entità partecipi del loro ambiente e da esso non segregabili. In ogni

7. Simulatori formali. L'attributo di "formale" ai termini "simulatore" e "modello" viene in questo contesto usato per indicare schemi che comprendono quelli matematici, ma anche loro generalizzazioni. Più precisamente di solito si tratta di algoritmi implementabili su calcolatore che non sempre possono fregiarsi del titolo di matematico come ad esempio i "sistemi esperti". In altre parole il termine si riferisce allo schema di figura 3.

caso, al di là delle distinzioni, la natura olistica dei sistemi naturali è compresa nel concetto di sistema e nel grande numero di fattori e connessioni che l'attributo di *naturale* gli conferisce.

L'ambiente

Il concetto di *ambiente* è così semplice che si presta ad equivoci e viene spesso confuso con quello meno generale di *ecosistema*.

Una definizione conformata ai valori attuali non può, infatti, essere riferita ai soli organismi viventi e va estesa in modo da far riferimento ad oggetti qualsiasi, animati o meno.

Cioè, si può introdurre l'*ambiente di un oggetto* come l'insieme degli oggetti interagenti con esso e, di conseguenza, l'*ambiente* senza specificazione come l'*insieme degli ambienti di tutti gli oggetti terrestri*.

Allora l'ecosistema di un organismo vivente è l'ambiente di quell'essere e non ha senso parlare di ecosistema senza precisare a chi si riferisce. Invece, per quanto riguarda l'ecologia non è improprio parlarne senza specifica perché è la scienza degli ecosistemi. Importante è anche confrontare i termini "ambiente" ed "ecosistema" con quello di "habitat" che indica il complesso dei fattori fisici e chimici del territorio in cui vive una specie animale o vegetale.

Proseguendo ad esplicitare il significato dei termini è bene tener presente che un ambiente può essere teorico (ad esempio, nel caso del problema matematico preda-predatore, la preda è l'ambiente del predatore e viceversa ed in entrambi i casi si tratta di un ambiente teorico) o reale ed in questo caso può essere artificiale (gli ambienti artificiali sono sempre antropici) o naturale. In contrapposizione un ecosistema è da intendere sempre naturale.

Ancora qualche precisazione è utile per quanto riguarda il termine *sistema* che deve essere inteso come *un insieme di oggetti al completo delle loro interazioni* ed in tal senso costituisce, per certi aspetti, una generalizzazione del concetto di ambiente (perché considera anche le interazioni fra gli oggetti che prende in esame) e per altri una sua riduzione (perché si riferisce agli oggetti che si desidera prendere in esame mentre l'ambiente riguarda tutti gli oggetti che interagiscono con un oggetto prefissato).

In altri termini, l'ambiente di un oggetto è l'insieme degli oggetti che costituiscono il sistema naturale di quell'oggetto indipendentemente dal tipo delle interazioni con esso.

È importante osservare che il concetto di ambiente, come nasce dalle osservazioni precedenti, implica varietà di scale sia spaziali che temporali. Problema che oltre a complicare lo studio, la descrizione e la

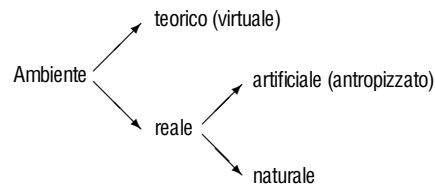


Figura 4. Ambiente teorico e ideale.

rappresentazione dei diversi ambienti, rende singolare e nuovo, rispetto al passato, l'approccio scientifico.

Le scienze ambientali

Le scienze ambientali devono rispondere a due requisiti:

- essere "scienze" e quindi soddisfare il criterio fondamentale della riproducibilità (replicabilità) del dato;
- essere "ambientali" e quindi attingere le proprie informazioni direttamente dall'ambiente senza manipolarlo.

La caratteristica di *ambientale* ha tre implicazioni forti:

- essere interdisciplinare, perché l'ambiente non funziona per categorie di sapere separabili (il plurale "scienze ambientali" richiama pluralità di discipline);
- non ammettere repliche, perché le varietà ambientali sono talmente numerose (numerose sono le variabili e le loro combinazioni) da rendere assolutamente improbabile che vicende, verificatesi una volta, si possano ripetere (e se si interviene dall'esterno, anche ammesso di riuscire a farlo, si perde la caratteristica di "ambientale");
- i processi sono dinamici perché non esistono condizioni di "equilibrio" o la possibilità di "solidificare" gli eventi.

Questi presupposti hanno numerose conseguenze, ma soprattutto richiedono di individuare procedure capaci di porre ordine in una materia nuova che deve riciclare tutte le conoscenze acquisite dalle singole discipline scientifiche.

Le scienze ambientali hanno una storia recente ed un loro possibile atto di nascita nel rapporto del "Club di Roma"⁸ pubblicato nel 1970.

8. Il "Club di Roma" era un sodalizio spontaneo e senza fini di lucro formato da persone in posizioni di prestigio allarmate per