

Dai tessuti con nanoparticelle ai salmoni transgenici. Quali competenze per un'educazione della società civile alla sostenibilità?

Laura Colucci-Gray, Alice Benessia, Vincenzo Guarnieri, Giuseppe Barbiero, Elena Camino

1. Introduzione: la vita mediata dalla tecnoscienza

1.1 Innovazione e regolamentazione

Le moderne società industrializzate e globalizzate – nei Paesi occidentali e sempre più anche nel Sud del mondo - sono caratterizzate da un modo di vivere “tecno-scientifico”, accompagnato da un crescente consumo di energia e da una trasformazione sempre più rapida dei territori. Motore primario di questi cambiamenti è la tecnoscienza che, alimentata da enormi flussi finanziari – in parte pubblici ma sempre più di provenienza privata – produce “innovazione”. Dalla sinergia tra la ricerca tecnoscientificapiù avanzata e il mondo produttivo emergono prodotti (oggetti, alimenti, medicinali...) che sono messi a disposizione del pubblico e che i consumatori sono invitati ad acquistare. La produzione di questi oggetti trasforma contemporaneamente i modi di vivere delle persone, e gli ambienti (sociali e naturali) in cui le collettività umane vivono. Molte di queste trasformazioni producono esiti impreveduti, talvolta irreversibili, i cui aspetti positivi e negativi si ripercuotono in modo differente sui soggetti coinvolti. Un esempio tra i tanti: la produzione di oggetti nell’ambito della comunicazione informatica (dai PC ai telefoni cellulari, allo sviluppo di reti web) di cui vengono spesso sottolineate le ricadute positive, richiede un uso crescente di materiali rari (Mormile, 2010) alimentando così conflitti per le risorse, e rendendo sempre più problematico lo smaltimento dei prodotti obsoleti.

Alla sempre più intensa collaborazione tra la tecnoscienza e l’impresa non si associa una efficace azione delle istituzioni pubbliche, alle quali spetterebbe il compito di attivare processi decisionali democratici che valutino l’opportunità di accogliere le innovazioni proposte, in termini di benefici e sicurezza della collettività. È ancora dominante l’idea che per decidere razionalmente, dunque saggiamente, la politica si può e si deve affidare alla conoscenza neutrale, certa ed esaustiva, elaborata nel contesto e con i metodi di una comunità scientifica, idealmente esente da assunzioni valoriali. In questo ideale tipicamente moderno, oggi sempre meno adeguato, la scienza è dunque da un lato il soggetto propulsore dell’innovazione e

dall'altro l'unico strumento idoneo a valutarne e regolarne le conseguenze. L'innovazione tecnoscientifica e la sua regolamentazione sono due aspetti speculari di una medesima visione dei rapporti tra scienza e politica, basati sul principio secondo il quale «*la scienza dice il vero al potere*» e dal *vero* della scienza discende automaticamente il *giusto* della politica (Wildavsky, 1979). La sfera normativa, ovvero quella dell'etica, della politica e del diritto, sono, in questo modo, essenzialmente dipendenti da un ideale moderno di scienza, sia nel creare nuove possibilità e modalità di esistenza individuali e collettive sul pianeta, sia nel regolarne i confini (Funtowicz, 2007).

1.2 Scienza e democrazia: quale ruolo per l'educazione?

«*Questi sono i giorni dei miracoli, degli orrori e dell'hubris*». Così inizia un articolo sulla rivista Nature (Sarewitz, 2010). E le parole che concludono il suo intervento sono: «*Questo è il momento della democrazia. A lungo termine, sarà anche la cosa migliore per la scienza*».

Che cosa sta in mezzo a questi estremi? Da un lato una piccola minoranza di “esperti” – scienziati e tecnologi che operano in sofisticati laboratori di ricerca (sempre più spesso privati) – sta sviluppando una capacità mai immaginata prima di manipolare e trasformare i sistemi naturali, dall'altro la maggioranza dell'umanità è sempre più esposta a sperimentazioni e a “innovazioni” i cui esiti inevitabilmente portano con sé vantaggi e svantaggi, e conseguenze inaspettate che coinvolgeranno le generazioni future, intrecciandosi con i processi evolutivi naturali sempre in atto.

In queste condizioni è necessario modificare le relazioni di potere tra scienza, società e impresa, e istituire organi di controllo indipendenti, ai quali siano date le forze (in termini di formazione scientifica, di finanziamenti alle ricerche, di peso politico, di ruolo istituzionale) per sostituire le scelte compiute dagli “esperti” con processi decisionali democratici attivati dalla società civile. Per fare ciò è necessario che i cittadini – tutti i cittadini – elaborino delle competenze nuove, che consentano loro di «*rendere esperta la democrazia*» (Liberatore e Funtowicz, 2003), in grado di orientare direttamente i programmi di ricerca verso finalità condivise e utili a soddisfare i bisogni della collettività.

L'educazione scientifica tradizionale è ancora orientata a fornire nozioni disciplinari e trasmette un'idea di scienza astratta e decontestualizzata, che opera esclusivamente per il miglioramento della condizione umana ed è in grado di dare risposte certe ai problemi. Questa modalità di insegnamento non offre strumenti concettuali adeguati ad affrontare la complessità dei processi che stanno dietro alla produzione di questi moderni “prodotti”, né a cogliere il quadro di incertezza epistemica in cui la tecnoscienza opera. In uno scenario globale, in cui è ormai ampiamente dimostrato che ogni risorsa è limitata (dalle fonti di energia alla terra coltivabile, dall'acqua alle materie prime) e dove le perturbazioni causate dall'uomo sollecitano processi evolutivi imprevedibili, la sostenibilità della vita umana sul pianeta Terra dipende sempre più da pratiche orientate alla prudenza, alla frugalità, alla

sufficienza (Sachs & Morosini, 2011): questi dunque dovrebbero essere i criteri ai quali fare riferimento per ogni tipo di “innovazione”.

Quali competenze dovrebbe allora promuovere l’educazione scientifica, per consentire ai cittadini – anche se non sono “esperti” – di intervenire nei dibattiti che riguardano temi scientifici e di operare scelte consapevoli, in una prospettiva di equità sociale e di sostenibilità ambientale?

Descriveremo qui di seguito due esempi di argomenti scientifici complessi e controversi, che hanno forti implicazioni sociali e ambientali, ponendo l’accento su alcuni elementi problematici che li caratterizzano, cercando di mettere in luce quali conoscenze siano utili / necessarie per entrare nel dibattito in modo consapevole: le nanotecnologie e gli organismi animali GM destinati all’alimentazione umana.

A nostro parere non sono le approfondite conoscenze specialistiche e analitiche offerte da percorsi formativi disciplinari (spesso destinati comunque a una piccola minoranza di studenti) ad essere utili per affrontare i problemi socio- scientifici del nostro tempo. Occorrono invece pochi concetti di base, accessibili a tutti i cittadini, insieme a un atteggiamento di ascolto e di rispetto per una molteplicità di punti di vista (di esperti come di gente comune) e alla consapevolezza della complessità delle situazioni e dell’imprevedibilità dei modi con cui i sistemi naturali possono reagire alle sollecitazioni sempre più intense esercitate dalla tecnoscienza. Inoltre un punto cruciale dell’insegnamento scientifico dovrebbe essere la valorizzazione delle idee e prospettive degli studenti, nella prospettiva che – in quanto cittadini - ciascuno ha il diritto / dovere di partecipare alla costruzione di nuove conoscenze e di esprimersi nei processi decisionali che orientano la ricerca.

2. Le nanotecnologie

2.1 L’innovazione: dalle nanovisioni ai prodotti di mercato

L’età dell’oro delle nanotecnologie è qui, dietro l’angolo. «*Con lo sviluppo della nanotecnologia saremo in grado di mantenere indefinitamente i nostri corpi e cervelli in uno stato ottimale di salute*»: così si esprimeva Kurzweil (2003, citato da Kearnes & MacNaughten, 2006, p. 284).

Nel 2002 Il Dipartimento inglese del Commercio e dell’Industria sottolineava che poche industrie si sarebbero sottratte all’influenza della nanotecnologia, e preannunciava la produzione di computer più veloci, medicine d’avanguardia, rilascio controllato di farmaci, materiali biocompatibili, riparazione di nervi e tessuti, sensori, telecomunicazioni, materiali magnetici. I nanomateriali hanno suscitato grande attenzione per le proprietà tecnologicamente interessanti che esibiscono, creando grandi aspettative di crescita economica. Adlakha-Hutcheon et al. (2009) segnalano lo sviluppo di settori nuovi, con un turnover stimato di prodotti dell’ordine di 1,1 – 2,5 migliaia di miliardi di dollari entro il 2015.

L'Unione Europea si è prontamente allineata. Nel sito dedicato alle nanotecnologie (UE, 2011) si legge:

I prodotti basati sulle nanotecnologie sono già in uso, e gli analisti si aspettano una crescita dei mercati di centinaia di miliardi di euro in questi dieci anni. Questi progressi possono contribuire agli obiettivi di crescita, competitività e sviluppo sostenibile dell'Unione Europea, e a molte sue strategie di intervento, nel campo della salute pubblica, della sicurezza nei posti di lavoro, della società dell'informazione, industria, ambiente, energia, trasporti, sicurezza e spazio.

La Commissione Europea sulle nanotecnologie ha cercato attivamente il consenso del pubblico: nel 2004 affermava che *«senza un serio sforzo di comunicazione le innovazioni tecnologiche potrebbero trovarsi di fronte a una ingiusta reazione pubblica negativa. [...] La fiducia del pubblico, e l'accettazione delle nanotecnologie sarà cruciale per il suo sviluppo a lungo termine»* (p. 19).

L'Unione Europea si appresta (nel 2011–2012) a destinare cospicui finanziamenti alle nanoscienze e alle nanotecnologie in una varietà di settori, da quello medico a quello ambientale, da quello dei trasporti a quello delle comunicazioni (7° Programma Quadro, 2011).

2.2 Dall'euforia alla preoccupazione

I nanomateriali ingegnerizzati sono stati definiti come “oggetti” aventi almeno una dimensione inferiore o uguale ai nm¹ (The Royal Society, 2004; Elder et al., 2009). Tuttavia la classificazione delle nanoparticelle si è rivelata un'impresa così difficile che ancora oggi esse non sono chiaramente definite (European Commission, 2010). Le implicazioni di tale incertezza sono enormi, in quanto non permettono di fissare l'ambito entro il quale le istituzioni pubbliche possono richiedere o eseguire analisi atte a valutare i rischi che derivano dall'immissione di nanoparticelle nell'ambiente. È significativo quanto si legge in un documento dell'EFSA (European Food Safety Authority), l'Organismo deputato ad assicurare la sicurezza del cibo in Europa:

Lo stato attuale delle conoscenze contiene ancora molti punti oscuri, che impediscono ai valutatori del rischio di stabilire il grado di sicurezza, in accordo con le procedure standard, per molte delle possibili applicazioni della nanotecnologia che riguardano il cibo, e di assicurare che gli aspetti di sicurezza dei nanomateriali ingegnerizzati e dei processi nanotecnologici sottostanti siano affrontati in modo coerente e completo (EFSA 2001, p.5).

Oggigiorno si possono trovare nanoparticelle in più di 1300 prodotti per consumatori (The Project on emerging Nanotechnologies, 2011), dai componenti elettronici ai cosmetici, filtri per sigarette, tessuti e spray antimicrobici, schermi solari, prodotti per la pulizia della casa, scioline. Ma, dato

¹ 1 nm = 1 m⁻⁹, ovvero un millesimo di micron.

che non esiste attualmente un obbligo per le compagnie a etichettare i loro prodotti segnalando la presenza di nano-componenti (Som et al, 2010), è difficile costruire un quadro attendibile della situazione.

Linkov et al. (2007) hanno evidenziato un gap temporale crescente tra il ritmo di produzione di nanoprodotto, i risultati ottenuti dalle ricerche volte a valutare i rischi connessi con l'esposizione a nanomateriali e/o a nanoprodotto (Environment, Safety and Health Data), e la messa a punto di norme e leggi per una adeguata regolamentazione. Nel sito della Royal Society inglese (2006) si legge «siamo seriamente preoccupati per la mancanza di progresso nella comprensione dei potenziali impatti sanitari e ambientali delle nanoparticelle e dei nanotubi liberi».

Stanno emergendo indizi (Savolainen et al. 2010) che alcune delle proprietà che rendono i nanomateriali così unici possono anche minacciare la salute umana, provocando effetti cito- e genotossici, fenomeni infiammatori e tumori (Donaldson et al., 2005; Yang et al., 2009).

Un aumento di consapevolezza delle istituzioni è riconoscibile in un recente comunicato dell'Autorità Europea per la sicurezza alimentare (EFSA, 2011), che propone delle linee guida ai nanomateriali ingegnerizzati per tre categorie di prodotti / applicazioni: quelli destinati al consumo (umano o animale), sostanze usate nel settore agrochimico (per esempio pesticidi), e nanomateriali incorporati in prodotti che vengono a contatto con cibo / foraggio (per es. involucri).

Gruppi di ricerca indipendenti hanno pubblicato negli ultimi anni alcuni lavori particolarmente interessanti. Come ricordano Maynard et al. (2011) da molto tempo è noto che la forma fisica dei materiali può essere causa della loro tossicità – gli impatti sulla salute di materiali asbestiformi, aerosol industriali e particolati ambientali ne sono esempi ben noti². Ed è da 20 anni che la ricerca tossicologica ha suggerito che possano esistere complesse e precedentemente non riconosciute associazioni tra la fisico-chimica di materiali alla nanoscala e interazioni biologiche.

Lo stesso Maynard (2011, p. 31) ha affermato di recente che:

Un insieme rapidamente crescente di ricerche indica che i materiali a scala nanometrica si comportano diversamente dai loro omologhi di dimensioni rispettivamente maggiori e minori. Per esempio il biossido di titanio – ampiamente usato come sbiancante – diventa via via più tossico man mano che le dimensioni delle particelle si riducono.

² A un'altra scala dimensionale, è ben noto l'effetto distruttivo delle fibre di amianto. Nel giro di 20 anni dai primi scavi in miniera, erano stati sviluppati più di 100 prodotti fatti con il "minerale magico"; nel frattempo venivano segnalati i primi casi di patologie gravi. Nel 1989 l'Ispettrice Lucy Deane parlava di danno dimostrato alla salute e casi accertati di danni polmonari. Nel caso dell'amianto vi è stato un ritardo enorme tra le prime segnalazioni di tossicità e la messa al bando, decisa in Francia e nell'UE solo nel 1998-99, dopo un numero incalcolabile di morti. Come si legge in un rapporto dell'Agenzia Europea per l'Ambiente: «Looking back in the light of present knowledge, it is impossible not to feel that opportunities for discovery and prevention of asbestos disease were badly missed». Thomas Legge, ex Chief Medical Inspector of Factories, in *Industrial maladies*, 1934 (EEA, 2001).

La produzione di oggetti che contengono nanoparticelle implica che tali particelle entrino nella complessa rete di relazioni che connette viventi e sistemi abiotici. Esse possono entrare all'interno dell'organismo attraverso la cute, o per inalazione o ingestione, oppure possono essere iniettate a scopo diagnostico, ed è dimostrato che tendono a diffondere a vari organi (Savolainen et al., 2010). Sono ancora pochi gli studi compiuti su animali o in vitro per esplorare gli effetti della presenza di nanoparticelle nei diversi distretti dell'organismo, e il compito si annuncia di enorme impegno e costo. Ancor meno numerosi sono gli studi sugli eventuali effetti genotossici e carcinogenici, che si preannunciano difficili per la grande varietà di forme e caratteristiche delle nanoparticelle e per la varietà di "bersagli" che esse possono colpire.

Rajive Dhingra et al. (2010) sottolineano l'importanza di esaminare l'intero ciclo di vita dei nanoprodotto, e di mettere a confronto i benefici prospettati dai nanoprodotto e gli impatti negativi inaspettati. Dalle fasi iniziali della produzione, all'uso, allo smaltimento, ad ogni tappa si presentano possibilità di interazione tra le nanoparticelle e l'ambiente esterno, sia esso il luogo di lavoro degli operai addetti alla produzione, il corpo dei pazienti sottoposti a un esame medico, il contatto cutaneo dei consumatori con creme, tessuti, carte ecc., e infine il luogo di rilascio finale – aria, acqua o suolo.

Mentre le pubbliche istituzioni e la comunità scientifica faticano a mettere a punto sistemi di misura della presenza di nanoparticelle, di valutazione dei rischi, di elaborazione di norme in grado di regolamentare la produzione e l'uso di prodotti con nanoparticelle, queste sono ormai ovunque. Studi eseguiti di recente in Svizzera (Mueller & Novak, 2008) e nel Regno Unito (Boxall et al., 2007) sulla base delle informazioni della penetrazione nel mercato di prodotti nanotecnologici, stimano che la presenza di nanoparticelle nell'aria, nel suolo e nell'acqua sia compresa tra i ng/L e i µg/L: e siamo appena all'inizio!

2.3 Il ruolo dell'educazione

L'uso di materiali contenenti nanoparticelle implica trasformazioni irreversibili dell'ambiente. Se si dimostrasse che alcune di esse sono dannose per la salute umana e in generale per i sistemi viventi, sarebbe impossibile "tornare indietro", e recuperarle. Alla luce di ciò, c'è da chiedersi come mai non sia stato invocato fin dall'inizio il principio di precauzione (Stirling, 2008), cioè una sospensione di ogni forma di utilizzo e/o dispersione di nanoparticelle negli organismi viventi e nell'ambiente, in attesa di valutare, sperimentalmente, ma anche sul piano etico, quali vantaggi possano portare le nanotecnologie in termini di benessere umano (soddisfacimento dei bisogni in una situazione di equità: Bozeman & Sarewicz, 2011), soppesandoli con i rischi, le incertezze, le incognite derivanti da trasformazioni così pervasive e irreversibili dei sistemi naturali.

I cittadini non si sentono in grado di assumere il "ruolo culturale" di esprimere il proprio punto di vista: tutti ripongono la loro fiducia nelle isti-

tuzioni e delegano gli esperti a prendere ogni decisione. Eppure, già nel 2006 Schummer and Baird (citati da Kahru & Savolainen nel 2010) osservavano che:

Lungi dall'essere la creazione di ingegnosi scienziati e ingegneri, la nanotecnologia è il risultato di interazioni sociali complesse. Il fallimento nel riconoscere questo potrebbe facilmente portare a creazioni che, dopo la montatura iniziale, si muoveranno verso direzioni che non erano previste, oppure finiranno nell'oblio (p. 90).

In effetti, lo sviluppo della nanoscienza e delle nanotecnologie è avvenuto non solo grazie agli esperti, ma a un insieme di persone che a vario titolo sono state coinvolte: dai finanziatori interessati alle innovazioni tecnologiche, ai decisori pubblici che hanno approvato i finanziamenti, ai commercianti, ai consumatori che hanno acquistato i prodotti, ai media che hanno costruito immaginari positivi. Ogni cittadino – in un modo o nell'altro – ha avuto ed ha tuttora modo di confrontarsi con questo nuovo campo del sapere e dell'agire. Quali conoscenze e competenze ha acquisito nel suo percorso formativo di base (non necessariamente orientato a una carriera scientifica) per capire i problemi connessi con le nanotecnologie e prendere decisioni consapevoli per sé e – se ha responsabilità pubbliche – per la collettività?

Un concetto chiave è che le nanoparticelle sono dello stesso ordine di grandezza dei componenti cellulari (mitocondri, ribosomi, nucleo, reticolo endoplasmatico ecc.) e che possono interagire / interferire con essi in modi diversi. Oltre alle dimensioni, anche la forma delle nanoparticelle e la struttura della loro superficie sono significative nel determinare se e quanto esse possano interagire con le altre componenti cellulari. Dal canto suo ogni cellula è un sistema complesso e dinamico, le cui parti continuamente reagiscono agli stimoli circostanti: non è difficile ipotizzare che la presenza di “corpi estranei” delle loro stesse dimensioni possa interferire con le normali funzioni di queste delicate basi della vita.

Un altro concetto chiave è che le nanoparticelle che nel processo tecnologico vengono inserite in un prodotto entrano – insieme all'oggetto in cui sono inserite – in un “ciclo di vita” nel corso del quale (o alla fine del quale) si disperdono nell'ambiente, nella loro forma iniziale, oppure associate ad altre strutture, o trasformate. Le piccole dimensioni delle nanoparticelle fanno intuire che sia difficile, se non impossibile, rintracciarle ed eventualmente “recuperarle”.

Si tratta di concetti che sono alla portata di studenti della scuola dell'obbligo, e dovrebbero far parte del bagaglio culturale con cui ciascuno di loro poi – che diventi operaio o storico, ingegnere o artista – può sviluppare un pensiero autonomo e critico. Tuttavia questi concetti vengono spesso insegnati in modo astratto: nozioni che occorre imparare anziché come strumenti per capire come funzionano le cose, dal nostro corpo all'ambiente di casa, di scuola, di lavoro.

Inoltre la consuetudine, ancora radicata nell'educazione scientifica, di insegnare ai bambini e ai giovani le "certezze" della scienza, il suo ruolo positivo per il progresso, e di alimentare la fiducia negli esperti, ai quali è opportuno dare delega per prendere le decisioni "giuste", impedisce di introdurre nei percorsi formativi dei temi che invece sono di grande rilevanza sociale: il concetto di rischio, le situazioni di incertezza che derivano dalle nostre crescente capacità di interferire con i processi naturali, complessi ed evolutivi, la presenza costante dell'ignoranza che accompagna anche il più raffinato dei saperi.

Il caso della nanoscienza e delle nanotecnologie illustra che un'educazione scientifica di base che fornisca alcuni semplici concetti biologici (struttura e funzione delle cellule e delle loro componenti; cicli di vita dei prodotti) – accompagnati da esempi concreti, contestualizzati in situazioni della vita reale – e una adeguata formazione epistemologica sulla natura incerta del sapere scientifico potrebbero fornire a tutti i giovani, futuri cittadini, alcuni strumenti essenziali per esprimersi e agire in modo consapevole.

3. I salmoni GM : una questione aperta

Mentre i nanoprodotti sono ormai diffusi sul mercato, esistono situazioni in cui il controllo pubblico è previsto nei processi decisionali che orientano la ricerca. Un esempio interessante riguarda la proposta, avanzata ormai più di un anno fa in USA da parte di un'azienda esperta nell'allevamento di salmoni, l'Aqua Bounty, di allevare salmoni geneticamente modificati (AquAdvantage Salmon: AAS) per l'alimentazione umana. Se questa richiesta verrà approvata, sarà una novità importante: finora animali geneticamente modificati sono stati utilizzati solo per la produzione di derivati (latte, biomedicine) o per la ricerca biomedica.

Su questa proposta – tuttora al vaglio degli organi competenti – sono state sollevate preoccupazioni a due livelli: a livello della salute umana (per le eventuali reazioni allergiche che questo alimento potrebbe provocare, e per le possibili modifiche indesiderate nella composizione biochimica delle carni) e a livello ecologico (per il rischio che l'eventuale fuga dalle vasche possa alterare gli habitat naturali e gli ecosistemi dove vivono i salmoni selvatici).

3.1. I salmoni GM e la ricerca applicata

L'AquAdvantage Salmon (AAS) è un Salmone Atlantico (*Salmo salar*) geneticamente modificato dalla Aqua Bounty Technologies Inc. (ABT), che ha inserito un costrutto genico prelevato da altre specie, in grado di stimolare in modo continuo la crescita corporea. I dati resi disponibili da ABT indicano che questo salmone aumenta di peso circa tre volte più velocemente rispetto al Salmone Atlantico selvatico. Questo carattere lo renderebbe

competitivo sul mercato, e offrirebbe ai consumatori un alimento ricco di acidi grassi omega-3, in grado di ridurre i rischi di malattie circolatorie.

Consapevole che le preoccupazioni della comunità scientifica possono compromettere l'iter burocratico volto alla commercializzazione dell'AAS, l'ABT ha redatto un rapporto riservato indirizzato all'Istituzione deputata a valutare il caso (il Center for Veterinary Medicine della U.S. Food and Drug Administration), in cui si legge che «*dopo oltre dieci anni di incroci la salute e il benessere di AAS non differisce dal Salmone Atlantico selvatico*» (Aqua Bounty Technology, 2010), senza però fornire alcuna spiegazione scientifica di questa affermazione. A proposito dei problemi di contenimento del Salmone GM, ABT dichiara di aver predisposto tre tipi di "barriera": biologica (allevamento solo di femmine sterili), fisica (recinzione) e ambientale (a seguito di una eventuale fuga i salmoni troverebbero un ambiente naturale ostile). Anche se nessuna di queste barriere garantisce un'efficacia del 100%, ABT si affida alla loro ridondanza, senza nessuna concreta valutazione del rischio.

3.2 I salmoni GM e la ricerca di base

La ricerca scientifica pubblica sui salmoni GM si è concentrata su due questioni: in che modo la fisiologia del salmone GM differisce dall'omologo selvatico? Il salmone GM può modificare gli equilibri dell'ecosistema in cui si trova a vivere? È stato dimostrato che il salmone GM differisce dal selvatico su almeno due piani: l'accrescimento fisico e il comportamento sociale. Il salmone GM può raggiungere un indice di massa corporea maggiore del 21-25% rispetto a quello selvatico, ma presenta *lo stesso* consumo di ossigeno del tipo selvatico, probabilmente perché la superficie branchiale non risulta influenzata dall'attività dell'ormone della crescita (Deutsch et al., 2006), e mostra aberrazioni anatomiche (Hu & Zhu, 2010). Anche i comportamenti riproduttivi appaiono modificati: il Salmone GM raggiunge la maturità sessuale intorno ai 2-3 anni (il Salmone selvatico impiega 4-5 anni); può accoppiarsi con il suo omologo selvatico e dare origine a prole fertile (Bessey, 2004).

Il secondo piano di indagine è lo studio delle relazioni fra le comunità di salmoni geneticamente modificati e di salmoni selvatici. Al centro del dibattito ci sono due questioni: la presenza del transgene cambia la fitness del salmone GM rispetto a quella del salmone selvatico? Che cosa accade se salmoni GM si ibridano con una popolazione selvatica?

Poiché la fitness in ambienti naturali è difficile da valutare sperimentalmente sono stati sviluppati modelli teorici (Muir & Howard, 1999; Hendrick, 2001) dai quali risulta che un salmone GM potrebbe avere una fitness minore rispetto al suo omologo selvatico: l'ipotesi è avvalorata dal fatto che crescono molto velocemente (Devlin et al., 1994, 1995) e la loro mortalità è maggiore (Sundström et al, 2004). Tuttavia Devlin et al. (2004) hanno osservato che, quando i salmoni GM sono allevati nelle stesse vasche assieme ai selvatici, essi convivono pacificamente finché c'è abbondanza di cibo, ma quando il cibo scarseggia, i salmoni GM esprimono comportamenti di

dominanza, fino a fenomeni di cannibalismo, portando all'estinzione entrambe le popolazioni. Nelle stesse condizioni di scarsità di cibo i salmoni selvatici da soli sarebbero sopravvissuti senza particolari problemi. Più in generale, si può dire che le alterazioni genetiche influenzano in modi non facilmente prevedibili le condizioni ecologiche (Sundström et al, 2007).

3.3 Aspetti controversi

Dall'esame della letteratura scientifica emergono dunque dati e conclusioni differenti tra scienziati di base e ricercatori dell'azienda. Ciò deriva dalle diverse domande di ricerca che si pongono i due gruppi di studiosi, come diverse sono le preoccupazioni e le prospettive, e diversi sono i confini dei sistemi considerati nelle ricerche svolte. Anche in questo caso, come nel precedente sulle nanoparticelle, emergono molte domande alle quali la scienza non è in grado di rispondere, non solo provvisoriamente ma intrinsecamente. Rispetto all'equivalenza tra la carne di salmone selvatico e quella di salmone GM, l'ABT ammette che AquAdvantage Salmon manifesta problemi riguardo allo sviluppo del sistema muscolo-scheletrico, ma afferma che questi si risolvono con il tempo. Ma non si esprime riguardo alle modificazioni della rete metabolica indotta dalla produzione continua di ormone della crescita. L'analisi condotta da ABT del contenuto dei principali metaboliti (carboidrati, proteine, lipidi, vitamine, ormoni e alcuni enzimi) riguarda solo le parti commestibili del salmone e non l'intero organismo, che secondo altre indagini appare in varia misura compromesso. Dal canto suo la ricerca di base ha dimostrato che la manipolazione genetica volta a distruggere il sistema di regolazione a *feedback* negativo della produzione dell'ormone della crescita provoca problemi nello sviluppo del sistema muscolo-scheletrico, nel metabolismo e nella riproduzione. Tuttavia - data la complessità metabolica di un organismo - sarebbe impossibile prendere in considerazione tutte le variabili in gioco (solo le proteine metabolicamente attive potrebbero appartenere a oltre 100.000 tipi diversi).

Rispetto all'esito di una possibile fuga di salmoni GM, l'ABT dichiara di aver messo in opera un sistema "ridondante" di barriere di sicurezza, in quanto prevede di isolare la struttura di allevamento mediante recinzione, di utilizzare personale di sorveglianza 24 ore su 24 coadiuvato da telecamere di sicurezza e di predisporre una serie di filtri, reti e sistemi di contenimento. Un sistema complesso, costoso e inevitabilmente fragile, come dimostra un'ampia documentazione a proposito di fughe di Salmone Atlantico dagli allevamenti tradizionali (Gausen & Moen, 1991; McKinnell et al., 1997; Crozier, 1998).

Come è stato dimostrato riguardo all'introggressione dei transgeni nelle popolazioni selvatiche di organismi vegetali (Guarnieri et al, 2008), le barriere possono essere più o meno severe, ma per la legge dei grandi numeri, prima o poi vengono superate. L'introggressione di un costrutto transgenico in una popolazione animale, per quanto altamente improbabile, non si può del tutto escludere e qualora avvenisse, i modelli teorici sono tutti concordi

nel riconoscere che questo fatto avrebbe conseguenze negative per la popolazione di salmoni selvatici.

3.4. Il ruolo dell'educazione

Sono numerosi gli insegnanti – di scuola superiore e di università – che affrontano con i loro studenti gli aspetti più specialistici e applicativi della genetica, pensando che solo con una buona padronanza delle conoscenze tecniche sia possibile esprimere un giudizio fondato sui problemi degli OGM. Ma anche in questo caso le conoscenze scientifiche di base necessarie sono modeste: l'importante è che non siano fornite in modo riduzionista, bensì in una prospettiva sistemica. I geni sono sistemi complessi, che interagiscono continuamente e profondamente con l'ambiente circostante, in una rete di reciproche relazioni che plasmano l'organismo nelle sue strutture morfologiche e funzioni fisiologiche, nei comportamenti con i consimili e nel più vasto ecosistema. Ogni forma di manipolazione porta a esiti che solo in parte sono prevedibili ed eventualmente misurabili.

Nel caso dei salmoni GM, inoltre, gli studenti possono essere accompagnati a studiare il contesto della proposta fatta dall'azienda, e ad analizzarne le assunzioni precedenti. La produzione di salmoni GM dà per scontata la pratica dell'acquacoltura, e non tiene conto della vasta letteratura che ne mette in rilievo l'insostenibilità ambientale.

La proposta del salmone GM in quanto cibo ricco di grassi omega-3 esclude altre fonti con analoghe qualità – magari più sostenibili (ad esempio il pesce azzurro). Inoltre si dà per scontata l'opportunità di un'alimentazione basata su due fonti di energia e materia che sono in grave crisi: i combustibili fossili (indispensabili per tutta la filiera dei salmoni GM) e le risorse ittiche (sui prelievi delle quali vi sono controversie molto accese).

Affrontando il tema dei salmoni GM in una prospettiva storica emerge una riflessione sui "confini": quali confini spaziali è opportuno considerare nell'analisi del problema? Sono i muri dei laboratori di ricerca, i bordi delle vasche di allevamento, gli ecosistemi marini? Ragionando sui confini si includono nel quadro molti nuovi soggetti: oltre ai ricercatori – pubblici e privati – che sono impegnati nel problema, ci sono gli investitori dell'Aqua Bounty, i costruttori di vasche di acquacoltura, gli operai e il personale. Ci sono gli addetti ai trasporti, i commercianti, e quanti altri implicati nella nuova filiera. Ci sono anche le comunità che – da qualche altra parte del mondo – entrano in competizione per la pesca del pesce azzurro, che rappresenta una fonte alimentare per le comunità di pescatori oppure, in alternativa, per i salmoni GM.

Il problema, presentato con un approccio riduzionista come di pertinenza degli esperti di genetica, si rivela ben più articolato, e chiama in causa – oltre ad altre discipline scientifiche – anche rilevanti aspetti di natura sociale ed etica.

4. Conclusioni

4.1. Dai fatti ai valori, dagli approcci disciplinari alla ricerca di senso

I casi illustrati mostrano come sia sempre più difficile fornire evidenze certe su situazioni che la ricerca tecno-scientifica crea, proponendo l'immissione sul mercato di prodotti "manipolati". Nel caso dei salmoni si tratta di manipolazioni genetiche, nel caso delle nanotecnologie si tratta dell'inserimento – negli organismi e nell'ambiente - di particelle di dimensioni subcellulari. Il tentativo della scienza di base, finanziata dalla società civile e coordinata da istituzioni riconosciute a livello nazionale e internazionale, di esercitare un controllo – possibilmente preventivo ma almeno successivo – si sta rivelando un'impresa onerosa e spesso fallimentare. Onerosa perché le analisi che si rendono necessarie richiedono attrezzature costose e sofisticate, impegnano équipes di esperti, e distolgono finanziamenti e ingegno da altri percorsi di ricerca. Fallimentare perché – come è evidente nel caso delle nanoparticelle – le applicazioni di questo settore tecnologico sono ormai così numerose e variegate da aver creato una situazione irreversibile, alla quale si potrà solo tentare di porre qualche riparo tardivo ove si dimostreranno danni evidenti.

4.2 Verso un nuovo governo della tecnoscienza

L'approccio della cosiddetta scienza dell'innovazione, o *innovation science* (Wynne, in Jasanoff 2005), è incentrato sulla produzione di *beni*, intesi come prodotti industriali, e sull'ottimizzazione di tali prodotti tipica dei relativi processi industriali. Ciò implica l'utilizzo del *trial-and-error*, il procedimento iterativo di approssimazione successiva caratteristico della ricerca applicata. Prevalgono quindi, in tale contesto, una visione e soprattutto un metodo fondati sul meccanicismo e sul riduzionismo, volti ad affrontare e a risolvere i problemi che insorgono nella progettazione e nell'implementazione di un prodotto, caso per caso, a mano a mano che insorgono.

In modo speculare, l'approccio della scienza della regolamentazione, la *regulatory science* (Jasanoff, 1990), è focalizzato sulla prevenzione e sulla gestione esperta, ovvero scientifica, dei *mali*, ovvero dei sotto-prodotti dannosi dei medesimi processi. Si fonda spesso su principi e metodi analoghi a quelli della scienza dell'innovazione e non di rado è messa in atto dai medesimi attori. Inoltre, la scienza della regolamentazione è basata sulla possibilità di prevedere le conseguenze dell'innovazione in termini statistici, ovvero di valutazione dei rischi. Il carattere essenzialmente provvisorio, incompleto e valoriale della conoscenza disponibile è dunque drasticamente ridotto a quanto può essere tradotto in termini di rischio, ovvero di probabilità di una futura conseguenza dannosa (Benessia & Salio, 2008).

La modalità decisionale tipica delle moderne democrazie occidentali si avvale della scienza della regolamentazione, con tutti i suoi apparati esperti, per implementare le cosiddette misure politiche fondate sull'evidenza (*evidence-based policies*).

In tale scenario, la discussione circa le diverse strade o futuri tecnologici avviene sulla sola base della valutazione dei rischi, la quale è, come abbiamo visto nei due esempi, intrinsecamente incompleta e parziale. È incompleta poiché nella sperimentazione in campo aperto la complessità dell'interazione tra sistemi sociali e ambientali è tale che dominano l'incertezza strutturale e l'ignoranza (Funtowicz & Ravetz 1994). È parziale poiché nel mondo complesso dei sistemi socio-ambientali sono necessariamente in gioco prospettive disciplinari e sistemi valoriali distinti, i quali determinano degli inquadramenti diversi, dunque delle possibili evoluzioni e distribuzioni di probabilità radicalmente distinte, spesso mutuamente esclusive, per ogni singola questione (Sarewitz 2004).

Quando l'ampia zona di ignoranza, indeterminatezza e incertezza si manifesta e lascia il segno in termini di uno o più eventi imprevisi (e imprevedibili), nella sfera normativa della *evidence-based policy* si invocano le cosiddette *conseguenze non intenzionali*, lasciando di fatto in ombra la questione della responsabilità.

Inoltre, una discussione più ampia e condivisa, di natura eminentemente civica, nella quale si valuti non soltanto il pericolo dei *mali* ma anche l'opportunità e la qualità dei *beni*, è in tale scenario esclusa a priori. Categorie quali la vulnerabilità ai *mali* e la relativa resilienza dei diversi soggetti coinvolti, umani e non, l'equità distributiva nei processi di produzione e distribuzione dei *beni*, la centralizzazione del potere economico-finanziario sono del tutto eluse nella modalità decisionale dell'innovazione-regolamentazione (Jasanoff, 2003). Tali riflessioni eminentemente *qualitative*, necessitano di conoscenze relative non soltanto al futuro, ma anche al passato, e soprattutto al nostro presente (Funtowicz & Strand, 2011).

4.3 L'educazione alla sostenibilità come forma di empowerment

Risale a quasi 20 anni fa la proposta di Funtowicz & Ravetz (1993) di distinguere la ricerca scientifica tradizionale, basata sui saperi disciplinari e volta a interpretare (sul piano teorico) specifici aspetti della realtà naturale, dalla ricerca volta ad affrontare socio-ambientali complesse e controverse e a proporre azioni per risolverli, che essi definiscono "scienza post-normale". La scienza post-normale è caratterizzata da situazioni in cui «*i fatti sono incerti, i valori in discussione, la posta in gioco è alta e le decisioni sono urgenti*». Le riflessioni di questi Autori hanno ispirato numerosi altri studiosi che su queste basi hanno sviluppato quella che attualmente viene chiamata "sustainability science", caratterizzata da una crescente collaborazione (inter-disciplinare e inter-paradigmatica) tra discipline, e da un dialogo rispettoso tra esperti e non-esperti nella costruzione e applicazione

di nuova conoscenza scientifica (e.g. Gallopin, 2004; Clark et al., 2005; Osorio et al., 2009).

Una simile trasformazione dell'idea e della pratica della scienza ha implicazioni interessanti per l'educazione scientifica, e pone la sfida di trasformare il processo di insegnamento / apprendimento da una comunicazione unidirezionale, in cui l'insegnante è "portavoce" neutrale e obiettivo della scienza consolidata, verso una comunicazione dialogica, creativa ed evolutiva, alla quale partecipano con pari dignità insegnanti e studenti. In questo contesto ciascuno è portatore di elementi significativi per la costruzione di una conoscenza condivisa, che tiene conto della complessità e dell'imprevedibilità del funzionamento dei sistemi naturali, per loro natura in continua evoluzione, ed è consapevole della irrimediabile ignoranza che caratterizza il sapere umano - sapere che si sviluppa all'interno del sistema studiato, dal quale ogni essere umano dipende totalmente non solo per le sue funzioni vitali (l'acqua, il cibo, l'aria), ma anche per l'elaborazione del linguaggio e della cultura (Lakoff & Johnson, 1999; Latour, 2007).

L'accettazione della legittimità di molteplici interpretazioni nella costruzione di nuovo sapere scientifico può diventare una forma significativa di *empowerment*: un elemento essenziale per il processo di democratizzazione della scienza (Liberatore & Funtowicz, 2003) e al tempo stesso di sviluppo di *expertise* dei cittadini (Guimarães Pereira, 2009). Sono questi due elementi essenziali che l'educazione scientifica può valorizzare, equilibrando l'attenzione verso i prodotti scientifici con una maggiore attenzione verso i processi di costruzione del sapere e fornendo ai giovani gli strumenti per diventare protagonisti delle scelte tecnoscientifiche che plasmeranno il loro futuro. Solo una società davvero democratica può stabilire quali siano i valori pubblici (Bozeman & Sarewitz, 2011) da perseguire, e solo una cittadinanza consapevole dei limiti del pianeta e dei diritti di tutte le comunità umane a vivere una vita dignitosa e libera può contestualizzarli nel mondo globalizzato in cui ci troviamo a vivere.

Laura Colucci-Gray, Alice Benessia, Vincenzo Guarnieri, Giuseppe Barbiero, Elena Camino, Centro Interuniversitario IRIS, Istituto di Ricerche Interdisciplinari sulla Sostenibilità (www.iris.unito.it), c/o Dip. di Biologia animale e dell'uomo, Via Accademia Albertina, 13 10123 Torino.

Riferimenti bibliografici

- 7° Programma quadro di ricerca e sviluppo (2011). Sito visitato il 20.07.2011 <http://www.idea-re.net/finanziamenti-europei/bandi-europei/7-programma-quadro-di-ricerca-e-sviluppo/>
- Adlakha-Hutcheon, G., Khaydarov, R., Korenstein R., Varma, R., Vaseashta, A., Stamm H. & Abdel-Mottaleb M. (2009). Nanomaterials, nanotechnology: ap-

- plications, consumer products and benefits. In: I. Linkov and J. Steevens, Editors, *Nanomaterials: Risks and Benefits*, Springer, Dordrecht, pp. 195–207.
- Aqua Bounty Technologies, Inc. (2010) Environmental assessment for AquAdvantage salmon. For public display August 25, 2010. <http://www.fda.gov/downloads/AdvisoryCommittees/CommitteesMeetingMaterials/VeterinaryMedicine/AdvisoryCommittee/UCM224760.pdf>. Sito visitato il 20.07.2011.
- Benessia A., Salio G. (2008). Dalla scienza della certezza alle scienze della complessità, in “*Il dialogo tra le culture: diversità e conflitti come risorse di pace*”, Roma, Donzelli.
- Bessey, C., Devlin, R.H., Liley, N.R. & Biagi, C.A. (2004). Reproductive performance of growth-enhanced transgenic coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *Trans. Am. Fish. Soc.* 133, 1205–1220.
- Boxall, A.B.A., Tiede, K. & Chaudhry, Q. (2007). Engineered nanomaterials in soils and water : how do they behave and could they pose a risk to human health ? *Nanomedicine*, 2(6): 919-927.
- Bozeman, B. & Sarewitz, D. (2011) Public Value Mapping and Science Policy Evaluation. *Minerva* 49, 1–23.
- Clark, W. C., Crutzen, P.J., & Schellnhuber, H.J. (2005). *Science for Global Sustainability: Toward a New Paradigm*. CID Working Paper No. 120. Cambridge, MA: Science, Environment and Development Group, Center for International Development, Harvard University.
- Crozier, W.W. (1998). Incidence of escaped farmed salmon, *Salmo salar* L., in commercial salmon catches and fresh water in Northern Ireland. *Fish. Manage. Ecol.* 5, 23–29.
- Deitch, E. J. Fletcher, G. L. Petersen, L. H. Costa, I. A. S. F. Shears, M. A. Driedzic, W. R. & Gamperl, A. K. (2006). Cardiorespiratory modifications, and limitations, in post-smolt growth hormone transgenic Atlantic salmon *Salmo salar*. *Journal of Experimental Biology*. 209, 1310-1325.
- Devlin R. H., Yesaki T. Y., Biagi C. A., Donaldson E. M., Swanson P. & W. K. Chen (1994). Extraordinary salmon growth. *Nature*, 371, 209-210.
- Devlin R.H., Yesaki T.Y., Donaldson E.M., Bu S.J., & Hew C.L. (1995). Production of germline transgenic Pacific salmonids with dramatically increased growth performance. *Canadian J of Fisheries and Aquatic Sci* 52(7),1376-1384.
- Devlin, R. H. Biagi, C. A. Yesaki, T. Y. (2004). Growth, viability and genetic characteristics of GH transgenic coho salmon strains. *Aquaculture* 236, 607-632.
- Dhingra, R., Naidu, S., Upreti, G., & Sawhney, R. (2010). Sustainable Nanotechnology: Through Green Methods and Life-Cycle Thinking. *Sustainability* 2, 3323-3338.
- Donaldson, K., Aitken, R., Tran, L., Stone V., Duffin, R., Forrest G. & Alexander, A. (2006). Carbon nanotubes: a review of their properties in relation to pulmonary toxicology and workplace safety. *Toxicol. Sci.* 92, 5–22.
- EFSA Scientific Committee. (2011). Guidance on the risk assessment of the application of nanoscience and nanotechnologies in the food and feed chain. *EFSA Journal* 9(5), 2140.
- Elder, A., Lynch, I., Grieger, K., Chan-Remillard, S., Gatti, A., Gnewuch, H., Kenaway, E., Korenstein, R., Kuhlbusch, T., Linker, F., Matias, S., Monteiro-Riviere, N., Pinto, V.R.S., Rudnitsky, R., Savolainen, K. & Shvedova A. (2009). Human health risks of engineered nanomaterials: critical knowledge gaps in nanomaterials risk assessment. In: Linkov I. and Steevens J., Editors, *Nanomaterials: Risks and Benefits*, Springer, Dordrecht pp. 3–29.

- European Commission. Introduction to nanotechnologies. Sito visitato il 28.07.2011 http://ec.europa.eu/nanotechnology/index_en.html
- European Commission. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) (2010). Scientific Basis for the Definition of the Term “nanomaterial”. http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_o_032.pdf. Sito visitato il 20-07.2011.
- European Environment Agency (2001). Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896–2000. EEA, Copenhagen., Sito visitato il 20.07.2011 http://www.eea.europa.eu/publications/environmental_issue_report_2001_22
- Funtowicz S. & Ravetz J. (1993) Science for the Post-Normal Age, *Futures*, 25 (7), 739-755.
- Funtowicz S. & Strand R. (2011). Change and commitment: beyond risk and responsibility. *Journal of Risk Research*, May 30, 1-9.
- Funtowicz S. (2007). Modelli di scienza e politica. In *Biotechnocrazia: informazione scientifica, agricoltura, decisione politica*. Milano, Jaca Book.
- Funtowicz, S. & Ravetz J. (1994) Emergent Complex Systems, *Futures*, 26 (6), 568-582.
- Gallopín, G. (2004). *Sustainable development: epistemological challenges to science and technology*. Background paper prepared for the Workshop on “Sustainable Development: Epistemological Challenges to Science and Technology”, ECLAC, Santiago de Chile, 13 – 15 October.
- Gausen, D., & Moen, V. (1991). Large-scale escapes of farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) into Norwegian rivers threaten natural populations. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 48, 426–428.
- Guarnieri V., Benessia A., Camino E., Barbiero G. (2008). The myth of natural barriers. Is transgene introgression by GM crops an environmental risk? *Rivista di Biologia - Biology Forum* 101, 195-214.
- Guimarães Pereira, A. (2009). Post-normal relationships between science and society: implications for public engagement. (In D. Gray, L. Colucci-Gray and E. Camino (Eds.) *Science, society and sustainability* (pp. 27-50). New York: Routledge.)
- Hedrick, P. W. (2001). Invasion of transgenes from salmon or other genetically modified organisms into natural populations. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 58, 841-844.
- Hu, W. & Zhu, Z.Y. (2010). Integration mechanisms of transgenes and population fitness of GH transgenic fish. *Science China - Life Sciences* 53, 401-408.
- Jasanoff S. (1990). *The Fifth Branch: Science Advisers as Policymakers*, Harvard University Press, Harvard.
- Jasanoff S. (2005) *Designs on nature: science and democracy in Europe and the United States*. Princeton University Press, Princeton.
- Jasanoff, S. (2003). Technologies of humility: citizen participation in governing science. *Minerva* 41, 223–244, Kluwer Academic Publishers.
- Kahru, A. & Savolainen, K. (2010). Editorial. Potential hazard of nanoparticles: From properties to biological and environmental effects. *Toxicology* 269, 89–91.
- Kearnes, M. & Macnaghten, P. (2006). Introduction: (Re)Imagining Nanotechnology. *Science as Culture*, 15 (4), 279 — 290.
- Lakoff, G. & Johnson, M. (1999). *Philosophy In The Flesh: the Embodied Mind and its Challenge to Western Thought*. (London: Basic Books)
- Latour, B. (2007). *A Plea for Earthly Sciences*. (Keynote lecture for the annual meeting of the British Sociological Association, East London). Sito visitato il 20.09.2010 <http://www.bruno-latour.fr/articles/article/102-BSA-GB.pdf>

- Liberatore, A. & Funtowicz, S. (2003). Democratising' expertise, 'expertising' democracy: what does this mean, and why bother? *Science and Public Policy*, 30, 3, 146-150
- Linkov, I., Satterstrom, F.K., Steevens, J., Ferguson, E., Pleus, R.C. (2007). Multi-criteria decision analysis and environmental risk assessment for nanomaterials. *J. Nanoparticle Res.* 9, 543–554.
- Maynard, A.D. (2011). Don't define nanomaterials. *Nature* 475, 31.
- Maynard, A.D., Warheit D.B. & Philbert M.A. (2011). The New Toxicology of Sophisticated Materials: Nanotoxicology and Beyond. *Toxicological Sciences* 120, suppl 1, S109-S129.
- McKinnell, S., Thomson, A.J., Black, E.A., Wing, B.L., Guthrie III, C.M., Koerner, J.F. & Helle, J.H. (1997). Atlantic salmon in the North Pacific. *Aquacult. Res.* 28, 145–157.
- Mormile D. (2010). Haunted by "specter of unavailability": Experts huddle over critical material. *Science*, 30, 1598.
- Mueller, N.C. & Novak, B. (2008). Exposure Modelling of Engineered Nanoparticles in the Environment. *Environmental Science & Technology*, 42, (12), 4447-4453.
- Muir, W. M., & Howard, R. D. (1999). Possible ecological risks of transgenic organism release when transgenes affect mating success: sexual selection and the Trojan gene hypothesis. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 96, 13853-13856.
- Osorio, L., Rios, A., Lobato, R., Ortiz, M. & Del Castillo, X Á (2009). An epistemology for sustainability science: a proposal for the study of the health/disease phenomenon. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 16 (1), 48 — 60.
- Sachs, W. & Morosini, M. (2011). *Futuro sostenibile. Le risposte eco-sociali alle crisi in Europa* Edizioni Ambiente, Milano.
- Sarewitz D. (2004). How science makes environmental controversies worse. *Environmental science and policy* 7, 385-403.
- Sarewitz, D. (2010). Not by experts alone. *Nature* 466, 688.
- Savolainen, K., Alenius, H., Norppa, H., Pylkkanen, L., Tuomi, T., & Kasper, G. (2010). Risk assessment of engineered nanomaterials and nanotechnologies A review. *Toxicology* 269 (2-3), 92-104, 2010.
- Schummer, J. and Baird, D. (eds.). (2006). *Nanotechnology Challenges: Implications for Philosophy, Ethics and Society*. Singapore, World Scientific Publishing.
- Som, C., Berges, M., Chaudhry, Q., Dusinska, M., Fernandes, T.F., Olsen, S.I. & Nowack, B. (2010). The importance of life cycle concepts for the development of safe nanoproducts *Toxicology* 269 (2-3) 160-169.
- Stirling A. (2008). Science, Precaution, and the Politics of Technological Risk. Converging Implications in Evolutionary and Social Scientific Perspectives. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1128, 95–110.
- Sundström, L. F., Lohmus, M., Johnsson, J. I. & Devlin, R. H. (2004). Growth hormone transgenic salmon pay for growth potential with increased predation mortality. *Proceedings of the Royal Society of London . Series B, Biological Sciences.* 271, Suppl. 5, S350-S352.
- Sundström, L.F., Lohmus, M., Tymchuk, W.E., Devlin, R.H. (2007). Gene-environment interactions influence ecological consequences of transgenic animals. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104, 3889–3894.

- The Project on Emerging Nanotechnologies (2011) Sito visitato il 28.07.2011
<http://www.nanotechproject.org/news/archive/9231/>
- The Royal Society (2004). Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. <http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm>. Sito visitato il 19.07.2011
- The Royal Society (2006). Response to Council for Science and Technology's review of Government's progress on nanotechnology. <http://royalsociety.org/Response-to-Council-for-Science-and-Technology-review-of-Government-progress-on-nanotechnology/>. Sito visitato il 3.07.2011.
- Wildavsky A. (1979). *Speaking truth to power*. Boston: Little Brown and Co.
- Yang, H., Liu, C., Yang, D., Zhang, H. & Xi, Z. (2009). Comparative study of cytotoxicity, oxidative stress and genotoxicity induced by four typical nanomaterials: the role of particle size, shape and composition, *J. Appl. Toxicol.* 29, 69–78.