|  |  |
| --- | --- |
| **Simulation Settings** | * **Time Start:** 0 * **Time Length:** 2500 * **Time Step:** 1 * **Time Units:** Years * **Algorithm:** RK1 |
| **Model Variables** | |
| **a** | * **Value:** # RIVET POPPER model parameter -- a measure of ecosystem fragility. # The variable [a] is the inflection point in a sigmoid curve (equation [ccE]). Variable [a] can  # adopt values 0<[a]<0.5,  # [a]=0.33 places the current current value for [ecosphere] at 0.5 of maximum, # which is the estimated current global average # percapita carrying capacity, 1/2.1gha. # However, the variable [a] is strongly covarianct with the variable [Eo]. The best # setting for one depends on the setting for the other. It is weakly covariant with # variables v and u. ## ----------- Explore this variable ------------------- # EXPLORE THE DEPENDENCE ON a #    a <- Fix(Rand(0.000,0.500)) ## THE OPTIMUM VALUE FOR a VARIES FROM 0.00 TO 0.45 DEPENDING ON OTHER VARIABLES ## OPTIMUM VALUE CANNOT BE DETERMINED BASED ON PAST POPULATION DATA. #a <- 0.427 a <- 0.427 return a * **Units:** Unitless * **Note:** a is the inflection point in x=(%Nature) for collapse to zero carrying capacity |
| **b** | * **Value:** # b=1person/1.0gha is the ecosphere carrying capacity at 0 CE. Fit using population 1000-2000ce. # #b <- Fix(Rand(0.5,1.5)) b <- 1.00 return b * **Units:** Unitless * **Note:** b is the carrying capacity at 0 CE. Fit using population 1000-2000ce. |
| **c** | * **Value:** # c=5.0 person/gha is the minimum reciprocal percapita footprint for  # domesticated land under intense cultivation (gha) # fit to 27% increase in carrying capacity (=1/footprint)  # observed from 9.6e9 gha in 1961 to 12.2e9 gha in 2014 (Lin et al, 2018)  5.50 * **Units:** Unitless * **Note:** c=0.2gha is the minimum percapita footprint for domesticated land under intense cultivation (gha) |
| **CC** | * **Value:** ## ------------- Carrying capacity [CC] --------------- ## CC is the sum of wild and domesticated components. ## Carrying capacity is from wild and domesticated lands. But wild lands ## ecosystem services limit the production from domesticated lands. ## pH is the faction of Earth appropriated for human use. pH <- [Humansphere]/([Humansphere]+[Ecosphere]) ## pE is the fraction of Earth remaining wild. pE <- 1 - pH ## This is the ecosphere component of CC, same as the ccE output variable. ## This is an asymmetric sigmoid with inflection point at [a] in pE cce <- 0.0 If (2\*[a] >= (1+pE)) Then     cce <- 0.0 Else     cce <- pE^(0.5/(1+pE-2\*[a])) End If #cce <- [ccE] ## This is the humansphere component of CC, same as the output variable ccH. cch <-  pH\*(1-exp([d]\*[Knowledge])) ## COMMENT-IN TO CARRY OUT THE WHAT-IF SCENARIO DESCRIBED IN FIGURE 8. #If (Unitless(Time()) >= 1920 && Unitless(Time()) <=1980) Then #     x <- Abs(Unitless(Time()) - 1950)/30.0 #     cch <- (x + (1 - x)\*0.7)\*cch #End If cc <- ([b] + [c]\*ccH)\*ccE return cc * **Units:** Unitless * **Note:** CC is the carrying capacity per gha, used to calculate the limiting population |
| **ccE** | * **Value:** ##--------------------------ccE---------------------------------- # Carrying capacity contribution of the Ecosphere ##-------------------------------------------------------------- # xx is the fraction Nature pE <- [pE] ## a is the inflection point in x for collapse to zero carrying capacity. 0.3<a<0.45 ## bb is the carrying capacity per gha for a healthy planet, 2000 years ago (people/gha). (fit) #bb <- 1/[b] cce <- 0.0 ## cce is the sigmoid function in xx of height bb, with inflection point at aa if (2\*[a] >= (1+pE)) Then     cce <- 0.0 Else     cce <- [b]\*pE^(0.5/(1+pE-2\*[a])) End If return cce * **Units:** Unitless |
| **ccH** | * **Value:** # Long title: Carrying capacity of domesticated land in people / gha. ##--------------------------ccH----------------------------------- # Human land provides carrying capacity  in proportion to ecosystem services,  # which are proportional to Nature. Land yield increases with Technology. ##--------------------------------------------------------------------- # pH is the fraction land occupied by Humans pH <- 1-[pE] ##--------------------------------------------------------------------- ## c is the maximum biocapacity of Humans land, fit to 27% increase in CC observed  ## from 1961 to 2014 (Lin et al, 2018)  #cc <- 1/[c]  ##--------------------------------------------------------------------- ## d is minus the log dependency of carrying capacity on Technology, fit to 20th century data. ## Note that d must be a negative number. dd <- [d] ##---------------------------------------------------------------- ## ff is the conversion factor of Technology to carrying capacity per person ## Carrying capacity of domesticated land /sea can be increased using technology. The  ## technology benefit is modeled here using the rule of diminishing returns. ## As more technology is applied, the carrying capacity increases less and less, approaching ## the value maximum value c.  cch <- (1-exp(dd\*[Knowledge])) ##---------------------------------------------------------------- ## Because ecosystem services are proportional to wild land/sea, and because the carrying capacity of ## domesticated land depends on ecosystem services, ccH depends directly on ccN. ccN is the carrying ## capacity of wild land/sea, measured as the number of people supported per gha. ## This equation models persistent population and harm to the environment, including and especially, ## persistent climate changes due to fossil fuel emmission. One example of  ## ecosystem services is the atmosphere's ability to absorb fossil fuel emmissions.  #cch <- pH\*cch\*[ccE] cch <- [c]\*pH\*cch\*[ccE] ## In the 20th century, a period of high mortality occurs between ## 1920 (Spanish flu, WW1) and 1950 (WW2), after which mortality drops ## and carrying capacity rises (the green revolution, vaccines, etc.) ## due to technology.  #If (Unitless(Time()) >= 1920 && Unitless(Time()) <=1980) Then  #    x <- Abs(Unitless(Time()) - 1950)/30.0  #    cch <- (x + (1 - x)\*0.7)\*cch #End If return cch * **Units:** Unitless |
| **d** | * **Value:** # Efficiency of Knowledge in raising carrying capacity. # Larger negative leads to a higher end-game population.  # Try values between -50 and -200 d <- -110.0 #d <- Fix(Rand(-200, -50)) return d * **Units:** Unitless * **Note:** d=-300 is the negative log efficiency of Technology in raising carrying capacity. Larger negative leads to higher end-game value. |
| **Eo** | * **Value:** ## ------------ Initial value for Ecosphere [Eo] ## E0 is the total gha of biocapacity for the whole Earth. ## E0 derived from ecological footprint literature is 1.2e10. ## However, this value puts too much curvature in the late 20th century  ## population numbers, which have been rising at a roughly linear rate. ## -----------------Explore this variable------------------------- ## Lower N\_0 leads to earlier collapse. Higher N\_0 leads to higher, later collapse. ## THIS IS THE OPTIMAL SETTING ACCORDING TO HYPERFIT #x <- 0.705e10 ### COMMENT-IN TO EXPLORE DEPENDENCE ON Eo #x <- Fix(Rand(0.420e10,0.440e10)) x <- 0.705e10 return x * **Units:** Unitless |
| **fit** | * **Value:** x <- [population]-[pop data] x <- x/([population]+1) return x * **Units:** Unitless |
| **g** | * **Value:** # Variable g is the domestication (birth) rate, which is composed of the intrinsic growth  # rate plus the initial rewilding (death) rate.  # Input variable [τ] is the doubling time in years in 1000CE. # At 1000bce this growth rate and the death (rewilding) rate add to D\_0. # The term (1-exp([u]\*[pE])) is the extraction model, approaching zero asymptotically as # [pE] approaches zero. # g is not a variable in the model, just an equation that combines 4 variables. g <- [Io] + Ln(2.0)/[τ]   # initial birth rate is death rate + rate from initial doubling time g <- g\*(1-exp([u]\*[pE]))   # larger negative u increases birth rate. w <- [w]   ## begin to save Nature when it drops below w q <- 1  p <- 1 - [p] x <- Unitless(Time()) ## Keep pN above w by scaling back growth. If ([pE] < w) Then   ## attentuate g to degree p with phase in y   y <- x - [sy]   If (y <= 0.0) Then      q <- 1.0   Else If (y >= [py]) Then      q <- p\*(1-exp(-10\*(w-[pE]))) + exp(-10\*(w-[pE]))   Else       q <- ((y/[py])\*p+(1-y/[py]))\*(1-exp(-10\*(w-[pE]))) + exp(-10\*(w-[pE]))   End If   g <- g\*q End If return g * **Units:** Unitless * **Note:** G is the intrinsic growth rate, determined by curve fit. |
| **Ho** | * **Value:** ## Starting value for domesticated land in 0CE.  ## Determined by leastsquares fit of early population data with an  ## assumed constant carrying capacity. In global hectares (gha). ## 1.613e8 ## This variable cannot be accurately set based on historical estimates of population ## in year 0CE because those numbers are uncertain. The value of H0 that optimizes the ## fit to population data from 1000 to 1970 is roughly 1.5e8. But the optimum depends strongly ## on the setting of [t], the hyper-exponential doubling time of technology.  ## Population data in years 1400-1700 depend on both of these variables. There this range of  ## years was used to find the 2-parameter optimum. ## ------ Explore this variable -------- ## IF t=1525, THEN THE OPTIMUM VALUE FOR H0 IS 2.1E8 #x <- 2.1e8  ## IF t=720, THEN THE OPTIMUM VALUE FOR H0 IS 1.1E8 #x <- 1.1e8  x <- 0.150e9  return x * **Units:** Unitless |
| **Io** | * **Value:** ## [Io] = Base death rate = Ignorance of life-saving technology. ## This variable is the initial value for the rate of mortality, ## which is multiplied by [humansphere] to give its outflow [rewilding]. ## [rewilding] is proportional to deaths, all else being equal.  ## [Io] is not a sensitive variable. A wide range of values of [Io] allows ## the data to be fit by adjusting other parameters. However, its ## value determines the equilibrium population after 2100. ## A higher value for [Io] means that the historical base death rate must have been high ## and our equilibrium population will therefore be high. A low value for [Io] means ## historical death rates were low and therefore the future equilibrium population ## will be low. ## --------- Explore this variable -------------- ## COMMENT-IN TO TRY RANDOM VALUES # x <- Fix(Rand(0.02,0.5)) ## RAISE OR LOWER Io. RUN A SIMULATION. LOOK AT THE POPULATION IN 2200. #io <- Fix(Rand(0.05,0.2))     io <- 0.05 return io * **Units:** Unitless * **Note:** starting value for Ignorance |
| **Ko** | * **Value:** # [Ko] is the initial value for Knowledge in year 0CE  # fit to population data from 1000-1970 ## Explore this variable---------------- #7.25e-11 7.25e-11 * **Units:** Unitless |
| **logData** | * **Value:** ## Output variable: log of population from UN predictive model by Lutz. Log([pop data]+1) * **Units:** Unitless |
| **logHumans** | * **Value:** # output variable: log of predicted population Log([population]+1) * **Units:** Unitless |
| **p** | * **Value:** ## p is the enforcement strength of conseration policy 0.50 * **Units:** Unitless * **Note:** aggressiveness of saving of Nature |
| **pE** | * **Value:** pe <- [Ecosphere]/([Ecosphere]+[Humansphere]) #pe <- [Ecosphere]/[Eo] return pe * **Units:** Unitless |
| **pI** | * **Value:** [Ignorance]/([Ignorance]+[Knowledge]) * **Units:** Unitless * **Note:** fraction immortal |
| **population** | * **Value:** # Output variable: human population. # As for a K-selected species, human population is determined by the carrying capacity [CC]. # Read the work of Hopfenberg and Pimentel for more on this concept as applied to humanity. # This number assumes a constant requirement of resources per person, # but not a constant amount of land. CC expresses the efficiency in the use # of the humansphere. # # The implied outcome of a decreased carrying capacity [CC] is population decline by some means, # either starvation, war, or family planning. # This equation is a built-in assumption.  # [Humansphere]\*[CC] * **Units:** Unitless |
| **py** | * **Value:** ## y is the number of years to phase in w, non-BAU scenario y <- 50.0 return y * **Units:** Unitless * **Note:** ears delay in phasing in conservation |
| **r** | * **Value:** ## Equation r converts [v] and  [pE] to a rate of ## obsolescence of Knowledge. The value for [v] was fit to  ## published data on carrying capacity increases due to technology ## in the late 20th century. ## r goes to zero as v goes more negative. ## r increases as pN goes to zero ## r increases less as v goes more negative. Less obsolescence. Higher tech. scale <- 0.5 r <- scale\*exp([v]\*[pE]) return r * **Units:** Unitless |
| **sy** | * **Value:** 2020 * **Units:** Unitless |
| **u** | * **Value:** ## HUMAN AGGRESSIVENESS in times of hardship ## The variable u controls the rate of Domestication of wild land (Nature) ## in the limit of zero wild land.  # Larger negative u decreases Birth more as Nature approaches zero. ## This variable affects only the outcome after collapse, since before collapse the  ## amount of Nature is never low enough to affect .  ## u = -10.6     u <- -10.6 #    u <- Fix(Rand(-7.5,-6.0)) return u * **Units:** Unitless * **Note:** dependence of birth on Nature |
| **v** | * **Value:** # Variable v controls the degree to which depletion of Nature leads to the  # emergence of now modes of mortality. But since Technology is used to # model both decrease in mortality and increase in carrying capacity # (food production), variable v also models the degree to which # loss of Nature affects carrying capacity.  # v must be negative. # A large negative v means Technology is robust to the degradation of Nature and stays high # as Nature approaches zero. A small negative value for v means Technology is sensitive to  # loss of Nature and declines more sharply as Nature declines. This variable provides # a means to explore scenarios. # -11.46  #x <- 10^Fix(Rand(1.0,2.5)) #v <- -1\*x v <- -11.46 #v <- Fix(Rand(-11.5,-10.5)) return v * **Units:** Unitless * **Note:** dependence of birth on Nature |
| **w** | * **Value:** 0.0 * **Units:** Unitless * **Note:** Fraction of Nature to preserve |
| **κ** | * **Value:** ## [kappa] is the base value for the rate of Technology growth in units of 1/years ## kappa=0.007017 corresponds to a doubling time of t2 = ln(2)/0.007017 = 98.8 years ## This number was found by multivariable fit. ## EXPLORE THIS VARIABLE----------- # If you increase [kappa] then [knowledge] grows faster, therefore # hyperexponential growth overcomes exponential growth sooner. # [kappa] is correlated with [tau]. When optimized together, [tau] <- 850 # and [kappa] <- 0.0096 # Note that tau is in units of years, and kappa is in units of inverse years. kappa <- 0.00958 return kappa * **Units:** Unitless |
| **τ** | * **Value:** # tt is the base doubling time of the [humansphere] in years in 1000CE. Set  # based on multivariable fitting.  # Explore this variable! ---------------- # Increasing [tau] will slow the growth of [humansphere] and therefore delay  # hyperexponential growth. Increasing [tau] will accelerate the arrival of  # hyperexponential growth. # Look at the years 1700-1900. A high [tau]  <- 1000, causes these population to decrease. # A low [tau] <- 700 causes these populations to be too high. # [tau] correlates with [k]. When both are optimized together, [tau] <- 850 is optimal. tau <- 832 return tau * **Units:** Unitless |
| **Model Stocks** | |
| **Ecosphere** | * **Initial Value:** # ------------ The Ecosphere: stock value # Land/sea not domesticated by humans, in global hectares of biocapacity (gha). # For more on the definition of Ecosphere and the gha units, read the literature # about the ecological footprint (M. Wackernagel) # Starting value is a variable Eo that affects the population from 1970 on. [Eo] * **Non-Negative:** Yes * **Units:** Unitless |
| **Humansphere** | * **Initial Value:** #Long title: Land/sea domesticated by humans, in global hecatares of biocapacity. #Initial value for Humans is the area domesticated by the dominant human metapopulation at Year 0 # 1.613e8 is from LS fit [Ho] * **Non-Negative:** Yes * **Units:** Unitless |
| **Ignorance** | * **Initial Value:** #Long title: global human mortality rate from all causes except famine. #Disease includes predation, injury, violence, disease and all other causes of death #except death from starvation, which is modeled separately. [Io] * **Non-Negative:** Yes * **Units:** Unitless * **Note:** Disease is the death rate due to predators and other environmental causes, but not starvation and other growth limited causes |
| **Knowledge** | * **Initial Value:** # ------------ Knowledge: stock value # Amount of life-saving and efficiency-driving technology # Technology includes medicine, defensive weapons, shelter and all things that  # improve life expectancy. Technology also drives improvements in food production, # therefore raises the carrying capacity. # The initial value for knowledge is Ko. # Units of knowledge ar 1/years.  [Ko] * **Non-Negative:** No * **Units:** Unitless * **Note:** Technology is the cumulative eradication of death. |
| **Model Flows** | |
| **Domestication** | * **Rate:** # Domestication is the growth rate of Human expressed as land. # Domestication is prportional to Humans (simple exponenial) and subject to # the extraction model with respect to Nature.  x <- [g]\*([Humansphere])   ## World 4.5 return x * **Alpha:** Ecosphere * **Omega:** Humansphere * **Positive Only:** Yes * **Units:** Unitless * **Note:** The Death rate depnds on Disease |
| **Learning** | * **Rate:** # Ignorance goes down as Knowledge is developed. # k is an intrinsic rate, fit to pop data from 1000 - 1960. x <- [Knowledge]\*[κ] return x * **Alpha:** Ignorance * **Omega:** Knowledge * **Positive Only:** Yes * **Units:** Unitless * **Note:** Eradication is the depletion of disease due to growth of Technology |
| **Obsolescence** | * **Rate:** ## Long title: The re-emergence of high mortality as ecosystem services decline. # As Nature declines, the loss of ecosystem services introduces new threats and/or # makes current technology obselete, leading to new modes of mortality.  # For example, climate change is a direct result  # of the loss of the ecosystem service of climate stabilization. Climate change will # result in loss of carrying capacity, leading to social and economic pressures that  # in turn lead to increased mortality. Emergence should be viewed as the # increased mortality due to technological obselesence. The technology for # food production will be obsolete in some areas as climate changes. # Emergence uses the variable r, which was fit to known technological increases in carrying capacity. # Higher r leads to steeper decline in Technology, and therefore in population. obsolescence <- [r]\*[Knowledge] return obsolescence * **Alpha:** Knowledge * **Omega:** Ignorance * **Positive Only:** Yes * **Units:** Unitless * **Note:** Emergence of new threats. |
| **Rewilding** | * **Rate:** #Long title:  Rate of loss of homansphere (death of humans) as measured in gha of biocapacity. # This flow is proportional to Ignorance.  death <- [Ignorance]\*[Humansphere] return death * **Alpha:** Humansphere * **Omega:** Ecosphere * **Positive Only:** Yes * **Units:** Unitless * **Note:** The Death rate depnds on Disease |
| **Model Converters** | |
| **pop data** | * **Data:** 0,170000000; 200,190000000; 400,190000000; 500,190000000; 600,200000000; 700,207000000; 800,220000000; 900,226000000; 1000,254000000; 1100,301000000; 1200,360000000; 1250,400000000; 1300,360000000; 1340,443000000; 1400,350000000; 1500,425000000; 1600,545000000; 1650,470000000; 1700,600000000; 1750,629000000; 1800,813000000; 1850,1128000000; 1900,1550000000; 1910,1750000000; 1920,1860000000; 1930,2070000000; 1940,2300000000; 1950,2400000000; 1960,3000000000; 1974,4000000000; 1987,5000000000; 1999,6000000000; 2011,7000000000; 2018,7600000000; 2024,8000000000; 2030,8500000000; 2045,9000000000; 2050,9100000000; 2060,9150000000; 2070,9050000000; 2080,8950000000; 2090,8800000000; 2100,8700000000 * **Source:** Time * **Interpolation:** Linear * **Units:** Unitless |